Ю.І. Шевяков

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

ВИБІР ЛІТАКА ПЕРВИННОЇ ПІДГОТОВКИ ЗА МЕТОДОМ АНАЛІЗУ ІЄРАРХІЙ

Розглянуто і розв'язано задачу вибору літака первинної підготовки із застосуванням методу аналізу ієрархій. Запропоновані у якості критеріїв вибору літака – льотні якості літака (придатність до первинного льотного навчання), безпека, економічні показники (вартість літака, вартість експлуатації та технічного обслуговування) та технічний супровід. У якості приклада розглядаються три легких літака вітчизняного виробництва. Характеристики літаків оцінюються експертами, мірою узгодженості суджень яких є індекс узгодженості. Розраховані середні значення індексу узгодженості для випадкових матриць та отримані локальні пріоритети критеріїв порівняння та глобальні пріоритети літаків ХІАТ-650, АНГ -01 та А-12.

Ключові слова: метод аналізу ієрархій (МАІ), критерій порівняння, локальні та глобальні пріоритети, індекс та відношення узгодженості.

Вступ

Постановка проблеми. Нагальним завданням для укріплення обороноздатності України є навчання льотчиків бойової авіації. Процес отримання практичних навичок пілотування довготривалий та витратний, його розділено принаймні на три етапи: первинне навчання на легких літаках, на навчально-тренувальних літаках і бойових літаках. Відсутність у Збройних Силах України легких літаків спричиняє необхідність кожного року укладати угоди з цивільними авіаційними школами (аероклубами) для здійснення першого етапу підготовки і держава витрачає великі кошти для підготовки військових льотчиків. Крім цього, спостерігається постійне зростання вартості послуг, які надають авіаційні школи (аероклуби), залежність від термінів проведення тендерних процедур на надання зазначених послуг, має негативний вплив на організацію навчального процесу. Наявність легких літаків безпосередньо в університеті надасть можливість забезпечити єдину методику льотної підготовки курсантів у відповідності із Концепцією трьохступеневої підготовки та повним дотриманням вимог нормативних документів з організації та проведення льотної підготовки у Збройних Силах України. Тому задача обґрунтованого вибору легкого літака для першого етапу підготовки військових льотчиків є дуже актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема переозброєння Збройних Сил України, що актуальна саме для авіації Повітряних Сил, з точки зору науково-методичного забезпечення розглядається у площині пошуку раціональних і економічно обґрунтованих шляхів їх оснащення сучасними зразками ОВТ як проведення комплексу наукових дос-

ліджень, щодо обґрунтування завдань і заходів середньострокових програм озброєння. Вирішення цього питання традиційно знаходиться в системі досліджень за критерієм “ефективність-вартість”, але при цьому системна ув'язка із фактором часу критеріїв, що пропонуються, відсутня. У роботах [1–2] розглянуто основні можливі випадки нестачі бойової спроможності тактичної авіації Повітряних Сил Збройних Сил України на початку довгострокового періоду планування розвитку її системи озброєння та пов'язані з ними можливі варіанти обрання стратегій переоснащення авіаційних частин на нову бойову авіаційну техніку для ліквідації наявної нестачі. Названі варіанти стратегій пропонується звести у три основні групи, а саме стратегію сталого розвитку, коли необхідна спроможність досягається наприкінці періоду планування, стратегію постійної ліквідації нестачі спроможності вздовж всього періоду планування, та стратегію швидкої ліквідації нестачі спроможності за мінімально можливий час. Запропоновано формалізовані, із застосуванням методу бойових потенціалів, критерії раціональності програми розвитку системи озброєння тактичної авіації Повітряних Сил Збройних Сил України, за допомогою використання яких, на відміну від відомих методичних підходів, можливо здійснити синтез такої раціональної програми у зворотній постановці математичної задачі оптимізації. Відомо декілька методичних підходів до розв'язування задач порівняльного оцінювання зразків озброєння та військової техніки [3–6]. В роботах [7–8] розглянуті математичні залежності узагальнених показників ступеню придатності навчально-бойового літака до виконання задач навчальної льотної підготовки курсантів від значень його визначаючих тактико-

технічних характеристик. Наявність сукупності кваліметричних моделей дозволяє у відносній шкалі вимірювання обраного за еталон літака кількісно оцінювати придатність конкретного типу навчально-бойового літака до використання в якості навчального засобу в льотній підготовці курсантів. Розроблена методика науково-методичного апарату оцінювання ступеню придатності конкретного типу повітряного судна до вирішення завдань навчальної льотної підготовки, та обґрунтування вибору типу літального апарату з наявних можливих альтернатив. Зміст методу аналізу ієрархій та його використання у різних галузях викладені у роботах [9–13].

Мета статті – є розробка методики вибору літака первинної льотної підготовки із застосуванням методу аналізу ієрархій на основі використання отриманих результатів експертного опитування.

Виклад основного матеріалу

В статті запропонована методика розв'язання задачі вибору літака первинної підготовки за методом аналізу ієрархій.

Метод аналізу ієрархій (MAI) [5], запропонований відомим американським математиком Т. Сааті,

являється систематичною процедурою для ієрархічного представлення елементів, які визначають сутність будь-якої проблеми.

Метод складається в декомпозиції проблеми на більш прості складові частини і у подальшій обробці послідовності суджень особи, що приймає рішення за попарними порівняннями.

В результаті може бути виражена відносна ступінь взаємодії (інтенсивність) елементів в ієрархії. Ці судження виражаються чисельно. MAI включає процедури синтезу множинних суджень, отримання пріоритетів критеріїв і знаходження альтернативних рішень.

MAI складається з трьох етапів [5]:

- етап побудови ієрархічної моделі порівняння елементів задачі;
- етап формування матриці попарних порівнянь елементів для кожного рівня та визначення їх локальних пріоритетів;
- етап визначення глобальних пріоритетів елементів та вибору найкращого варіанту рішення.

Перший крок вирішення задачі вибору літака складається в декомпозиції і представленні задачі в ієрархічній формі (рис. 1).

Рис. 1. Декомпозиція задачі в ієрархію
Джерело: розроблено автором.

На першому (вищому) рівні знаходиться загальна мета – “вибір літака”.

На другому рівні розташовані наступні чотири критерії, які уточнюють мету, а саме:

1. Льотні якості літака (придатність до первинного льотного навчання), K1.
2. Безпека, K2.
3. Економічні показники (вартість літака, вартість експлуатації та технічного обслуговування), K3.
4. Технічний супровід (виробництво, технічна експертиза, відповідність характеристикам), K4.

У якості літаків, щодо відбору, обрані наступні.

На третьому (нижньому) рівні знаходяться три літака, які повинні бути оцінені по відношенню до критеріїв, а саме:

1. Літак ХІАТ-650, Л1
2. Літак ANG - 01, Л2.
3. Літак А-12, Л3.

Літак ХІАТ-650 надлегкий літак, який сертифікований згідно Норм льотної придатності Європейської агенції з авіаційної безпеки EASA. Літак ХІАТ-650 має сертифікат типу ТП № 0011, виданий

Державіаслужбою України. Літак виробляється у чотирьох модифікаціях, основні з яких: ХІАТ 650 Б двомісний одномоторний літак для початкової підготовки і для польоту годин, дальність польоту – 650 км, крейсерська швидкість – 185 км / год; ХІАТ 650 УТ – двомісний одномоторний літак. Використовується для польотів за приладами за курсом - CPL (A) IR. Дальність польоту – 1200 км, крейсерська швидкість – 226 км / год.

Літак ANG-01 5-місний (2 пілота, 3 пасажир, 60 кг багажу) має дуже хороші для свого класу характеристики завдяки сучасним методам проектування (CAD-система CREO®) та управління виробництвом (ERP-система BAS®), а також конструкції повністю з композитних матеріалів: максимальна швидкість 320 км/год, навантаження -2...+4 од.г, швидкопідйомність 6...9 м/с, витрата палива 18...20 л/год. Літак оснащено інжекторним висотним двигуном Rotax®, рятувальною системою, обігрівом та вентиляцією кабіни, сучасною цифровою авіонікою Dупон®, автопілотом, шасі прибираються в польоті. Літак дозволяє виконувати складний пілотаж, у т.ч. звалювання, штопор, “бочка”, “мертва” петля, він доступний та прогнозований по управлінню пілота навіть низької кваліфікації. Розроблено систему для аналізу польотних даних та помилок пілотування.

Навчально-тренувальний літак АС-12 “ANGELA” 2-місний (2 пілота або 1 пілот та 1 пасажир, до 40 кг багажу) цільнометалевий підкісний високоплан. Конструктивним пріоритетом планеру зазначеної конструкції є його міцність та економічність ремонту при жорстких посадках літака, можливість виконання польотів у різних кліматичних та географічних умовах за рахунок швидкої заміни пневматиків на лижі, або помпи. Для комфортного виконання польотів зимою та влітку на літаку встановлена система вентиляції та кондиціонування, забезпечується порівняно з іншими літаками подібного класу стійке та зручне пілотування при слабкій турбулентності повітря на рівні літака Cessna-172.

Максимальна швидкість 200 км/год, навантаження -3...+6 г, швидкість набору висоти 7 м/с, середня витрата палива 20 л/год. Літак оснащено подвійною системою управління для навчання пілотів. Варіант авіоніки обирається та встановлюється за рішенням замовника. Літак дозволяє виконувати складний пілотаж, відпрацювання дій на різних етапах розвитку штопору.

В МАІ елементи задачі зрівнюються попарно по відношенню їх дії (“ваги” або “інтенсивності”) на вище розташований (по рівню) елемент ієрархії з метою визначення локальних пріоритетів елементів.

Для проведення попарних порівнянь застосовується шкала відносної важливості (табл. 1).

Таблиця 1
Шкала відносної важливості

Ступінь переваги	Визначення	Пояснення
1	Рівна важливість	Рівний вклад двох ознак до цілі
2	Слабка ступінь переваги	Проміжна градація між рівною важливістю та середньою перевагою
3	Середня ступінь переваги	Досвід та судження експерта дають легку перевагу
4	Перевага вище середньої	Проміжна градація між середньою та помірно сильною перевагою
5	Помірно сильна перевага	Досвід та судження експерта дають достатньо сильну перевагу
6	Сильна перевага	Проміжна градація між помірно сильною та дуже сильною перевагою
7	Дуже сильна перевага	Досвід та судження експерта дають дуже сильну перевагу
8	Дуже, дуже сильна перевага	Проміжна градація між дуже сильною та абсолютною перевагою
9	Абсолютна перевага	Очевидність величезної переваги одного елемента над другим має незаперечне підтвердження
Обернені значення: $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots, \frac{1}{9}$	Якщо перевага i -ї ознаки із зрівнянням з j -ю ознакою має одне з наведених вище значень, та оцінка “переваги” j -ї ознаки перед i -тою буде мати обернене значення: $a_{ij}=3$, то $a_{ji}=1/3$	

Джерело: [9, С. 32].

По суті кожний елемент вищого рівня ієрархії являється критерієм до елементів нижнього рівня, які порівнюються по відношенню до цього критерію.

Матриця попарних порівнянь для чотирьох елементів рівня 2 за критерієм рівня 1 нашого прикладу наведена у табл. 2.

Таблиця 2

Матриця порівнянь для елементів рівня 2 за критерієм “Вибір літака”

Назва елементів, що порівнюються	Номера елементів				Локальні пріоритети, U_i
	K1	K2	K3	K4	
K1	1	4	6	7	0,595
K2	1/4	1	7	8	0,261
K3	1/6	1/7	1	4	0,101
K4	1/7	1/8	1/4	1	0,043
$\lambda_{\max} = 4,331$; $IY = 0,11$; $BV = 0,123$					

Джерело: розроблено автором.

Мірою узгодженості суджень експертів являється індекс узгодженості, який отримують за формулою:

$$IY = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad (1)$$

$\lambda_{\max}$ – максимальне власне значення матриці попарних порівнянь. Для обернено симетричних матриць завжди виконується нерівність $\lambda_{\max} \geq n$.

Таким чином, чим ближче до нуля IY , тим більш узгодженою виявляється матриця A . Але відкритим залишається питання, наскільки близьким до нуля повинен бути IY щодо подальшого використання матриці A . Тому індекс узгодженості зрівнюють з величиною, яку можна отримати з тією, яка б була отримана при випадковому виборі кількісних суджень за відповідною шкалою, але при створенні обернено симетричної матриці.

Середні значення індексу узгодженості для випадкових матриць (IYB) різного порядку наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Середні значення IYB (n – вимірність матриці)

n	3	4	5	6	7	8	9
IYB	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45

Джерело: [5, С. 39].

Для визначення ступеня порушення узгодже-

ності використовують відношення узгодженості (BV):

$$BV = \frac{IY}{IYB}. \quad (2)$$

Величина показника (2) повинна бути не більше 0,1 ($BV \leq 0,1$). В деяких випадках можна припустити $BV \leq 0,2$, але не більше. Якщо значення BV виходить за ці межі, то експерти повинні перевірити свої судження.

Компоненти власного вектора локальних пріоритетів, обчислюються за формулами:

$$\bar{u}_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}, \quad i = \overline{1, n}; \quad (3)$$

$$u_i = \frac{\bar{u}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{u}_i}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (4)$$

Значення вектора локальних пріоритетів критеріїв наведені у останньому стовбці табл. 2.

Максимальне власне значення визначається за наступною формулою:

$$\lambda_{\max} = \sum_{j=1}^n u_j \left(\sum_{i=1}^n a_{ij} \right)_{\max}. \quad (5)$$

Значення $\lambda_{\max}$, IY , BV внесені в останній рядок табл. 2. Далі перейдемо до такого ж за змістом аналізу усіх трьох елементів рівня 3 (літаки Л1, Л2, Л3) відносно кожного елемента – критерію рівня 2 (табл. 4).

Таблиця 4

Локальні пріоритети елементів рівня 3 відносно кожного елемента-критерію рівня 2

K1	Л1	Л2	Л3	Локальні пріоритети, V_{i1}	K2	Л1	Л2	Л3	Локальні пріоритети, V_{i2}
Л1	1	1/5	1/8	0,062	Л1	1	0,5	1/9	0,079
Л2	5	1	1/5	0,212	Л2	2	1	1/6	0,143
Л3	8	5	1	0,726	Л3	9	6	1	0,779
$\lambda_{\max} = 3,146$; $IY = 0,073$; $BV = 0,126$					$\lambda_{\max} = 3,009$; $IY = 0,004$; $BV = 0,009$				
K3	Л1	Л2	Л3	Локальні пріоритети, V_{i3}	K4	Л1	Л2	Л3	Локальні пріоритети, V_{i4}
Л1	1	0,333	0,333	0,143	Л1	1	1	1/5	0,143
Л2	3	1	1	0,429	Л2	1	1	1/5	0,143
Л3	3	1	1	0,429	Л3	5	5	1	0,714
$\lambda_{\max} = 3,000$; $IY = 0,000$; $BV = 0,000$					$\lambda_{\max} = 3,000$; $IY = 0,000$; $BV = 0,000$				

Джерело: розроблено автором.

Наступним етапом являється застосування принципу синтезу для визначення глобальних пріоритетів елементів рівня 3 за наступними співвідношеннями у матричній формі [6]:

$$W = V \cdot U, \quad (6)$$

де:

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_m]^T, V = \|v_{ij}\|_{m,n}; U = [u_1, u_2, \dots, u_n]^T.$$

Наведемо відповідні обчислення глобальних пріоритетів літаків Л1, Л2, Л3:

$$W = \begin{bmatrix} 0,062 & 0,079 & 0,143 & 0,143 \\ 0,212 & 0,143 & 0,429 & 0,143 \\ 0,726 & 0,779 & 0,429 & 0,714 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,595 \\ 0,261 \\ 0,101 \\ 0,043 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,078 \\ 0,213 \\ 0,709 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Висновки

1. Запропонована методика вибору літака первинної підготовки із застосуванням методу аналізу ієрархій.

2. За результатами дослідження найкращим виявився літак А-12 із глобальним пріоритетом 0,71. Літак ANG-01 має друге по значущості місце із глобальним пріоритетом 0,21. Найгірший глобальний пріоритет – 0,08, отримав літак ХІАТ-650.

3. Серед критеріїв, які забезпечують вибір найкращого літака, найважливішим виявився критерій “льотні якості” – 0,60, далі йдуть: критерій “безпека” – 0,18, “економічні показники” – 0,10, “технічний супровід” – 0,04.

Список літератури

1. Дроздов С.С. Формалізовані критерії раціональності програми розвитку системи озброєння тактичної авіації Повітряних Сил Збройних Сил України на довгостроковій перспективі (прогнозований) загрози / С.С. Дроздов, О.Б. Леонтєв, М.В. Науменко // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. – 2020. – № 3(65). – С. 13-24. <https://doi.org/10.30748/zhups.2020.65.02>.
2. Леонтєв О.Б. Напрями удосконалення науково-методичного апарату обґрунтування основних напрямів розвитку системи озброєння авіації Повітряних Сил Збройних Сил України / О.Б. Леонтєв, М.В. Науменко // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2020. – № 3(40). – С. 69-78. <https://doi.org/10.30748/nitps.2020.40.08>.
3. Нор П.І. Реактивні навчально-тренувальні літаки: покоління; технічні характеристики; порівняльна оцінка / П.І. Нор, Л.Ю. Новосад. – К.: Фітон, 2012. – 160 с.
4. Основні технічні показники оцінки ефективності парків озброєння та військової техніки Збройних Сил / В.А. Єфіменко, П.І. Нор, А.Ю. Гупало, О.В. Кучурін // Збірник наукових праць Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України. – 2012. – № 34. – С. 87-98.
5. Куліков С.П. Методичний підхід до розрахунку порівняльних коефіцієнтів зразків озброєння на основі їхніх ТТХ / С.П. Куліков // Збірник наукових праць Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України. – 2008. – № 2(44). – С. 93-104.
6. Самков О.В. До питання порівняльної оцінки військових літаків / О.В. Самков, О.Є. Мавренков // Збірник наукових праць Київського інституту Військово-Повітряних Сил. – 1999. – № 6. – С. 135-140.
7. Кваліметричні моделі ступеню придатності навчально-бойового літака до використання в базовій навчально-льотній підготовці курсантів / О.Б. Леонтєв, В.П. Єрошенко, М.В. Науменко, І.Б. Ковтонюк // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2019. – № 2(35). – С. 79-87. <https://doi.org/10.30748/nitps.2019.35.10>.
8. Єрошенко В.П. Методика вибору коефіцієнтів для побудови кваліметричної моделі вибору повітряного судна для навчальної льотної підготовки // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2020. – № 4(41). – С. 64-70. <https://doi.org/10.30748/nitps.2020.41.07>.
9. Саати Т. Аналитическое планирование. Организация систем: пер. с англ. / Т. Саати, К. Кернс. – М.: Радио и связь, 1991. – 224 с.
10. Кушнерук Ю.І. Використання методу аналізу ієрархій для оцінювання пріоритетів структурних частин та підрозділів внутрішніх військ під час розв'язання задач розподілу обмежених ресурсів / Ю.І. Кушнерук, В.П. Василенко, В.Г. Дундуков // Честь і закон: Науковий журнал АБВ МВС України. – 2013. – № 2(45). – С. 56-62.
11. Саати Т. Относительное измерение и его обобщение в принятии решений. Почему парные сравнения являются ключевыми в математике для измерения неосознаваемых факторов / Т. Саати // Cloud Of Science. – 2016. – Том 3. – № 2. – С. 171-262.
12. Павлов А.А. Принятие решений на основе метода анализа иерархий / А.А. Павлов, Е.И. Лищук // Вестник Национального технического университета “ХПИ”. – 2007. – № 41. – С. 69-76.
13. Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход / В.Д. Ногин. – М.: Физматлит, 2002. – 144 с.

Надійшла до редколегії 03.08.2020

Схвалена до друку 22.09.2020

Відомості про автора:

Шевяков Юрій Іванович

доктор технічних наук доцент
директор Інституту цивільної авіації
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-5322-6674>

Information about the author:

Yurii Sheviakov

Doctor of Technical Sciences Associate Professor
Director of the Civil Aviation Institute
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-5322-6674>

ВЫБОР САМОЛЕТА НАЧАЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ МЕТОДОМ АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ

Ю.И. Шевяков

Рассмотрена и решена задача выбора самолета первичной подготовки с применением метода анализа иерархий. Предложены в качестве критериев выбора – летные качества, безопасность, экономические показатели и техническое сопровождение. В качестве примера рассматриваются три легких самолета отечественного производства. Характеристики самолетов оцениваются экспертами, мерой согласованности суждений которых есть индекс согласованности. Рассчитаны средние значения индекса согласованности для случайных матриц и получены локальные приоритеты критериев сравнения и глобальные приоритеты самолетов ХИАТ-650, АНГ -01 та А-12.

Ключевые слова: метод анализа иерархий (МАИ), критерий сравнения, локальные и глобальные приоритеты, индекс и отношение согласованности.

CHOICE OF PRIMARY TRAINING AIRCRAFT ACCORDING TO THE METHOD OF ANALYSIS OF HIERARCHIES

Yu. Sheviakov

The problem of choosing an aircraft of initial training with the use of the method of hierarchy analysis is considered and solved. The method of analysis of hierarchies (MAI) is a systematic procedure for the hierarchical representation of the elements that define the essence of any problem. MAI consists of three stages: the stage of building a hierarchical model for comparing the elements of the problem; the stage of forming a matrix of pairwise comparisons of elements for each level and determining their local priorities; the stage of determining the global priorities of the elements and choosing the best solution. Proposed as aircraft selection criteria are the flight qualities of the aircraft (suitability for initial flight training), safety, economic performance (aircraft cost, cost of operation and maintenance) and technical support. As an example, three light aircraft of domestic production are considered. The characteristics of aircraft are assessed by experts, the degree of consistency of whose judgments is the consistency index. The average values of the consistency index for random matrices were calculated and the local priorities of the comparison criteria and the global priorities of the HIAT-650, ANG-01 and A-12 aircraft were obtained. According to the results of calculations among the criteria that ensure the selection of the best aircraft, the most important criterion was "summer quality" - 0.60, followed by: criteria "safety" - 0.18, "economic indicators" - 0, 10, "technical support" - 0.04. The best was the A-12 with a global priority of 0.71. The ANG-01 aircraft has the second most important place with a global priority of 0.21. The worst global priority - 0.08, received a HIAT-650 aircraft.

Keywords: hierarchy analysis method (MAI), comparison criterion, local and global priorities, index and consistency ratio.