

УДК 504.064.3

І.С. СКІТЕР<sup>\*,\*\*</sup>, В.Ф. ГРЕЧАНІНОВ<sup>\*\*</sup>, В.А. СЛОБОДЯНИК<sup>\*\*\*</sup>, Є.А. МЕНЬШЕНІН<sup>\*,\*\*</sup>,  
А.В. ЛОПУШАНСЬКИЙ<sup>\*\*</sup>

## ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДИКИ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ДЛЯ ОЦІНКИ ВАРІАНТІВ КОМПЛЕКТУВАННЯ БЕЗПЛОТНИХ ДОЗИМЕТРИЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

\*Інститут проблем безпеки атомних електростанцій НАН України, м. Чорнобиль, Україна

\*\*Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, м. Київ, Україна

\*\*\*Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки ЗС України, м. Київ, Україна

**Анотація.** Представлене дослідження присвячене вирішенню проблем, пов'язаних з оптимальним вибором раціонального носія на базі безпілотного літального апарата (БПЛА) і складу спеціального обладнання для виконання задач дистанційної радіаційної розвідки та контролю комплексного радіаційного зараження місцевості. Актуальність дослідження полягає у необхідності оперативного реагування на ризики, пов'язані з можливим застосуванням тактичної ядерної зброї та аварій (руйнувань) ядерних об'єктів (атомних електростанцій, могильників та сховищ радіоактивних відходів тощо), викликаних агресивними діями країн-паріїв (росії, північної Кореї, Ірану) у світі. Такі загрози вимагають оперативно оцінити рівні зараження територій районів розташування військ (сил) та цивільного населення, забезпечити обізнаність посадових осіб для прийняття відповідних рішень органами військового управління. У статті проведено аналіз предметної області використання безпілотних дозиметричних комплексів (БДК), описано поетапний системний підхід до визначення комплексного показника ефективності використання БДК. Обґрунтовано математичну формалізацію етапів системного підходу до комплектування БДК обладнанням за відповідними групами факторів. Розроблені методики: 1) комплексного, поетапного аналізу варіантів комплектації БДК на основі групового експертного оцінювання; 2) комплексного аналізу варіантів комплектації БДК на основі багатокритеріальної оптимізації та на її ж основі розроблено алгоритм вибору варіантів комплектації. Це дає змогу для обрання раціонального типу БПЛА та комплекту спеціального обладнання для безпілотних авіаційних комплексів дистанційної радіаційної розвідки відповідною посадовою особою Збройних сил України, що приймає рішення.

**Ключові слова:** безпілотний дозиметричний комплекс, системний підхід, комплексний показник ефективності, методи експертного оцінювання, багатокритеріальна оптимізація, оперативна радіаційна розвідка.

**Abstract.** The present study is devoted to solving problems related to the optimal choice of a rational carrier based on an unmanned aerial vehicle (UAV) and, accordingly, special equipment for performing remote radiation reconnaissance and monitoring of complex radiation contamination of the area. The relevance of the research arises from the need for a prompt response to the risks associated with the possible use of tactical nuclear weapons and accidents (destructions) of nuclear facilities (nuclear power plants, nuclear waste repositories, radioactive waste storage facilities, etc.) caused by the aggressive actions of pariah countries (Russia, North Korea, Iran) in the world. Such threats require prompt assessment of the levels of contamination in the areas where troops (military) and the civilian population are located, to ensure the awareness of officials in order to make appropriate decisions by military administration bodies. The article analyzes the subject area of using unmanned dosimetry systems (UDS) and describes a step-by-step systematic approach to determining a comprehensive indicator of the effectiveness of their use. The mathematical formalization of the stages of a systematic approach to equipping UDS according to the relevant groups of factors is substantiated. The following methods have been developed: 1) a comprehensive, step-by-step analysis of UDS configuration options based on group expert assessment; 2) a comprehensive analysis of

*UDS configuration options based on multi-criteria optimization and, on its basis, an algorithm for selecting configuration options was developed. This makes it possible to select a rational type of UAV and a set of special equipment for unmanned aerial systems for remote radiation reconnaissance in accordance with the decision-making official of the Armed Forces of Ukraine.*

**Keywords:** *unmanned dosimetry complex, system approach, complex performance indicator, methods of expert evaluation, multi-criteria optimization, operational radiation reconnaissance.*

DOI: 10.34121/1028-9763-2024-2-107-125

## 1. Вступ

Повномасштабна агресія росії проти України і пов'язана з цим складна військово-політична обстановка у світі знову ставлять перед людством питання можливості застосування ядерної зброї та руйнувань великих ядерних об'єктів, таких як атомні електростанції або сховища радіоактивних відходів. В умовах великих за масштабом та комплексних радіаційних заражень місцевості, до того ж динамічних у часі, постає питання оперативного проведення радіаційної розвідки, моніторингу і контролю радіаційної обстановки у визначених районах із заданим рівнем достовірності і повноти. Тільки наземними засобами, тобто спеціальними машинами РХБ розвідки або ж мережею спостережних постів, вирішити цю задачу неможливо. Необхідний комплексний підхід із залученням повітряних засобів радіаційної розвідки.

Проведення повітряної радіаційної розвідки має ряд переваг над наземною розвідкою, наприклад, можливість проведення розвідки у важкодоступних місцях або безпечної розвідки замінованих територій. Раніше як повітряні засоби радіаційної розвідки слугували спеціально обладнані вертольоти з набором відповідного обладнання. Їх можливості були обмежені радіаційними дозами, які може отримати екіпаж у ході ведення розвідки. Крім того, після проведення радіаційної розвідки такі машини самі ставали джерелом наведеної радіаційної активності, потребували дезактивації, а за певних рівнів зараження виведення з експлуатації та збереження у спеціально обладнаних місцях. Слід також взяти до уваги, що утримання та обслуговування таких машин у мирний час було порівняно дорогим. На відміну від них, дистанційно керовані повітряні дрони є порівняно дешевими в обслуговуванні та експлуатації, можуть проводити розвідку у радіаційних полях із високими рівнями радіаційного опромінення без ризику для життя людей, а також близько до лінії фронту, де можуть активно діяти засоби протиповітряного ураження противника.

На даний час на озброєнні Збройних сил України ще не використовуються дистанційно керовані засоби радіаційної розвідки, які вже впроваджені та широко застосовуються у ЗС провідних країн світу.

Застосування дистанційно керованих засобів радіаційної розвідки у випадку застосування противником ядерної зброї (руйнувань ядерних об'єктів) дозволить у режимі реального часу оперативно оцінити межі та рівні зараження територій, забезпечити ситуаційну обізнаність та інформаційно-аналітичну підтримку прийняття відповідних рішень органами військового управління.

Світові тенденції та вітчизняний досвід свідчать про актуальність проблеми своєчасного виявлення та оцінки зон радіоактивного зараження місцевості з метою забезпечення захисту особового складу (персоналу) від дії іонізуючого випромінювання. Найкраща практика захисту особового складу заснована на своєчасному прийнятті органами військового управління відповідних рішень, які ґрунтуються на достовірних даних радіаційної розвідки.

*Метою статті* є розробка методики вибору раціонального типу БПЛА та комплексу спеціального обладнання для безпілотних авіаційних комплексів дистанційної радіаційної розвідки з використанням методів експертного оцінювання та комплексного використання модифікованих методів багатокритеріальної оптимізації і аналізу ієрархій.

## 2. Постановка проблеми

Аналіз досвіду збройних конфліктів сучасності та поглядів військових фахівців провідних країн світу [1–3] свідчить про зростаючу роль та частку участі безпілотних авіаційних комплексів (БпАК) при виконанні широкого спектра завдань, включаючи завдання радіаційної розвідки та контролю [4]. Постійно збільшуються номенклатура та можливості БпАК, удосконалюється їх обладнання. Паралельно активно розвиваються детектори іонізуючого випромінювання різноманітного призначення та супутнє обладнання для БпАК, підвищується їх чутливість, здатність працювати у широкому діапазоні енергій, зменшуються масо-габаритні характеристики тощо.

Таким чином, враховуючи безліч задач можливого бойового застосування БпАК радіаційної розвідки, постає проблема оптимізації варіантів проведення такої розвідки з відповідним раціональним вибором як повітряного носія (БпАК), так і комплексу спеціального обладнання під конкретну задачу їх застосування.

У загальному вигляді проблема вибору раціонального варіанта БпАК радіаційної розвідки може бути сформована таким чином. Базуючись на засобах наземної радіаційної, хімічної, біологічної (далі РХБ) розвідки, постах контролю РХБ обстановки, даних від Розрахунково-аналітичних станцій і груп, в наявності є оціночна інформація про радіаційну обстановку в зоні зараження. Необхідно провести раціональний вибір типу БПЛА та комплексу спеціального обладнання для дистанційної радіаційної розвідки, так щоб за мінімальний час отримати реальну картину радіаційного зараження заданої ділянки території.

Постановка задачі вибору раціонального варіанта БпАК радіаційної розвідки буде доповнюватися в залежності від ситуаційних обмежень (район, тривалість розвідки, тип джерела іонізуючого випромінювання, метеорологічні умови тощо). Ці обмеження будуть наслідком радіаційної обстановки, що склалася, та вибраного варіанта проведення радіаційної розвідки.

За своєю постановкою така задача відноситься до класу задач структурно-параметричного синтезу складних технічних систем із заданими технічними характеристиками та обмеженнями на їх склад та способи застосування.

## 3. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питанням аналізу складу та структури БпАК для проведення радіаційної розвідки присвячені публікації Мосова С.П. [4], Єфремова О.В., Коршець О.А. [5] та ін. У приведених публікаціях розглянуті проблеми, пов'язані з вибором оптимального типу та варіанта безпілотних літальних апаратів. Наголошується при наявності проблеми при застосуванні БПЛА проводити обґрунтований вибір раціонального типу та варіанта обладнання БПЛА для забезпечення ефективного виконання завдання.

У роботі [6] розглядається актуальне наукове завдання щодо створення алгоритмічного забезпечення автоматизованої ситуаційної системи управління груповим застосуванням маневрених безпілотних літальних апаратів із урахуванням можливості підвищення безпеки їх польотів.

Автори [7] наголошують на необхідності розробки автоматизованих систем моніторингу території за допомогою БПЛА.

Необхідності математичної формалізації процесів радіаційної розвідки території присвячена робота авторів Мельник В., Бліндер Ю., Мендель В. [8], в якій приведені математичні основи прогнозування станів території за допомогою математичного моделювання.

Таким чином, проблема автоматизованого контролю та радіаційної розвідки території розглядається з позицій формування комплексів радіаційної розвідки на основі математичних підходів до їх комплектування та визначення узагальнених показників ефективності їх використання.

#### 4. Аналіз предметної області (комплекси)

Безпілотний дозиметричний комплекс, як правило, містить у собі носій (БПЛА) та комплект спеціальної апаратури, до складу якої можуть входити детектор потужності амбієнтного еквівалента дози гамма та рентгенівського випромінювання,  $\gamma$ -спектрометр, детектор нейтронного випромінювання, навігаційні датчики, детектори висоти або повітряного тиску для визначення висоти польоту, відеокамера, засоби обміну інформацією з оператором тощо. Під час експлуатації БПЛА на перше місце постає його конструктивна особливість — обмеженість часу польоту, зумовлена запасом пального або працездатністю електричної батареї, його вартість тощо. Таким чином, за таких обмежень виникає завдання вибору оптимального набору вимірювальної апаратури та оптимальної траєкторії польоту, розв'язання яких дасть змогу провести детальну розвідку та аналіз великої території, витративши на це найменшу кількість часу і палива.

Аналіз задач та їх кореляції з зовнішніми умовами дослідження щодо проведення радіаційної розвідки за допомогою безпілотного дозиметричного комплексу (далі БДК) показує, що значна увага дослідників приділяється вибору апаратури. Наприклад, для оцінки ступеня радіоактивного зараження території може виявитися достатнім застосування чутливого радіометра або датчика потужності дози. Якщо йдеться про склад радіонуклідів, що забруднюють підстилаючу поверхню, тоді на БПЛА необхідно встановити апаратуру, що вимірює спектр  $\gamma$ -(нейтронного) випромінювання, за енергією якого і визначають шукані характеристики. Завдання ускладнюється залежно від поставленої мети: просто дати оцінку радіоактивного забруднення підстилаючої поверхні території, що цікавить дослідника, або дати вичерпну інформацію про придатність цієї території для подальшого її використання чи довгострокового розміщення особового складу ЗС України, населення і техніки. Розв'язання цього завдання вимагає застосування БДК, оснащеного різною дозиметричною апаратурою і пристроєм передавання інформації в режимі реального часу (радіоканалом) до аналітичного центру для її подальшого опрацювання [9]. Тому постає завдання підтримки прийняття рішень у виборі технічного оснащення БДК у частині комплектації відповідними до задач носіями, дозиметричними та іншими приладами.

Таким чином, для практичного застосування методики вибору оптимального варіанта комплектування БДК можна визначити такі групи критеріїв (показників):

- тип та тактико-технічні характеристики БПЛА;
- тактико-технічні характеристики корисного навантаження;
- прогнозні показники радіаційного зараження місцевості;
- показники, що визначають метеорологічну обстановку;
- географічні показники району зараження (типи та стан ґрунту, водні джерела, рослинність, рельєф місцевості тощо);
- економічні характеристики складових комплексу.

У табл. 1 приведені узагальнені техніко-технологічні характеристики сучасних БДК, які активно використовуються для проведення радіаційної розвідки.

Таблиця 1 — Основні техніко-технологічні характеристики сучасних типів БДК

Назва системи	Країна	Оснащення	Особливості використання
RISER	Велика Британія	Навігаційна система GPS, знімальні камери високої просторової розрізненості, детектор	Прольот згідно з заданим маршрутом, фіксація рівня радіації. Синхронізація з GPS-положенням

Продовж. табл. 1

		гамма-випромінювання «N-Visage» (передача зображень у кольорі та тривимірному масштабі)	Відправка даних у режимі реального часу зовнішньому пілоту (оператору) на наземну станцію і збереження на борту. Після посадки інформація відновлюється разом із скоригованими даними вимірів радіації. Проаналізовані дані вимірювань радіації надаються ОПР
BRUS	Чехія, NUVIA, Лабораторія Multi-Robot Systems (Чеський технічний університет), фінно-чеська компанія ADVACAM	Система моніторингу Drones-G для вимірювання рівня радіації	БПЛА для повітряного радіаційного контролю. Визначення локального джерела випромінювання радіаційного забруднення. Радіаційний детектор безпілота дозволяє визначити напрямок руху радіоактивних частинок, вивести БПЛА до місця витoku. БПЛА обладнаний інерціальною системою навігації для польотів у середині будівель, здатний автономно досліджувати приміщення, в яких не працює GPS
Kromek	Велика Британія	Автономна система контролю радіації з повітря (AARM)	Картографування радіоактивного забруднення на малих висотах, карти випромінювання з метровою розрізненістю, включаючи місця з високою дозою і недоступні місця
SNAV (Smelling Nano Aerial Vehicle)	Барселонський інститут біоінженерії в Каталонії (IBEC), Іспанія	Створений на базі комерційного безпілота Crazyflie 2.0. Радіомаяк, детектор гамма-випромінювання, детектор токсичних газів	Виявлення радіаційного випромінювання та витoku токсичних газів. Апарат оснащений високочутливим датчиком газів MOX із чутливістю до однієї частини на мільйон в об'ємі (залежно від речовини), визначення джерела витoku газу, визначення його концентрації
Mirion RDS-32, Elios 3	Атланта, Джорджія, США (Merion), Швейцарія (Flyability)	Поєднання RDS-32™ Next-Generation Survey Meter з дроном Elios 3 від Flyability	Перший комерційно доступний дрон, здатний виконувати локалізацію та дистанційне радіаційне обстеження приміщень — можливість персоналу збирати дані, залишаючись у безпеці поза зонами опромінення
Arktis	Швейцарія	Дрон із плоскопанельним гамма-детектором (FPG) великої площі	Дрон для виявлення радіоактивного забруднення, нанесення на карту території площею 100000 м <sup>2</sup> за один політ тривалістю 20 хвилин. Система приблизно у 50 разів більш чутлива, ніж звичайні детектори з урахуванням дронів. Може відображати забруднення на швидкості 2–20 м/с. Оснащений плоскопанельним гамма-детектором (FPG) великої площі, система виявляє та локалізує радіоактивні джерела

Продовж. табл. 1

GAMO N-Drone	CAEN SpA, Італія	Спектрометричний блок, що використовує Ethernet, USB або канал керування дроном для надсилання даних у реальному часі на свою наземну станцію	GAMON-Drone використовує алгоритми спектрального аналізу, які можуть виконувати одночасну ідентифікацію кількох радіологічних джерел і забезпечують кількісні вимірювання дози та активності радіонуклідів за допомогою вбудованого калібрування ефективності детектора. Залежно від завдання може оснащуватися NaI(Tl), CeBr <sub>3</sub> , LaBr <sub>3</sub> (Ce) або NaI детекторами. Має Web-інтерфейс, що доступний через звичайний браузер, показує швидкість рахунку датчика в реальному часі, потужність еквівалента амбієнтної дози в реальному часі на приладовій панелі — живий спектр датчика
--------------	------------------	---	---

Деякі установи у співпраці з фірмами-виробниками дронів проводять власні напрацювання з використанням дронів та спектрометрів різних марок або датчиків для відпрацювання методів і методик вимірювання радіоактивного забруднення поверхні території з повітря. Прикладами можуть бути напрацювання Національного інституту ядерного, хімічного та біологічного захисту (SUJCHBO), Чехія [10], Центру ядерних досліджень SCK-CEN у співробітництві зі спеціалістами у аерокосмічній галузі SABCA, Бельгія [11], Канадської ядерної лабораторії (CNL) у співробітництві з Центром ядерних досліджень SCK-CEN, Бельгія [12] та ін.

Аналіз предметної області показує, що напрям розвитку дистанційно керованих повітряних засобів радіаційної (а також хімічної) розвідки стає все більш популярним у світі завдяки своїй оперативності, порівняній дешевизні та можливості застосування в самих складних умовах радіаційного зараження. На теперішній час найбільш ефективним вважається проведення радіаційної розвідки за допомогою БПЛА для таких цілей:

- визначення меж районів, постраждалих від радіаційного зараження;
- визначення розмірів та напрямку руху хмар радіоактивних аерозолів;
- контроль за зміною стану радіаційної обстановки у визначених районах;
- пошук джерел іонізуючого (рентгенівського) випромінювання;
- уточнення радіаційної обстановки, отриманої від наземних засобів радіаційної розвідки;
- можливість проведення оперативної радіаційної розвідки у важкодоступних місцях, зонах із високим рівнем опромінення, де робота людей і навіть наземних роботизованих засобів неможлива.

## 5. Системний підхід до визначення комплексного показника ефективності використання БДК

Як показник, за допомогою якого можна проводити порівняльний аналіз, у роботі запропонований зважений комплексний показник ефективності варіанта комплектації БДК відповідно до конкретизованої особи, що приймає рішення щодо задачі радіаційної розвідки.

З точки зору математичної сторони задачі, використання традиційних методів обчислення інтегральних, глобальних, комплексних показників ефективності при порівняльному аналізі суттєво обмежене за рахунок одночасного врахування різних за фізичним, економічним чи технічним змістом його складових. При цьому найбільш суперечливими і такими, що потребують подальших досліджень, є оцінки цінності (ваги) окремих груп складових для

усереднення значень експертних оцінок у загальному показнику ефективності використання БДК.

Тому в цій роботі запропонований системний підхід до визначення комплексного показника, який враховує недоліки попередніх методів визначення традиційних узагальнених оцінок (рис. 1).

Використання системного аналізу при визначенні зваженого комплексного показника ефективності використання БДК дає змогу обрати оптимальний варіант комплектування БДК згідно з поставленими/визначеними задачами чи вимогами особи, що приймає рішення (ОПР).



Рисунок 1 — Системний підхід до визначення зваженого комплексного показника ефективності використання БДК [13]

Ключовою метою при визначенні експертних оцінок є результуючий комплексний (інтегральний) показник «ефективний БДК». Для практичної реалізації системного підходу на першому етапі проводиться формування масиву критеріїв оцінки БДК (табл. 2). Необхідно сформуванати набір критеріїв (показників) для кожної групи оцінки.

Таблиця 2 — Критерії БДК для експертного оцінювання

№ п/п	Групи критеріїв, критерії	Позначення
	ТТХ БПЛА	
1	Швидкість ведення розвідки	$Ш_{вр}$
2	Тривалість ведення розвідки	$T_{вр}$
3	Маса корисного навантаження	$M_{кн}$
	ТТХ корисного навантаження	
4	Склад корисного навантаження	$C_{кн}$
5	Повнота спеціальних вимірювань (радіометричні, спектральні, можливість виявлення нейтронів тощо)	$P_{св}$
6	Діапазон вимірювань ПАЕД по $\gamma$ -випромінюванню	$ДВ_{\gamma}$
7	Точність вимірювань ПАЕД по $\gamma$ -випромінюванню	$ТВ_{\gamma}$

Продовж. табл. 2

Економічна складова		
8	Ціна	Ц
9	Витрати на обслуговування	ВО
10	Витрати на навчання пілотів	В <sub>НП</sub>

На другому етапі проводиться групування критеріїв у фактори за ознаками (за типами БПЛА, комплектацією обладнання, економічними характеристиками складових БДК, функціональними можливостями БПЛА та БДК тощо).

На третьому етапі для груп факторів з їх критеріями проводиться визначення показника ефективності БДК із використанням відповідних методів (рис. 1):

- експертні методи (3.1) дають змогу на основі *експертних оцінок* (індивідуальних чи колегіальних) груп факторів та їх критеріїв визначити узагальнену оцінку окремому варіанту комплектування БДК і провести їх ранжування;

- метод аналізу ієрархій (блок 3.2) дає змогу проводити визначення відносних цінностей (чи відносної ефективності) варіантів із визначенням ваг як окремих критеріїв у відповідній групі, так і групи критеріїв (факторів) у результуючому показнику ефективності;

- моделі багатокритеріальної оптимізації (БКО) (блок 3.3) дають змогу на основі масиву параметричних оцінок критеріїв для відповідного фактора чи всіх факторів проводити оцінку ефективності варіантів згідно з уподобаннями (ОПР), проводити ранжування варіантів комплектування БДК, їх корекцію та прийняття рішень.

Слід зазначити, що методи 3.1–3.3 (рис. 1) можуть бути використані як окремо, так і комплексно в залежності від рівня узагальнення, визначеного ОПР. На кожному етапі використання методів до вхідних даних висуваються різні вимоги щодо представлення даних та їх формалізації. Крім того, на кожному етапі можна отримати висновки різного класу інформаційного наповнення щодо процесу прийняття рішень (рис. 2).

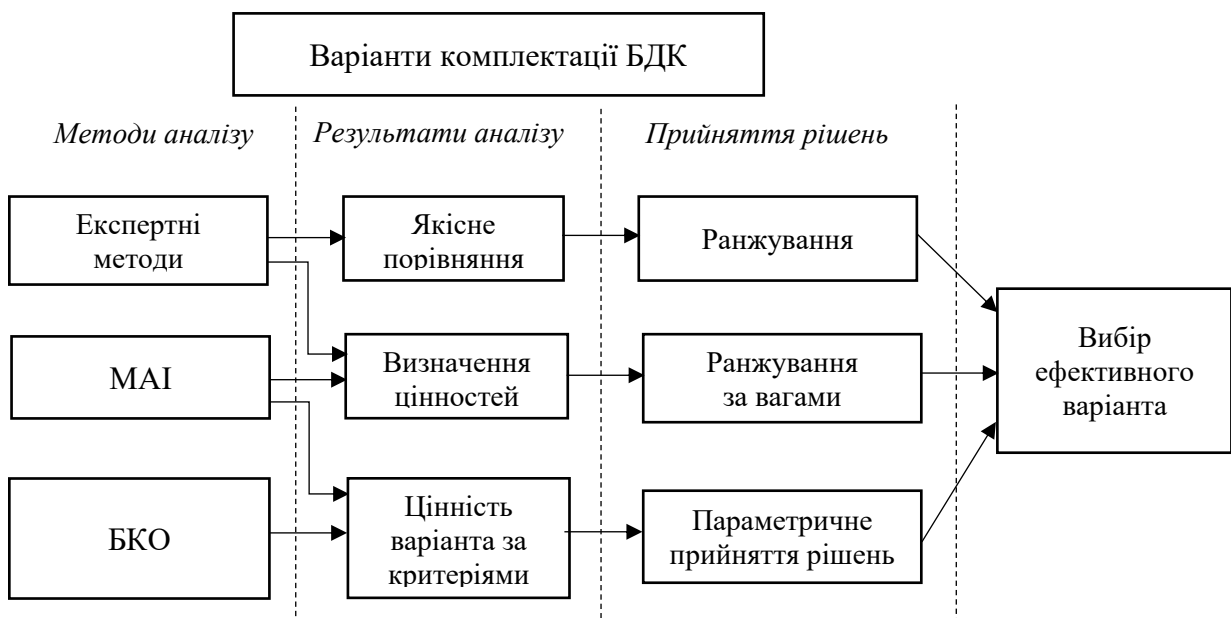


Рисунок 2 — Комплексне застосування методів аналізу для порівняльного аналізу варіантів комплектації БДК

Використання експертних методів [14] пропонується проводити за допомогою бального колегіального оцінювання як окремих груп факторів, так і їх складових — критеріїв. Перевага цієї групи методів — узагальнене оцінювання критеріїв за відносною величиною



цінності сценарію. До недоліків слід віднести необхідність ретельного підбору експертів, визначення їх компетентності та досягнення ними єдиного колегіального рішення.

Використання методик аналізу ієрархій [15] дасть змогу визначити відносні цінності як критеріїв у межах групи факторів, так і узагальненої відносної цінності (ваги) групи в загальному результаті.

Отримані таким чином порівняльні величини варіантів комплектування за потреби ОПР можуть бути деталізовані за допомогою використання методів багатокритеріальної оптимізації (БКО) [16]. При цьому можливе уточнення оцінок варіантів, ранжованих за відносними величинами, за допомогою визначення їх параметричних характеристик — технічних, технологічних, фінансово-економічних тощо (з їх критеріальною деталізацією). Перевагою методів БКО є саме параметрична деталізація ранжованих варіантів комплектації БДК за групами факторів та їх відповідними критеріями, можливість формування ОПР прийняття рішень на основі таких оцінок. До недоліків слід віднести необхідність визначення параметричних характеристик варіантів як за відповідними групами, так і за їх критеріями.

Таким чином, використання системного підходу дасть змогу провести не тільки якісний порівняльний аналіз варіантів комплектування БДК відповідно до поставлених задач РР та їх ранжування, але й врахувати параметричні характеристики складових.

## 6. Математична формалізація етапів системного підходу

Критерії БДК для експертного оцінювання, приведені в табл. 1, можна згрупувати за факторіальними ознаками, а саме: функціональними, технічними, технологічними, фінансово-економічними тощо.

Для оцінювання варіантів комплектації БДК введемо поняття «функція ефективності» варіанта обладнання  $EF_i$ , (efficiency function of the equipment option), яка тотожно дорівнює «відносній цінності»  $i$ -му варіанту комплектування БДК обладнання за відповідними групами факторів  $\Phi_i$  та їх складовими показниками:

$$\begin{pmatrix} EF_1 \\ \dots \\ EF_n \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} \Phi_1 \begin{pmatrix} Ш_{ВР,1} & Т_{ВР,1} & М_{КН,1} \\ \dots & \dots & \dots \\ Ш_{ВР,p} & Т_{ВР,p} & М_{КН,p} \end{pmatrix} \\ \Phi_2 \begin{pmatrix} С_{КН,1} & П_{СВ,1} & ДВ_{\gamma,1} & ТВ_{\gamma,1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ С_{КН,p} & П_{СВ,p} & ДВ_{\gamma,p} & ТВ_{\gamma,p} \end{pmatrix} \\ \Phi_3 \begin{pmatrix} Ц_{,1} & ВО_1 & В_{НП,1} \\ \dots & \dots & \dots \\ Ц_{,p} & ВО_p & В_{НП,p} \end{pmatrix} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

де  $\Phi_1 \begin{pmatrix} Ш_{ВР,1} & Т_{ВР,1} & М_{КН,1} \\ \dots & \dots & \dots \\ Ш_{ВР,p} & Т_{ВР,p} & М_{КН,p} \end{pmatrix}$  — група ТТХ БПЛА зі своїми показниками;

$\Phi_2 \begin{pmatrix} С_{КН,1} & П_{СВ,1} & ДВ_{\gamma,1} & ТВ_{\gamma,1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ С_{КН,p} & П_{СВ,p} & ДВ_{\gamma,p} & ТВ_{\gamma,p} \end{pmatrix}$  — група ТТХ обладнання зі своїми показниками;

$\Phi_3 \begin{pmatrix} Ц_{,1} & ВО_1 & В_{НП,1} \\ \dots & \dots & \dots \\ Ц_{,p} & ВО_p & В_{НП,p} \end{pmatrix}$  — група економічних характеристик зі своїми показниками.

Використання показника  $EF_i$  виду (1) зі своїми складовими дасть змогу реалізувати послідовно блоки 3.1, 3.2 та 3.3, представлені на рис. 1.

### 6.1. Методика комплексного аналізу варіантів комплектації БДК на основі групового експертного оцінювання

На початковому етапі реалізації методики оцінки ефективності варіантів на основі колективних експертних оцінок є множина факторів  $\Phi_1, \Phi_2 \dots \Phi_3$  із визначеними для них відповідними показниками.

Показники, представлені в табл. 1, оцінюються непараметрично групою експертів (у балах за визначеною шкалою оцінки). Результатом є колегіально визначена спільна узгоджена бальна оцінка показників для кожного варіанта.

Тоді окремий  $i$ -й варіант комплектації БДК буде представлений комплексним критерієм цінності  $W_i$ , що визначається на основі ваг груп факторів та відповідних їм критеріїв. Це дасть змогу ранжувати сценарії за величиною їхньої відносної цінності:

$$W^* > \dots > W^o, \quad (2)$$

де  $W_i^* = \operatorname{argmax}(W_i)$ ,  $W_i^o = \operatorname{argmin}(W_i)$  — найкращий та найгірший варіанти відповідно.

Методика визначення ефективності варіантів комплектації БДК на основі групового експертного оцінювання є поетапним процесом.

На етапі 1 здійснюється формування масивів показників оцінки варіантів комплектації БДК (variant criteria):

$$VC_i = (Ш_{BP(i)}, T_{BP(i)}, M_{KH(i)}, C_{KH(i)}, П_{CB(i)}, ДВ_{\gamma(i)}, ТВ_{\gamma(i)}, Ц_{(i)}, BO_{(i)}, В_{HP(i)}), \quad (3)$$

де  $i$  — окремий варіант комплектації БДК;

$i = \overline{1, p}$ ,  $p$  — кількість варіантів комплектації БДК.

На етапі 2 здійснюється групування показників за якісно однорідними факторами  $\Phi_j$ : функціональними, технічними, технологічними, фінансово-економічними та ін. У результаті проводиться формування  $k$  груп факторів для  $p$  варіантів комплектації БДК зі своїми критеріями (1):  $\Phi_1$  — технічного,  $\Phi_2$  — технологічного,  $\Phi_3$  — економічного.

$VC_1$	...	$VC_i$	...	$VC_p$
$\Phi_{11}$	...	$\Phi_{i1}$	...	$\Phi_{p1}$
$\Phi_{12}$	...	$\Phi_{i2}$	...	$\Phi_{p2}$
$\Phi_{13}$	...	$\Phi_{i3}$	...	$\Phi_{p3}$

На етапі 3 здійснюється групове експертне оцінювання факторів та їх показників (табл. 1) за бальними оцінками згідно з запропонованою шкалою та формування матриць бальних експертних оцінок для факторів та їх критеріїв для  $p$  варіантів комплектації БДК.

Варіант комплектації БДК 1			Варіант комплектації БДК $i$			Варіант комплектації БДК $p$	
Фактори (балів)	Критерії (балів)		Фактори (балів)	Критерії (балів)		Фактори (балів)	Критерії (балів)
$\Phi_{11}$ (балів)	$Ш_{BP(1)},$ $T_{BP(1)},$ $RM_{KH(1)},$	.	$\Phi_{i2}$ (балів)	$Ш_{BP(i)},$ $T_{BP(i)},$ $RM_{KH(i)},$	.	$\Phi_{p2}$ (балів)	$Ш_{BP(p)},$ $T_{BP(p)},$ $RM_{KH(p)}$
$\Phi_{12}$ (балів)	$C_{KH(1)},$ $П_{CB(1)},$ $ДВ_{\gamma(1)},$ $ТВ_{\gamma(1)}$	.	$\Phi_{i1}$ (балів)	$C_{KH(i)},$ $П_{CB(i)},$ $ДВ_{\gamma(i)},$ $ТВ_{\gamma(i)}$	.	$\Phi_{p1}$ (балів)	$C_{KH(p)},$ $П_{CB(p)},$ $ДВ_{\gamma(p)},$ $ТВ_{\gamma(p)}$

$\Phi_{13}$ ( <i>балів</i> )	$\Psi_{(1)},$ $BO_{(1)},$ $B_{HP(1)}$	$\cdot$	$\Phi_{i3}$ ( <i>балів</i> )	$\Psi_{(i)},$ $BO_{(i)},$ $B_{HP(i)}$	$\cdot$	$\Phi_{p3}$ ( <i>балів</i> )	$\Psi_{(p)},$ $BO_{(p)},$ $B_{HP(p)}$
---------------------------------	---	---------	---------------------------------	---	---------	---------------------------------	---

На етапі 4 здійснюється формування матриці переваг для факторів на основі бальних оцінок факторів:

$$A^\Phi = (a_{ij}^\Phi), \quad (4)$$

де  $a_{ij}^\Phi$  — перевага  $i$ -го фактора над  $j$ -м. Для  $i$ -го сценарію матриця переваг має вигляд

$$A_i^\Phi = \begin{pmatrix} 1 & \Phi_{i1}/\Phi_{i2} & \Phi_{i1}/\Phi_{i3} \\ \Phi_{i2}/\Phi_{i1} & 1 & \Phi_{i2}/\Phi_{i3} \\ \Phi_{i3}/\Phi_{i1} & \Phi_{i3}/\Phi_{i2} & 1 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

На основі матриці (5) проводиться оцінка ваг факторів для  $i$ -го варіанта комплектації за формулами

$$\Omega_i^{\Phi 1} = \frac{\sqrt[3]{1 \cdot \left(\frac{\Phi_{i1}}{\Phi_{i2}}\right) \cdot \left(\frac{\Phi_{i1}}{\Phi_{i3}}\right)}}{\sqrt[3]{1 \cdot \left(\frac{\Phi_{i1}}{\Phi_{i2}}\right) \cdot \left(\frac{\Phi_{i1}}{\Phi_{i3}}\right) + \sqrt[3]{\left(\frac{\Phi_{i2}}{\Phi_{i1}}\right) \cdot 1 \cdot \left(\frac{\Phi_{i2}}{\Phi_{i3}}\right) + \sqrt[3]{\left(\frac{\Phi_{i3}}{\Phi_{i1}}\right) \cdot \left(\frac{\Phi_{i3}}{\Phi_{i2}}\right) \cdot 1}}}}. \quad (5.1)$$

$$\Omega_i^{\Phi 2} = \frac{\sqrt[3]{\left(\frac{\Phi_{i2}}{\Phi_{i1}}\right) \cdot 1 \cdot \left(\frac{\Phi_{i2}}{\Phi_{i3}}\right)}}{\sqrt[3]{1 \cdot \left(\frac{\Phi_{i1}}{\Phi_{i2}}\right) \cdot \left(\frac{\Phi_{i1}}{\Phi_{i3}}\right) + \sqrt[3]{\left(\frac{\Phi_{i2}}{\Phi_{i1}}\right) \cdot 1 \cdot \left(\frac{\Phi_{i2}}{\Phi_{i3}}\right) + \sqrt[3]{\left(\frac{\Phi_{i3}}{\Phi_{i1}}\right) \cdot \left(\frac{\Phi_{i3}}{\Phi_{i2}}\right) \cdot 1}}}}. \quad (5.2)$$

$$\Omega_i^{\Phi 3} = \frac{\sqrt[3]{\left(\frac{\Phi_{i3}}{\Phi_{i1}}\right) \cdot \left(\frac{\Phi_{i3}}{\Phi_{i2}}\right) \cdot 1}}{\sqrt[3]{1 \cdot \left(\frac{\Phi_{i1}}{\Phi_{i2}}\right) \cdot \left(\frac{\Phi_{i1}}{\Phi_{i3}}\right) + \sqrt[3]{\left(\frac{\Phi_{i2}}{\Phi_{i1}}\right) \cdot 1 \cdot \left(\frac{\Phi_{i2}}{\Phi_{i3}}\right) + \sqrt[3]{\left(\frac{\Phi_{i3}}{\Phi_{i1}}\right) \cdot \left(\frac{\Phi_{i3}}{\Phi_{i2}}\right) \cdot 1}}}}. \quad (5.3)$$

На етапі 5 здійснюється формування матриці переваг для критеріїв на основі бальних оцінок:

$$A^{kp} = (a_{ij}^{kp}), \quad (6)$$

де  $a_{ij}^{kp}$  — перевага  $i$ -го критерію над  $j$ -м.

Для  $i$ -го варіанта матриця переваг має такий вигляд:

– для масиву критеріїв, згрупованих у «Фактор 1 — технічні складові варіантів комплектації БДК»:

$$A_i^{kp}(\Phi_1) = \begin{pmatrix} 1 & Ш_{BP(i)}/T_{BP(i)} & Ш_{BP(i)}/M_{KH(i)} \\ T_{BP(i)}/Ш_{BP(i)} & 1 & T_{BP(i)}/M_{KH(i)} \\ M_{KH(i)}/Ш_{BP(i)} & M_{KH(i)}/T_{BP(i)} & 1 \end{pmatrix}; \quad (7)$$

– для масиву критеріїв, згрупованих у «Фактор 2 — технологічні критерії варіантів комплектації БДК»:

$$A_i^{kp}(\Phi_2) = \begin{pmatrix} 1 & C_{KH(i)}/П_{CB(i)} & C_{KH(i)}/ДВ_{\gamma(i)} & C_{KH(i)}/ТВ_{\gamma(i)} \\ П_{CB(i)}/C_{KH(i)} & 1 & П_{CB(i)}/ДВ_{\gamma(i)} & П_{CB(i)}/ТВ_{\gamma(i)} \\ ДВ_{\gamma(i)}/C_{KH(i)} & ДВ_{\gamma(i)}/П_{CB(i)} & 1 & ДВ_{\gamma(i)}/ТВ_{\gamma(i)} \\ ТВ_{\gamma(i)}/C_{KH(i)} & ТВ_{\gamma(i)}/П_{CB(i)} & ТВ_{\gamma(i)}/ДВ_{\gamma(i)} & 1 \end{pmatrix}; \quad (8)$$

– для масиву критеріїв, згрупованих у «Фактор 3 — фінансово-економічні критерії варіантів комплектації БДК»:

$$A_i^{KP}(\Phi_3) = \begin{pmatrix} 1 & \text{Ц}_{(i)}/\text{BO}_{(i)} & \text{Ц}_{(i)}/\text{B}_{\text{HП}(i)} \\ \text{BO}_{(i)}/\text{Ц}_{(i)} & 1 & \text{BO}_{(i)}/\text{B}_{\text{HП}(i)} \\ \text{B}_{\text{HП}(i)}/\text{Ц}_{(i)} & \text{B}_{\text{HП}(i)}/\text{BO}_{(i)} & 1 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

На основі матриць (7)–(9) проводиться оцінка ваг критеріїв для відповідних факторів для  $i$ -го варіанта як відношення середнього геометричного з окремого рядка матриць (7)–(9) до суми середніх геометричних всіх рядків матриць:

$$W_i^{\Phi_{1,2,3}} = \frac{\sqrt[m]{a_{i1} \cdot \dots \cdot a_{im}}}{\sum \sqrt[m]{a_{i1} \cdot \dots \cdot a_{im}}}, \quad (10)$$

де  $m$  — кількість критеріїв у відповідному факторі.

Для визначених факторів отримаємо вектори відносних цінностей критеріїв:

$$W_i^{\Phi_1} = \begin{pmatrix} W_{\text{ШBP}(i)} \\ W_{\text{ТBP}(i)} \\ W_{\text{МКН}(i)} \end{pmatrix}, W_i^{\Phi_2} = \begin{pmatrix} W_{\text{СКН}(i)} \\ W_{\text{ПCB}(i)} \\ W_{\text{ДБ}_{\gamma}(i)} \\ W_{\text{ТВ}_{\gamma}(i)} \end{pmatrix}, W_i^{\Phi_3} = \begin{pmatrix} W_{\text{Ц}(i)} \\ W_{\text{BO}(i)} \\ W_{\text{B}_{\text{HП}(i)}} \end{pmatrix}. \quad (11)$$

На етапі 6 здійснюється формування вектора комплексних показників  $W(\Omega, \omega)$ , що містить оцінки критеріїв, які їх формують,  $\omega_1^i, \dots, \omega_k^i$  та груп факторів на основі визначення їх ваги  $\{\Omega^1, \dots, \Omega^m\}$ :

$$W = [ \langle (\omega_1^1, \dots, \omega_k^1), \Omega^1 \rangle; \langle (\omega_1^2, \dots, \omega_k^2), \Omega^2 \rangle; \dots; \langle (\omega_1^m, \dots, \omega_k^m), \Omega^j \rangle ], \quad (12)$$

де  $k, l, z$  — кількість критеріїв, які формують відповідний фактор.

У результаті розраховуються комплексні показники ваг (цінностей) варіантів комплектації БДК  $W \langle \omega, \Omega \rangle$  із урахуванням визначення ваги відповідних критеріїв  $\omega$  на основі ваги структурних факторів  $\Omega$ . Виконується за допомогою геометричної зваженої від мультиплікативної згортки виду

$$W_{(SC_j)} = \sqrt[m]{\prod_{i=1}^m [(\omega_i^j)^{\Omega^j}]_{(VC_j)}}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (13)$$

де  $VC_j \in VC$  — масив варіантів комплектації БДК;

$\omega_i^j$  — ваги критеріїв, які формують фактори відповідних варіантів комплектації БДК;

$\Omega^j$  — ваги факторів для варіантів комплектації БДК.

Для формули (12) отримаємо вектори відносних цінностей варіантів комплектації БДК, визначених за формулою (13)

$$W = \begin{pmatrix} W_{VC(1)} \\ \dots \\ W_{VC(i)} \\ \dots \\ W_{VC(p)} \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Ранжування варіантів комплектації БДК виконується за величиною їх комплексної цінності за формулою (2)

$$W^* > \dots > W^o,$$

де  $W_i^0 = \operatorname{argmin}(W_i)$ .

Вибір найкращого сценарію за критерієм  $W_i^* = \operatorname{argmax}(W_i)$  є основою для якісного вибору та впорядкування множини варіантів комплектації БДК.

## 6.2. Методика комплексного аналізу варіантів комплектації БДК на основі багатокритеріальної оптимізації

Вхідними даними до реалізації методики є критерії, представлені в табл. 1, та поняття «функція ефективності» варіанта обладнання  $EF_i$ , формалізоване вище.

Тоді у загальному вигляді багатокритеріальну задачу оцінки варіантів комплектації БДК можна розглядати як задачу одночасної оптимізації декількох цільових функцій на заданій множині допустимих планів:

$$\begin{cases} EF_i = f_i(x) \rightarrow \operatorname{opt}, i = \overline{1, p} \\ x \in X \end{cases}, \quad (15)$$

де  $p$  — кількість цільових функцій, що підлягають оптимізації;

$f_i$  — окрема  $i$ -та функція із критеріального набору ( $i = 1, \dots, p$ );

$f_i(\text{Ш}_{\text{ВР}(i)}, \text{T}_{\text{ВР}(i)}, \text{M}_{\text{КН}(i)}, \text{С}_{\text{КН}(i)}, \text{П}_{\text{СВ}(i)}, \text{ДВ}_{\gamma(i)}, \text{ТВ}_{\gamma(i)}, \text{Ц}(i), \text{ВО}(i), \text{В}_{\text{НП}(i)})$ ;

$X$  — множина допустимих планів;

$x = \{\text{Ш}_{\text{ВР}}, \text{T}_{\text{ВР}}, \text{M}_{\text{КН}}, \text{С}_{\text{КН}}, \text{П}_{\text{СВ}}, \text{ДВ}_{\gamma}, \text{ТВ}_{\gamma}, \text{Ц}, \text{ВО}, \text{В}_{\text{НП}}\}$  — окремий план із множини допустимих планів  $X$ .

Цільовою функцією є максимізація/мінімізація величини «функція ефективності» варіанта обладнання  $EF_i$  на множині визначених варіантів комплектації БДК, які характеризуються наборами критеріїв, визначених вище.

Допустимими планами виступають набори варіантів комплектації БДК із відповідними значеннями показників.

Набори допустимих варіантів комплектації БДК формуються шляхом зіставлення оцінок критеріїв варіантів комплектації БДК із врахуванням можливих/допустимих меж варіації, причому оцінка довільного допустимого плану/сценарію багатокритеріальної задачі є векторною величиною

$$f_i(\text{Ш}_{\text{ВР}(i)}, \text{T}_{\text{ВР}(i)}, \text{M}_{\text{КН}(i)}, \text{С}_{\text{КН}(i)}, \text{П}_{\text{СВ}(i)}, \text{ДВ}_{\gamma(i)}, \text{ТВ}_{\gamma(i)}, \text{Ц}(i), \text{ВО}(i), \text{В}_{\text{НП}(i)}).$$

Дослідження багатокритеріальної задачі та опрацювання методики багатокритеріальної оптимізації зручно проводити, якщо поряд із вихідною багатокритеріальною задачею розглянути таку допоміжну однокритеріальну задачу:

$$\begin{cases} EF_{\Sigma} = \sum_{i=1}^p \alpha_i f_i(x) \rightarrow \operatorname{max/min}, i = \overline{1, p} \\ f_i(x) \{ \leq \geq \} \psi_i, i = \overline{1, p} \\ x \in X \end{cases}, \quad (16)$$

де  $\alpha_i, \psi_i$  — деякі дійсні числа та векторні критеріальні характеристики, причому знаки перших із них, а також знаки нерівностей у критеріальних обмеженнях узгоджуються з оптимізаційною спрямованістю (до максимуму або до мінімуму) відповідних цільових функцій.

Алгоритм вибору варіантів комплектації БДК за методикою багатокритеріальної оптимізації представлений на рис. 3.

Узагальнена методика оцінки варіантів комплектації БДК на основі багатокритеріальної оптимізації складається з таких етапів [8]:

*Етап 1.* Визначення множини планів реалізації сценарію, відсів неефективних планів, формування множини допустимих (ефективних) планів та визначення (або наближене оцінювання) меж варіації кожної з цільових функцій на множині ефективних планів.

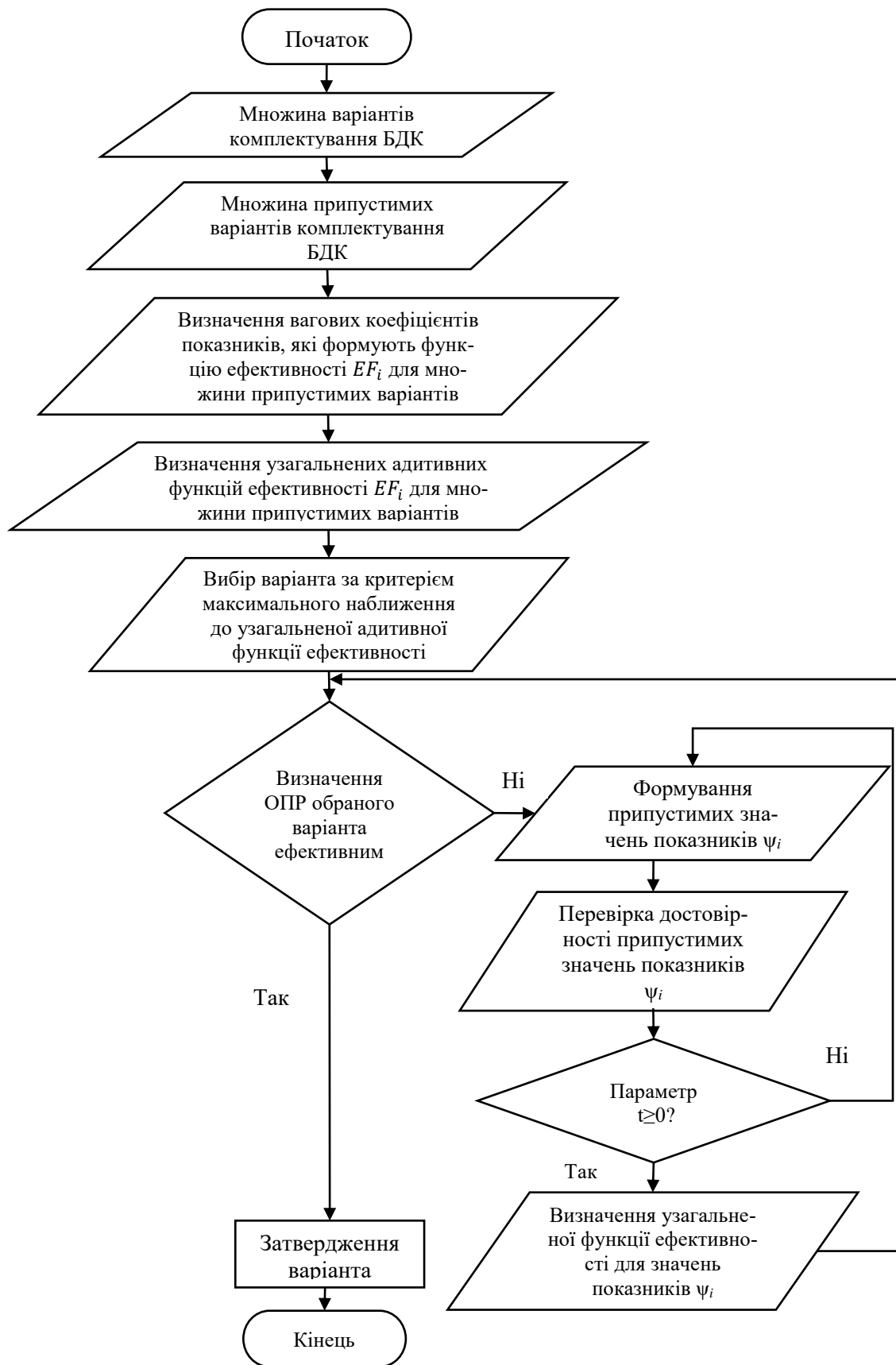


Рисунок 3 — Алгоритм вибору варіантів комплектації БДК на основі методики багатокритеріальної оптимізації

У межах варіацій кожного показника  $y$  визначаються найкращі  $y_i^*$  та найгірші  $y_i^0$  значення відповідно:

$$\begin{cases} y_i^* = \left( \text{Ш}_{\text{ВР}(i)}^*, \text{T}_{\text{ВР}(i)}^*, \text{М}_{\text{КН}(i)}^*, \text{С}_{\text{КН}(i)}^*, \text{П}_{\text{СВ}(i)}^*, \text{Д}_{\gamma(i)}^*, \text{ТВ}_{\gamma(i)}^*, \text{Ц}_{(i)}^*, \text{ВО}_{(i)}^* \text{ В}_{\text{НП}(i)}^* \right) \\ y_i^0 = \left( \text{Ш}_{\text{ВР}(i)}^0, \text{T}_{\text{ВР}(i)}^0, \text{М}_{\text{КН}(i)}^0, \text{С}_{\text{КН}(i)}^0, \text{П}_{\text{СВ}(i)}^0, \text{Д}_{\gamma(i)}^0, \text{ТВ}_{\gamma(i)}^0, \text{Ц}_{(i)}^0, \text{ВО}_{(i)}^0 \text{ В}_{\text{НП}(i)}^0 \right) \end{cases} \quad (17)$$

У межах масиву критеріїв формуються цільові функції за кожним із ефективних планів та визначаються межі варіації  $[y_k^*; y_k^0]$  за кожною з цільових функцій  $k = 1, \dots, p$ , де зірочкою позначено найкраще, а нулем – найгірше значення  $k$ -ї цільової функції на множині ефективних планів (табл. 3).

*Етап 2.* Визначення вагових коефіцієнтів для критеріїв, які формують загальну функцію цінності  $SF_{\Sigma}$  сценарію:

$$\alpha_i = \left| \frac{1}{y_i^* - y_i^0} \right|, \quad i = 1, \dots, p. \quad (18)$$

*Результат.* Вагові коефіцієнти критеріїв оцінки варіантів комплектації БДК:

$$\alpha = \begin{pmatrix} \alpha_{\text{ШВР}} \\ \alpha_{\text{ТВР}} \\ \alpha_{\text{МКН}} \\ \alpha_{\text{СКН}} \\ \alpha_{\text{ПСВ}} \\ \alpha_{\text{ДВ}\gamma} \\ \alpha_{\text{ТВ}\gamma} \\ \alpha_{\text{Ц}} \\ \alpha_{\text{ВО}} \\ \alpha_{\text{ВНП}(i)} \end{pmatrix}, \quad [\alpha] = \begin{pmatrix} \left[ \frac{\text{км}}{\text{год}} \right]^{-1} \\ [\text{год}]^{-1} \\ [\text{кг}]^{-1} \\ [\%]^{-1} \\ [\%]^{-1} \\ [\text{ЗВ}]^{-1} \\ [\%]^{-1} \\ [\text{грн}]^{-1} \\ [\text{грн}]^{-1} \\ [\text{грн}]^{-1} \end{pmatrix}.$$

Таблиця 3 — Формування множини варіантів комплектації БДК

Критерії варіантів комплектації БДК	Одиниця вимірювання	Множина варіантів комплектації БДК (ефективних планів)					Найкращі та найгірші значення	
		$x_1$	..	$x_i$	..	$x_p$	$y_i^*$	$y_i^0$
Швидкість ведення розвідки	км/год	$\text{Ш}_{\text{ВР}(1)}$		$\text{Ш}_{\text{ВР}(i)}$		$\text{Ш}_{\text{ВР}(p)}$	$\text{Ш}_{\text{ВР}}^*$	$\text{Ш}_{\text{ВР}}^0$
Тривалість ведення розвідки	год	$\text{T}_{\text{ВР}(1)}$		$\text{T}_{\text{ВР}(i)}$		$\text{T}_{\text{ВР}(p)}$	$\text{T}_{\text{ВР}}^*$	$\text{T}_{\text{ВР}}^0$
Маса корисного навантаження	кг	$\text{М}_{\text{КН}(1)}$		$\text{М}_{\text{КН}(i)}$		$\text{М}_{\text{КН}(p)}$	$\text{М}_{\text{КН}}^*$	$\text{М}_{\text{КН}}^0$
Склад корисного навантаження	%	$\text{С}_{\text{КН}(1)}$		$\text{С}_{\text{КН}(i)}$		$\text{С}_{\text{КН}(p)}$	$\text{С}_{\text{КН}}^*$	$\text{С}_{\text{КН}}^0$
Повнота спеціальних вимірювань (радіометричні, спектральні, можливість виявлення нейтронів тощо)	%	$\text{П}_{\text{СВ}(1)}$		$\text{П}_{\text{СВ}(i)}$		$\text{П}_{\text{СВ}(p)}$	$\text{П}_{\text{СВ}}^*$	$\text{П}_{\text{СВ}}^0$

Продовж. табл. 3

Діапазон вимірювань ПАЕД по $\gamma$ -випромінюванню	$Зв$	$D_{\gamma(1)}$		$D_{\gamma(i)}$		$D_{\gamma(p)}$	$D^*_{\gamma}$	$D^0_{\gamma}$
Точність вимірювань ПАЕД по $\gamma$ -випромінюванню	$\%$	$T_{\gamma(1)}$		$T_{\gamma(i)}$		$T_{\gamma(p)}$	$T^*_{\gamma}$	$T^0_{\gamma}$
Ціна	$грн$	$\Pi_{(1)}$		$\Pi_{(i)}$		$\Pi_{(p)}$	$\Pi^*$	$\Pi^0$
Витрати на обслуговування	$грн$	$BO_{(1)}$		$BO_{(i)}$		$BO_{(p)}$	$BO^*$	$BO^0$
Витрати на навчання пілотів	$грн$	$B_{HP(1)}$		$B_{HP(i)}$		$B_{HP(p)}$	$B^*_{HP}$	$B^0_{HP}$

Етап 3. Визначення узагальнених адитивних функцій цінностей варіантів комплектації БДК  $SF_{\Sigma}$  для всієї множини допустимих планів  $X$ :

$$EF_{\Sigma(i)} = \sum_{i=1}^p \alpha_i f_i(x). \quad (19)$$

Результати розрахунків представляються у табл. 4.

Таблиця 4 — Визначення адитивних функцій цінностей варіантів комплектації БДК

$\alpha_i$ — критерії варіантів комплектації БДК	Множина варіантів комплектації БДК (ефективних планів)				
	$x_1$	...	$x_i$	...	$x_p$
$\alpha_{ШВР} \cdot ШВР$	$\alpha_{ШВР} \cdot ШВР(1)$	...	$\alpha_{ШВР} \cdot ШВР(i)$	...	$\alpha_{ШВР} \cdot ШВР(p)$
$\alpha_{ТВР} \cdot ТВР$	$\alpha_{ТВР} \cdot ТВР(1)$	...	$\alpha_{ТВР} \cdot ТВР(i)$	...	$\alpha_{ТВР} \cdot ТВР(p)$
$\alpha_{МКН} \cdot МКН$	$\alpha_{МКН} \cdot МКН(1)$	...	$\alpha_{МКН} \cdot МКН(i)$	...	$\alpha_{МКН} \cdot МКН(p)$
$\alpha_{СКН} \cdot СКН$	$\alpha_{СКН} \cdot СКН(1)$	...	$\alpha_{СКН} \cdot СКН(i)$	...	$\alpha_{СКН} \cdot СКН(p)$
$\alpha_{ПСВ} \cdot ПСВ$	$\alpha_{ПСВ} \cdot ПСВ(1)$	...	$\alpha_{ПСВ} \cdot ПСВ(i)$	...	$\alpha_{ПСВ} \cdot ПСВ(p)$
$\alpha_{ДВ\gamma} \cdot ДВ\gamma$	$\alpha_{ДВ\gamma} \cdot ДВ\gamma(1)$	...	$\alpha_{ДВ\gamma} \cdot ДВ\gamma(i)$	...	$\alpha_{ДВ\gamma} \cdot ДВ\gamma(p)$
$\alpha_{ДВ\gamma} \cdot ТВ\gamma$	$\alpha_{ДВ\gamma} \cdot ТВ\gamma(1)$	...	$\alpha_{ДВ\gamma} \cdot ТВ\gamma(i)$	...	$\alpha_{ДВ\gamma} \cdot ТВ\gamma(p)$
$\alpha_{\Pi} \cdot \Pi$	$\alpha_{\Pi} \cdot \Pi(1)$	...	$\alpha_{\Pi} \cdot \Pi(i)$	...	$\alpha_{\Pi} \cdot \Pi(p)$
$\alpha_{BO} \cdot BO$	$\alpha_{BO} \cdot BO(1)$	...	$\alpha_{BO} \cdot BO(i)$	...	$\alpha_{BO} \cdot BO(p)$
$\alpha_{BO} \cdot B_{HP}$	$\alpha_{BO} \cdot B_{HP(1)}$	...	$\alpha_{BO} \cdot B_{HP(i)}$	...	$\alpha_{BO} \cdot B_{HP(p)}$
Адитивна функція цінностей варіантів комплектації БДК $SF_{\Sigma}$	$EF_{\Sigma(1)}$	...	$EF_{\Sigma(i)}$	...	$EF_{\Sigma(p)}$

Для більш детального оцінювання варіантів комплектації БДК у методиці запропоновано визначення узагальнених адитивних функцій цінностей варіантів комплектації БДК  $EF_{\Sigma}$  для всієї множини допустимих планів  $X$  проводити із врахуванням ваг факторів та критеріїв, визначених на основі колективних експертних оцінок (групового експертного оцінювання) за формулою

$$EF_{\Sigma(i)} = \sum_{i=1}^p \alpha_i f_i(x) \omega_i. \quad (19.1)$$

У результаті кожен варіант комплектації БДК описується однозначно безрозмірною величиною функції цінностей  $EF_{\Sigma}$ ; можливе проведення ранжування варіантів комплектації БДК за критерієм їх функції цінності.



*Етап 4.* На множині варіантів комплектації БДК визначається такий, який відповідає максимуму/мінімуму узагальненої адитивної функції цінності в залежності від оптимізаційної спрямованості критеріїв:  $x^{(1)} \equiv \max(EF_{\Sigma}(i)), i = \overline{1, p}$  при оптимізаційній спрямованості критеріїв до максимуму або  $x^{(1)} \equiv \min(EF_{\Sigma}(i)), i = \overline{1, p}$  при оптимізаційній спрямованості критеріїв до мінімуму.

Цей варіант є ефективним. Його оцінка  $y^{(1)} = f(x^{(1)})$  разом із параметричними значеннями критеріїв передається особі, що приймає рішення.

*Етап 5.* Якщо ОПР погоджується обрати варіант комплектації БДК  $x^{(1)}$  за розв'язок багатокритеріальної задачі, вказаний варіант комплектації БДК пропонується до реалізації.

Якщо ОПР не погоджується із параметрами критеріїв для визначеного сценарію  $x^{(1)}$ , то повинна по кожному критерію вказати такі припустимі рівні  $\psi_i$ , які вона вважає прийнятними.

*Примітка.* ОПР повинна дотримуватись вимоги  $\psi_i \neq y_i^*$  для всіх  $i = 1, \dots, p$ . Якщо ОПР деякі із критеріїв  $i \in 1, \dots, p$  залишає поза увагою, то для них покладають  $\psi_i = y_i^0$ .

Результатом є вибір найкращого сценарію (у випадку, коли ОПР погоджується з параметрами критеріїв), то процес завершений; або формування припустимих рівнів  $\psi_i \in [y_i^0; y_i^*], i = 1, \dots, p$  для критеріїв (коли не погоджується), то перехід до наступного етапу.

*Етап 6.* Визначення реальності рівнів критеріальних показників, які ОПР визначила як припустимі на попередньому етапі, то здійснюється їх корекція або в бік покращення, якщо вони є реальними, або в бік послаблення, щоб зробити реальними. Для цього розв'язують однокритеріальну задачу відносно параметра  $t$ :

$$\begin{cases} t \rightarrow \max, \\ f(x) - \psi_i \geq t, i = 1, \dots, p, \\ y_i^* - \psi_i \\ x \in X. \end{cases} \quad (20)$$

*Примітка.* Для цільових функцій, спрямованих до максимуму, виконується нерівність  $y_i^* > \psi_i$ , тому критеріальне обмеження набуває вигляду

$$f_i(x) \geq \psi_i + t(y_i^* - \psi_i). \quad (20.1)$$

Для спрямованих до мінімуму цільових функцій критеріальне обмеження є дещо іншим:

$$f_i(x) \leq \psi_i - t(\psi_i - y_i^*). \quad (20.2)$$

Випадок  $t \geq 0$  свідчить про реальність припустимих рівнів, а випадок  $t < 0$  — про їх нереальність.

Для реальних припустимих рівнів  $\psi_k^*$  проводиться оцінка величини функції цінностей  $EF_{\Sigma}$ . Для нереальних припустимих рівнів проводиться корегування критеріальних показників та повторне визначення їх реальності.

*Етап 7.* На множині варіантів комплектації БДК (допустимих планів) знаходять такий ефективний план  $x^{(2)}$ , який за величиною функції цінностей максимально наближений до реальних припустимих рівнів усіх критеріальних показників, вказаних ОПР. План  $x^{(2)}$  рекомендується до затвердження як розв'язок багатокритеріальної задачі. Уся ця інформація надсилається ОПР.

*Етап 8.* Якщо ОПР не погоджується з рекомендацією обрати ефективний план  $x^{(2)}$  за розв'язок багатокритеріальної задачі вибору найкращого сценарію, то вона повинна здійснити корекцію первинних припустимих рівнів цільової функції  $\psi_i$ . Для забезпечення збіжності методу нові рівні  $\psi_i^{(1)}$ ,  $i = 1, \dots, p$  повинні бути слабшими від попередніх. При цьому або робимо висновок про завершення процесу, або повертаємося до етапу 5, маючи на увазі нові значення припустимих рівнів цільових функцій  $\psi_k^{(1)} \in [y_k^0; \psi_k)$ ,  $k = 1, \dots, p$ .

Запропонований алгоритм може бути використаний:

1) для всього комплексу критеріїв — узагальнена функція цінностей варіантів комплектації БДК;

2) для визначених груп факторів  $\Phi_1$ - $\Phi_3$  — функція цінностей для груп;

3) для критеріїв у межах обраної групи — частинні (відокремлені) функції цінностей.

У першому випадку узагальнена функція цінностей дає змогу визначити оптимальний варіант комплектації БДК за показником його ефективності одночасно за всіма критеріальними ознаками з урахуванням їх ваг, визначених на першому етапі дослідження експертним методом. При цьому ОПР у прийнятті рішень спирається на узагальнену оцінку всіх критеріїв.

У другому випадку функція цінностей для груп дає змогу визначити цінності варіантів комплектації БДК за укрупненими характеристиками: технічними, технологічними, економічними та іншими факторами. За результатами факторної оцінки варіантів комплектації БДК ОПР має змогу приймати рішення щодо варіантів комплектації БДК із урахуванням їх технічної, технологічної, фінансово-економічної тощо складової.

У третьому випадку частинні функції цінностей дають змогу більш деталізовано в межах окремих груп факторів визначити найкращі варіанти комплектації БДК за їх критеріями, визначеними для конкретної групи. При цьому ОПР, згідно із власними перевагами, визначеними у випадку 2, може формулювати рішення, спираючись на конкретні критерії в межах кожної із груп.

Таким чином, прийняття рішень про вибір варіантів комплектації БДК, їх ранжування може бути проведено на трьох рівнях узагальнення. Реалізація запропонованої методики дасть змогу:

1) на основі використання експертних методів провести комплексну якісну оцінку варіантів комплектації БДК;

2) на основі методики БКО провести деталізацію параметрів ранжованих за цінністю варіантів комплектації БДК та врахувати побажання ОПР щодо їх характеристик;

3) на основі побудови математичних моделей проводити управління процесом реалізації варіантів комплектації БДК.

## 7. Висновки

Запропоновано методику вибору раціонального складу засобу дистанційної радіаційної розвідки на базі безпілотного літального апарата з використанням методів експертного оцінювання та комплексного використання модифікованих методів багатокритеріальної оптимізації і аналізу ієрархій. Комбінація цих методів дозволяє більш обґрунтовано визначити вагові коефіцієнти окремих критеріїв та груп критеріїв різної природи для їх узагальнення в комплексні (інтегральні) показники для порівняльної оцінки окремих варіантів комплектації БДК.

Безпілотний апарат радіаційної розвідки повинен мати блокову конструкцію, а його спеціальне навантаження має комплектуватися під конкретні задачі, які будуть визначатися радіаційною обстановкою.

Для більш коректного рішення задачі структурно-параметричного синтезу системи дистанційної радіаційної розвідки на базі БПЛА необхідно більш чітко окреслити коло умов,

в яких планується експлуатація таких систем. Ці умови можуть бути сформовані у відповідних оперативно-тактичних вимогах до таких виробів, які має розробити замовник відповідної продукції.

## СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Ткачук П.П., Мосов С.П., Красюк А.П. та ін. Тенденції розвитку форм і способів збройної боротьби в сучасних локальних війнах і збройних конфліктах: монографія / за ред. к.і.н. Г.П. Воробйова. Львів: НАСВ, 2015. 90 с.
2. Саковський А.А., Науменко С.М., Кравченко С.І., Єфіменко І.М. та ін. Особливості застосування безпілотних літальних апаратів органами та підрозділами поліції: метод. рекомендації. Київ: Нац. акад. внутр. справ, 2022. 72 с.
3. Зіатдінов Ю.К., Куклінський М.В., Мосов С.П., Фещенко А.Л. та ін. Застосування безпілотних літальних апаратів у воєнних конфліктах сучасності / за ред. С.П. Мосова. К.: Києво-Могилянська академія, 2013. 248 с.
4. Мосов С.П., Колесніков В.О. Вимоги до вибору безпілотних авіаційних комплексів для виконання завдань розвідки та спостереження. *Зб. наук. праць центру воєнно-стратегічних досліджень НУОУ імені Івана Черняхівського*. К.: ЦВСД НУОУ імені Івана Черняхівського, 2016. № 1 (56). С. 24–28.
5. Єфремов О.В., Коршець О.А. Методика вибору раціонального типу і варіанта обладнання безпілотних літальних апаратів для виконання завдань. *Системи управління, навігації та зв'язку*, 2018. Вип. 5 (51). С. 3–7. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2018.5.003>.
6. Pavlenko P., Samborskyi Ye., Krykhovetskyi H., Samborskyi I. Control model of a group of maneuverable unmanned aerial vehicles taking into account their flight safety. *Control, Navigation and Communication Systems*. 2023. N 3 (73). P. 58–63. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.3.058>.
7. Тютюник В.В., Калугін В.Д., Черногор Л.Ф., Шевченко Р.І. Розробка науково-технічних основ системи моніторингу зони надзвичайної ситуації, яка включає доставку автоматизованих пристроїв контролю повітряними безпілотними засобами. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних сил України*. Харків: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 2014. № 3 (16). С. 41–44.
8. Мельник В., Бліндер Ю., Мендель В. Математичний формалізм трансформації радіоекологічного стану території з застосуванням матриць Маркова і РЕМ-мікроскопії. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*. 2014. Vol. II (4), Issue 32. С. 75–79.
9. Триснюк В.М., Нагорний Є.І., Триснюк Т.В., Конецька О.О., Курило А.В. Методика виявлення радіаційного забруднення місцевості та його ризиків. *Control, Navigation and Communication Systems*. 2022. N 3. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.3.112>.
10. Bednář D., Otáhal P., Němeček L., Geršlová E. The analytical approach of Drone use in radiation monitoring. *Radioprotection*. 2021. N 56 (1). P. 61–67.
11. URL: <https://www.sckcen.be/en/news/drones-carry-out-high-precision-radiation-monitoring>.
12. URL: <https://world-nuclear-news.org/Articles/Radiation-detection-drones-tested-at-Belgian-site>.
13. Скітер І. Системний підхід до формування методики порівняльного аналізу варіантів сценаріїв перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему. *Ядерна безпека та довкілля*. 2023. № 2 (27). С. 67–76.
14. Циганок В.В. Агрегація групових експертних оцінок, що отримані у різних шкалах. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*. К.: ППІ НАН України, 2011. Т. 13, № 4. С. 74–83.
15. Saaty T.L. *Mathematical Principles of Decision Making (Principia Mathematica Decernendi)*. Pittsburgh: RWS, 2009. «Comprehensive coverage of the AHP, its successor the ANP, and further developments of their underlying concepts».
16. Ehrgott M. *Multicriteria Optimization*. 2nd ed. Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag, 2005. 328 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/3-540-27659-9>.

Стаття надійшла до редакції 17.05.2024