

УДК 519.816, 623.735

О.Б. Леонтьєв, Д.А. Гриб, Є.О. Українець, О.М. Компанієць

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## ВИЗНАЧЕННЯ ВАГОВОГО ВНЕСКУ ОСНОВНИХ ГРУП ВЛАСТИВОСТЕЙ УДАРНОГО АВІАЦІЙНОГО КОМПЛЕКСУ В УЗАГАЛЬНЕНИЙ ПОКАЗНИК БОЙОВОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ШЛЯХОМ ЕКСПЕРТНОГО ОЦІНЮВАННЯ

*Статтю присвячено застосуванню експертно-аналітичних процедур для оцінювання внеску основних груп властивостей ударного авіаційного комплексу в узагальнений показник бойової ефективності та визначенню моделі для оцінки узагальненого показника. Застосування експертно-аналітичних процедур для оцінювання внеску основних груп властивостей ударного авіаційного комплексу в узагальнений показник бойової ефективності із використанням елементів методів «снігового кому» і методу аналізу ієрархій дає можливість з заданим рівнем точності використати суб'єктивні судження експертів та визначити локальні вектори пріоритетів. Узгодженість розробленої моделі за відповідними критеріями дає можливість визначити загальний вигляд математичної моделі для оцінки узагальненого показника бойової ефективності у вигляді адитивної лінійної форми.*

**Ключові слова:** узагальнений показник бойової ефективності, коефіцієнт бойового потенціалу, ударний авіаційний комплекс, метод аналізу ієрархій, експертна оцінка, факторний аналіз, математична модель, тактико-технічні характеристики.

### Вступ

**Постановка задачі.** Одним із способів кількісного оцінювання нових та модернізованих зразків бойової авіаційної техніки є застосування узагальненого показника бойової ефективності (УПБЕ) або його похідної – коефіцієнта бойового потенціалу [1, 2]. Для виконання завдань по знищенню наземних (надводних) цілей застосовуються ударні авіаційні комплекси (УАК), основною складовою яких є літальні апарати (ЛА), що призначені виконувати ударні задачі. З аналізу впливу основних тактико-технічних характеристик ударного ЛА на бойовий потенціал відомо, що для побудови більш повної моделі оцінювання бойового потенціалу УАК необхідно про-

вести розрахунок внесків основних груп бойових властивостей, які впливають на виконання поставленої бойової задачі в узагальнений показник бойової ефективності. Слід зазначити, що дана задача представляється проблемною, оскільки не може бути повністю формалізована, тому виникають труднощі з вибором адекватного математичного методу її рішення. Для даного кола задач зі слабкою структурізацією застосовують методи експертних оцінок. Експертні оцінки відображають індивідуальні судження фахівців відносно характеристик і перспектив розвитку об'єкта, і ґрунтовані на використанні професійного досвіду і фундаментальних знань, сукупність яких можна назвати інтуїцією [3].

**Метою даної статті** є застосування експертно-аналітичних процедур для оцінювання внеску основних груп властивостей ударного авіаційного комплексу в узагальнений показник бойової ефективності та визначення моделі для оцінки узагальненого показника.

### Основний матеріал

В залежності від об'єму та якості вхідної інформації для її обробки існує багато методів експертного оцінювання [4], однак для випадку, коли об'єм інформації великий, найбільш доцільно застосувати методи групового експертного оцінювання. Для визначення вагових внесків кожної з груп визначених в [2], пропонується застосувати метод аналізу ієрархій (MAI) [5, 6]. MAI являє собою системну процедуру для ієрархічного представлення елементів, суть якого складається в декомпозиції задачі на більш прості складові частини з подальшою обробкою послідовності суджень особи, яка приймає рішення по парним порівнянням, які виражаються чисельно. MAI достатньо добре зарекомендував себе при вирішенні слабоструктурованих задач, відрізняється простотою і дає добру відповідність інтуїтивним представленням рішення проблеми [7, 8].

Принцип, що покладено в основу MAI, зумов-

лює послідовну декомпозицію множин цілей з ростом ступеня деталізації до нижчих рівнів. Побудова ієрархії добре погоджується з принципами системного підходу до аналізу задачі і може дати суттєву допомогу в процесі формування та формалізування пріоритетів особи, що приймає рішення. Одним із головних переваг MAI є те, що вагові коефіцієнти часткових критеріїв назначаються не прямим вольовим методом, а на основі метода попарного порівняння. Другою перевагою є структурування проблеми у вигляді складових компонент. У методиці передбачені засоби оцінки ступеня узгодженості суджень, проведення аналізу чуттєвості альтернатив, використання відносно простого математичного апарату, участь різних фахівців або груп, що спеціалізуються на даному напрямі. Перевагою MAI є також те, що схема використання методу не залежить від сфери діяльності, в котрій приймається рішення. До недоліків цього методу можна віднести труднощі оцінки відношень складних елементів. Проте вказані недоліки методу не оказують значного впливу на вирішення конкретної задачі по визначенню вагових коефіцієнтів груп властивостей УАК.

Для вирішення поставленої задачі умовно представимо експертно-аналітичну процедуру у вигляді структурно-логічної схеми визначених етапів (рис. 1).



Рис. 1. Процедура визначення вагового внеску основних груп властивостей в узагальнений показник бойової ефективності ( $K_{БП}$  – коефіцієнт бойового потенціалу;  $w_1 \dots w_n$  ваговий коефіцієнт кожної з виділених груп властивостей;  $X_1 \dots X_n$  – виділені групи властивостей;  $\lambda_{\max}$  – максимальне власне значення матриці бінарних порівнянь;  $n$  – порядок матриці)

Експертна група підібрана у декілька етапів. При формуванні експертної робочої групи для визначення вагових коефіцієнтів бойових властивостей з метою виявлення і підключення до роботи осіб, що мають достатній рівень знань в даному питанні і здатних найбільш ефективно оцінити основні властивості УАК використано елементи методу «снігового кому (snowball sampling)» [9, 10]. В той же час враховано той факт, що робоча група експертів не повинна бути занадто великою по чисельності, інакше буде достатньо складно досягти узгодженості оцінок. У відповідності до методу «снігового кому» послідовність дій полягає у наступних етапах:

– формування генеральної групи експертів на

основі об'єктивних показників професійної компетентності (посада, вчене звання, наукова ступінь, публікації за даним напрямком, стаж роботи, класність);

– кожного з включених до складу робочої групи фахівців просять назвати 3 - 10 найбільш компетентних, по їх судженню, осіб, яких було б корисно включити до складу робочої групи;

– формування списку потенційних експертів за фаховою спрямованістю.

Отриману сітку експертів можна вважати генеральною сукупністю фахівців, що компетентні в області вивчаємої проблеми, мають достатню компетентність в галузі предмета експертизи. Використовуючи вище зазначений підхід, була сформована

група у кількості 26 експертів з числа професорсько-викладацького та льотного складу Харківського університету Повітряних Сил (ХУ ПС), науковців Наукового центру Харківського університету Повітряних Сил (НЦ ХУ ПС), науковців та льотно-випробувального складу Державного Науково-випробувального центру Збройних Сил України (ДНВЦ ЗСУ). Після підбору експертів сформульована та розроблена анкета для опитування з метою визначення робочої групи експертів. Шляхом опитування за методикою, яка представлена [11, 12], визначається робоча група, яка буде приймати участь у експертизі. До складу робочої групи відібрані 8 фахівців з числа професорсько-викладацького складу ХУ ПС та науковців НЦ ХУ ПС і 4 фахівці льотно-випробувального складу ДНВЦ ЗСУ.

Для рішення задачі оцінювання внесків в узагальнений показник бойової ефективності відокремлюємо наступні етапи: побудова ієрархії, формування матриць попарного порівняння (МПП), обчислення єдиного групового судження, отримання вектору пріоритету, оцінка степені погодженості МПП.

1. Етап побудови ієрархії полягає у представленні структури складного об'єкта (узагальненого показника бойової ефективності Кбп) в вигляді ієрархічної моделі, що дозволяє структурувати всю маючу інформацію у графічному вигляді, а також поділити їх на складові частини та аналізувати їх по окремоті. Ієрархія, у даному випадку, це деяка абстракція структури системи, що направлена на дослідження функціональних зв'язків її компонент та їх взаємодій на систему в цілому.

2. Порівняння елементів ієрархії здійснюється методом попарного порівняння [13], сутність якого полягає в тому, що шляхом порівняння в загальному випадку кожного об'єкта зі всіма іншими з даної множини визначаються елементи матриці  $A$  розмірності  $n \times n$ , де елемент  $a_{ij}$  є відповідне дійсне число, що визначає результат порівняння об'єкта  $i$  з об'єктом  $j$  відносно деякого їх загального критерію:

$$A = (a_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1j} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{i1} & a_{i2} & \dots & a_{ij} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Результати порівняння об'єктів за якісними критеріями виражають в так званій фундаментальній шкалі відношень.

Достовірність цій шкалі доказана теоретично в роботі [5] при порівнянні з іншими шкалами. МПП повинна мати наступні властивості:

– всі елементи матриці  $A$  додатні  $a_{ij} > 0$  для усіх  $i, j = 1 \dots n$ ;

– матриці  $A$  є обернено симетрична:  $a_{ij} = 1/a_{ji}$  для усіх  $i, j = 1 \dots n$ ;

– діагональні елементи  $a_{ij}$  повинні дорівнювати одиниці, оскільки вони виражають оцінку критерію відносно самих себе;

– матриця  $A$  володіє властивістю сумісності, виконуватися наступна умова  $a_{ij} = a_{ik} \cdot a_{kj}$ , для усіх  $i, j, k$ , тоді матриця є узгодженою;

– число  $n$  є максимальним власним значенням матриці  $A$ .

Тоді матриця (1) має вигляд:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1j} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/a_{i1} & 1/a_{i2} & \dots & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

У результаті отримуємо МПП критеріїв одного рівня ієрархії між собою. Кожен  $q$ -й експерт,  $q = \overline{1, l}$ , проводить порівняльну оцінку вказаних груп властивостей, що впливають на виконання бойового завдання. Експертами попарно порівнюється між собою основні групи характеристик, які впливають на бойові властивості ударного авіаційного комплексу при виконанні типової задачі в різних умовах застосування. Розглядаються наступні властивості літального апарату [2], які вважаються взаємозалежними:

X1 – Льотно-технічні характеристики;

X2 – Маневреність;

X3 – Бойова живучість;

X4 – Вогнева потужність;

X5 – Помітність.

3. Для підвищення ступеня об'єктивності доцільно урахувувати думку групи експертів [13, 14]. Для знаходження єдиного групового судження обчислюється середньо геометрична оцінка учасників опитування:

$$g_{ij}^A = a_{ij}^1 a_{ij}^2 \dots a_{ij}^l \frac{1}{l}, \quad (3)$$

де  $g_{ij}^A$  – агрегована групова оцінка, що належить  $i$ -му рядку та  $j$ -му стовпчику МПП;  $l$  – кількість МПП, кожна з котрих складена одним експертом.

4. Розглянемо принцип отримання вектору пріоритетів, основною властивістю якого є:

$$\sum_{i=1}^5 w_i = 1, \quad w_i > 0, \quad i=1,5 \quad (4)$$

де  $w_i$  –  $i$ -й локальний вектор пріоритету, (додаток компонент вектору дорівнює 1).

МПП представляє собою квадратну матрицю  $n \times n$ , яка отримана при участі  $l$  експертів. Обробка результатів всіх матриць проходить по одному алгоритму, з урахуванням порядку матриці.

Обчислимо оцінки компонент власного вектору по рядках для матриці розміром  $5 \times 5$ :

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} \end{pmatrix} \rightarrow \begin{cases} \sqrt[5]{a_{11} \times a_{12} \times a_{13} \times a_{14} \times a_{15}} = v_1 \\ \sqrt[5]{a_{21} \times a_{22} \times a_{23} \times a_{24} \times a_{25}} = v_2 \\ \sqrt[5]{a_{31} \times a_{32} \times a_{33} \times a_{34} \times a_{35}} = v_3 \\ \sqrt[5]{a_{41} \times a_{42} \times a_{43} \times a_{44} \times a_{45}} = v_4 \\ \sqrt[5]{a_{51} \times a_{52} \times a_{53} \times a_{54} \times a_{55}} = v_5 \end{cases} \quad (5)$$

Тепер необхідно скласти суму елементів  $v_1, v_2, v_3, v_4, v_5$  і нормалізувати їх, використовуючи

$$\text{суму елементів} \left( \sum_{i=1}^5 v_i \right).$$

Отримаємо вектори пріоритету:

$$\frac{v_1}{\sum} = w_1, \frac{v_2}{\sum} = w_2, \frac{v_3}{\sum} = w_3, \frac{v_4}{\sum} = w_4, \frac{v_5}{\sum} = w_5. \quad (6)$$

5. На кожному етапі роботи з МПП необхідно проводити оцінку узгодженості. Для оцінки узгодженості суджень дослідника необхідно використовувати відхилення величини максимального власного значення  $\lambda_{\max}$  від порядку МПП  $n$ . При цьому повинна виконуватися умова  $\lambda_{\max} > n$ . Значення  $\lambda_{\max}$  можна обчислити наближеним методом [14]. Для цього спочатку додається кожний стовпчик МПП, після чого доданок першого стовпчика помножується на першу компоненту вектора пріоритету, доданок другого – на другу компоненту і тощо. Значення  $\lambda_{\max}$  буде дорівнювати додатку отриманих чисел:

$$\lambda_{\max} \approx \sum_{j=1}^n (w_j \sum_{i=1}^n a_{ij}). \quad (7)$$

Узгодженість суджень оцінюється індексом погодженості (consistency index – CI) або відношенням погодженості (consistency ratio – CR) у відповідності з наступними виразом:

$$CI = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{n - 1}, \quad (8) \quad CR = \frac{CI}{M(CI)}, \quad (9)$$

де  $M(CI)$  – математичне сподівання CI випадковим шляхом складеної МПП у шкалі, значення якого представлено в [5].

Припустимими вважаються значення  $CR \leq 0,10$ , в деяких випадках  $CR \leq 0,20$ . Якщо для МПП відношення погодженості  $CR > 0,20$ , то це свідчить про суттєві порушення логічності суджень, припущені експертом при заповненні матриці, тоді експерту пропонується переглянути данні.

Проведення оцінки вагового внеску основних груп властивостей УАК в УПБЕ за описаною методикою зводиться до наступних процедур вирішення практичної задачі.

Кожен  $q$ -й експерт,  $q = \overline{1, l}$ , проводить порівняльну оцінку запропонованих основних груп властивостей [2], що описують бойовий потенціал УАК, та виставляє пріоритети за визначеним методом.

При участі  $l$  експертів отримано  $l$  – матриць  $5 \times 5$ , та обчислено груповий результат опиту в вигляді матриць попарних порівнянь. Заповнення матриць попарних порівнянь здійснювалось у відповідності з суб'єктивними судженнями експертів. Шкала, яка використовується, є достатньо ефективною в порівнянні з багатьма іншими [7]. Визначення єдиного групового судження, як результат усереднення отримання експертів представлені в матриці попарних порівнянь табл. 1.

Таблиця 1

Результати опитування експертів

Загальні характеристики системи	ЛТХ	Маневреність	Бойова живучість	Вогнева потужність	Помітність
ЛТХ	1	3	1/4	1/6	5
Маневреність	1/3	1	2	1/5	3
Бойова живучість	4	1/2	1	1/5	3
Комплекс озброєння	6	5	5	1	6
Помітність	1/5	1/3	1/3	1/6	1

Порівнянні попарно елементи – це локальні пріоритети однієї групи властивостей над іншою. Власні вектори пріоритетів

- X1 – Льотно-технічні характеристики ..  $w_1 = 0,13$  ;
- X2 – Маневреність .....  $w_2 = 0,12$  ;
- X3 – Бойова живучість .....  $w_3 = 0,15$  ;
- X4 – Вогнева потужність .....  $w_4 = 0,56$  ;
- X5 – Помітність .....  $w_5 = 0,04$  .

Оцінка узгодженості суджень проводилася за визначеними критеріями, максимального власного значення  $\lambda_{\max} = 5,7$  та відношенням погодженості  $CR=16\%$ . Данні значення критеріїв оцінки узгодженості МПП свідчать про логічність суджень, тобто визначені групи властивостей мають місце для оцінки коефіцієнту бойового потенціалу. Відповідні вектори пріоритетів можна використовувати як ваговий внесок кожної з груп властивостей у відповідний бойовий потенціал, тому загальний вигляд виразу отримання можна записати у наступній формі:

$$K_{\text{бп}i}^* = w_i K_{\text{бп}}, \quad (10)$$

де  $K_{\text{бп}i}^*$  – виділена частина оцінки  $K_{\text{бп}}$  ЛА, що обумовлена внеском  $i$ -ї властивості;

$w_i$  – ваговий внесок  $i$ -ї групи властивостей при

$$\text{виконанні необхідної умови} \sum_{i=1}^5 w_i = 1.$$

## Висновок

Таким чином, застосування експертно-аналітичних процедур для оцінювання внеску основних груп властивостей УАК в узагальнений показник бойової ефективності із застосуванням елементів методів «снігового кому» та МАІ дає можливість з заданим рівнем точності використати суб'єктивні судження експертів та визначити локальні вектори пріоритетів. Це, в свою чергу, дозволяє визначити практичні напрямки модернізації бойової авіаційної техніки. Узгодженість розробленої моделі за відповідними критеріями дає можливість визначити загальний вигляд математичної моделі для оцінки УПБС УАК у вигляді адитивної лінійної форми.

## Список літератури

1. Леонтьев О.Б. Побудова математичної моделі показників бойової ефективності вертольоту армійської авіації при вирішенні ним десантних задач / О.Б. Леонтьев, Ю.І. Миргород, М.М. Момот // 36. наук. пр. ОНДІ ЗС. – Х.: ОНДІ ЗС, 2007. – Вип. 1(6). – С. 14-21.
2. Леонтьев О.Б. Методика оцінки бойового потенціалу ударних авіаційних комплексів при вирішенні ним вогневих задач / О.Б. Леонтьев, О.М. Компанієць, В.В. Шамаков // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУ ПС, 2008. – Вип. 2(17). – С. 20-23.
3. Анишко О.Б. Концептуальное проектирование объектов бронетанковой техники: монография / О.Б. Анишко, М.Д. Боисюк, Ю.М. Бусяк. – Х.: НТУ «ХПИ», 2008. – 196 с.
4. Серая О.В. Оценка эффективности сложных систем с использованием модифицируемого метода попарных сравнений / О.В. Серая, Е.А. Макогон // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУ ПС, 2007. – Вип. 3(15). – С. 112-115.
5. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Томас Саати. – М.: Радио и связь, 1993. – 314 с.

6. Саати Т. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети / Т. Саати. – М.: Изд-во ЛКИ, 2008. – 360 с.

7. Дубровин В.И. Многокритериальная оптимизация технологического процесса с использованием метода анализа иерархий / В.И. Дубровин, Н.А. Миронова, В.А. Конопля // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. – 2005. – №2. – С. 47-53.

8. Короблев Н.М. Согласование и коррекция экспертных оценок в системах поддержки принятия решений в условиях нечеткой исходной информации / Н.М. Короблев, С.Г. Удовенко, Ельзин Фирас // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. – 2005. – №2. – С. 116-120.

9. Воробьев П.А. Технология разработки стандартов: приложение 3. [Электрон. ресурс]. – Режим доступа к ресурсу : [http://www.spruce.ru/sanatori/standard/technology/technology\\_3.html](http://www.spruce.ru/sanatori/standard/technology/technology_3.html).

10. Орлов А.И. Теория принятия решения: уч. пособие [Электронный ресурс] / А.И. Орлов. – М.: Издательство «Март», 2004. – Режим доступа к ресурсу: [http://www.aup.ru/books/m157/3\\_4\\_1.htm](http://www.aup.ru/books/m157/3_4_1.htm).

11. Литвак Б.Г. Экспертная информация: методы получения и анализа / Б.Г. Литвак. – М.: Радио и связь, 1982. – 184 с.

12. Березанський В.Г. Алгоритм вибору типу візирної системи на основі удосконаленого методу аналізу ієрархії / В.Г. Березанський // Вісник науки і техніки. – 2005. – №. 2-3 (21-22). – С. 75-83.

13. Андрейченков А.В. Анализ, синтез, планирование решений в экономике / А.В. Андрейченков, О.Н. Андрейченкова. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 368 с.

14. Арсеньев Ю.Н. Принятие решений. Интегрированные интеллектуальные системы / Ю.Н. Арсеньев, С.И. Шелобаев, Т.Ю. Давыдов. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. – 270с.

Надійшла до редколегії 21.09.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С.А. Калкаманов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## ЭКСПЕРТНАЯ ОЦЕНКА ВЕСОВОГО ВКЛАДА ОСНОВНЫХ ГРУПП СВОЙСТВ УДАРНОГО АВИАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА В ОБОБЩЕННЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ БОЕВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

А.Б. Леонтьев, Д.А. Гриб, Е.А. Украинец, О.Н. Компанієць

Статья посвящена применению экспертно-аналитических процедур для оценивания вклада основных групп свойств ударного авиационного комплекса в обобщенный показатель боевой эффективности и определению модели для оценивания обобщенного показателя. Применение экспертно-аналитических процедур для оценивания вклада основных групп свойств ударного авиационного комплекса в обобщенный показатель боевой эффективности на основании использования элементов методов «снежного кома» и метода анализа иерархии дает возможность с заданным уровнем точности применять субъективные суждения экспертов для определения локальных приоритетов. Согласованность разработанной модели дает возможность определить общий вид математической модели для оценки обобщенного показателя боевой эффективности в виде аддитивной линейной формы.

**Ключевые слова:** обобщенный показатель боевой эффективности, коэффициент боевого потенциала, ударный авиационный комплекс, метод анализа иерархий, экспертная оценка, факторный анализ, математическая модель, тактико-технические характеристики.

## EXPERT ESTIMATION OF THE WEIGHT CONTRIBUTION OF THE BASIC GROUPS OF PROPERTIES OF THE SHOCK AVIATION COMPLEX IN THE GENERALIZED INDICATOR OF FIGHTING EFFICIENCY

O.B. Leontev, D.A. Grib, E.A. Ukrainets, O.N. Kompaniets

Article is devoted to application of expert-analytical procedures for estimation of the contribution of the basic groups of properties of a shock aviation complex to the generalized indicator of fighting efficiency and to definition of model for estimation of the generalized indicator. Application of expert-analytical procedures for estimation of the contribution of the basic groups of properties of a shock aviation complex to the generalized indicator of fighting efficiency on the basis of use of elements of methods «snowball sampling» and a method of the analysis of hierarchy gives the chance to apply with the set level of accuracy subjective judgments of experts to definition of local priorities. The coordination of the developed model gives the chance to define a general view of mathematical model for an estimation of the generalized indicator of fighting efficiency in the form of the additive linear form.

**Keywords:** The generalized indicator of fighting efficiency, factor of fighting potential, shock aviation complex, method of the analysis of hierarchies, expert estimation, the factorial analysis, mathematical model, tactic-technical characteristics.