

Вибір зразка безпілотного літального апарату для прийняття на озброєння з урахуванням експертних даних

А. М. Алімпієв, П. Г. Берднік, Н. О. Королюк, О. А. Коршець, М. А. Павленко

Проведена порівняльна характеристика багатокритеріальних задач оптимізації, критерії яких можуть мати кількісну і якісну природу. Обґрунтовано рішення щодо вибору зразка безпілотного літального апарату для прийняття на озброєння за характеристиками, значення яких прогнозуються в умовах нестохастичної невизначеності на основі експертних даних. Запропонована декомпозиція проблеми в ієрархію, що відображає зміст багатокритеріальної задачі оптимізації

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, декомпозиція проблеми в ієрархію, лінгвістична змінна

1. Вступ

Оборонний характер воєнної доктрини Збройних Сил України (ЗСУ) висуває високі вимоги до всіх елементів бойової готовності і підготовки військ. Збройні Сили повинні бути готові відбити агресію шляхом ведення оборонних дій. Найважливішою задачею командування при оборонному характері воєнної доктрини стає постійне спостереження за противником, яке повинне забезпечити своєчасний і організований перехід військ з мирного на воєнний стан. Основна роль при цьому відводиться розвідці. Ряд задач повітряної розвідки може вирішуватися в умовах сильної протидії засобів протиповітряної оборони противника із застосуванням безпілотних літаків (БПЛ) [1, 2]. Аналіз досвіду застосування БПЛ в сучасних військових конфліктах дозволяє зробити висновок, що основними бойовими завданнями БПЛ у війні в Північному В'єтнамі, Югославії, Чечні, Афганістані, Сирії було вирішення завдань розвідки і спостереження за полем бою [3, 4].

Тому саме в теперішній час БПЛ розглядаються як ефективний та надійний засіб повітряної розвідки. Завдяки оперативної доставки повної, достовірної інформації про противника досягається успішності ведення бойових дій.

У відповідності з поглядами фахівців [5–7], у бойових діях найбільш перспективним видом озброєння будуть БПЛ військового призначення. Бойові можливості підрозділів нового типу з БПЛ збільшаться в 2–2,5 рази. На теперішній час 30 держав виробляють до 150 типів БПЛ, з них 80 прийняті на озброєння 55 армій світу. Лідирують в цій області США, Ізраїль та Китай. За прогнозами спеціалістів, в 2015–2025 рр. участь США у світових витратах на БПЛ складе по науково-дослідним конструкторським роботам – 62 %, по закупівлям – 55 % [5, 6]. Стратегія розвитку української авіаційної промисловості на період до 2020 року та результати дослідження потенціалу підприємств в перспективі передбачає збільшення обсягів розроблення і виробництва авіаційної техніки [8].

Сьогодні Повітряні Сили України експлуатують застарілі радянські оперативно-тактичні та оперативні безпілотні авіаційні комплекси ВР-2 "Стриж" і "Рейс", які не відповідають сучасним вимогам, мають обмежені можливості, використовують їх в якості повітряних мішеней. Зазначені комплекси за своїми тактико-технічними характеристиками безнадійно відстають від сучасних зразків безпілотної розвідувальної авіації світу та потребують заміни або повної модернізації. Повсякденна бойова практика ведення бойових дій з озброєними формуваннями на Сході України підтверджує необхідність застосування нових засобів збройної боротьби для забезпечення дій найменших тактичних одиниць. Тому Міністерство оборони України визначило кількісно-якісні потреби ЗС щодо необхідних класів БПЛ і попередні вимоги до них, однак проблематика визначення саме перспективного зразка БПЛ для прийняття на озброєння ЗСУ є актуальною. Аналіз відкритих джерел у галузі розвитку БПЛ дає можливість обґрунтувати вибір перспективного зразка БПЛ військового призначення [4–7, 13].

Визначення зразка БПЛ для прийняття на озброєння враховує перелік та зміст їх основних тактико-технічних характеристик, що складають його інформаційний ресурс. При відсутності необхідної статистики щодо значень тактико-технічних характеристик (ТТХ) чисельні значення їх прогнозуються. Зробити прогнозування можливо тільки на основі експертних даних, причому експертиза може розглядатися в нечіткій постановці.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Питання оснащення ЗС сучасними БПЛ і прийняття їх на озброєння підіймалось неодноразово й на різних рівнях, але до цього часу воно залишається невирішеним. В [8] визначені засади формування та реалізації державної політики у сфері розробки, виготовлення, продажу і експлуатаційного обслуговування авіаційної техніки. Однак чітко не визначені потреби ЗСУ БПЛ та підходи щодо вибору в конкретних зразків. В [9] запропоновано метод формування доцільних стратегій модернізації і створення нових зразків озброєння та метод визначення показників ефективності й ризику прийняття рішень в умовах нестохастичної невизначеності, однак питання обґрунтування процедури вибору та прийняття на озброєння існуючих зразків не розглядалося.

Пропонується в [10–12] метод проектування та розробки БПЛ з використання багатoproфільної групи експертів в області аеронавтики, систем управління та бойового застосування. Проте питання формалізації процедури обґрунтування рішень, що приймаються експертами, залишаються поза увагою статті і вказують на загальний підхід до вирішення завдання вибору вимог при розробці БПЛА. Проведений аналіз [13] основних класів БПЛ, що застосовуються в складі сухопутних військ для вирішення широкого кола бойових завдань, а також можливості їх спільного використання із частинами та підрозділами армійської авіації. Проте процедура вибору певних типів та моделей БПЛА не розглянута. Не наведені результати застосування різнотипних БПЛА. Сучасний стан проблем розвитку безпілотних літальних апаратів, основні тенденції перспективного розвитку, науковий та виробничий потенціал України, який не використовується повною мірою, визначені в [14]. Але в роботі [14] всі рішення

обґрунтовані з використанням статистичних даних без врахування ризиків та невизначеностей різного роду, що впливають на процеси виробництва та розробки БПЛА.

В [1, 8, 15] приведені основні характеристики БПЛ тактичної дії, що знаходяться на озброєнні у провідних країнах світу. При цьому стаття констатує факт наявності конкретних БПЛА. Причини та процедури їх відбору не розглядаються.

Однак сукупність ТТХ може скласти основну інформацію для експертів при прогнозуванні значень основних характеристик перспективного зразка БПЛ для ЗСУ. Аналіз оснащення безпілотною авіацією військ обґрунтовує доцільність врахування характеристик розвідувального БПЛ Raven RQ-11 американського виробництва при проведенні експертизи. Даний тип БПЛ був поставлений в Збройні Сили в червні 2016 року для використання в зоні збройного конфлікту на Сході України [16]. Необхідно також враховувати тактико-технічні дані БПЛ «Фурія» і «Spectator» українського виробництва, які були придбані Міністерством оборони для виконання завдань в зоні проведення антитерористичної операції [14]. Наявність цих БПЛА та накопичений досвід їх застосування дозволить перевірити працездатність розробленого метода на існуючих даних та оцінити якість його роботи.

Таким чином, перспективним є вирішення проблеми: визначення зразка БПЛ для прийняття на озброєння ЗСУ за прогнозованими значеннями основних тактико-технічних характеристик в нечіткій постановці.

3. Мета та задачі дослідження

Мета роботи полягає в обґрунтуванні рішення щодо вибору зразка БПЛ для прийняття на озброєння за прийнятими показниками.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- проведення порівняльної оцінки багатокритеріальних задач оптимізації, критерії яких можуть відповідати чинникам, що відображають як кількісну, так і якісну ознаку;
- прогнозування значень ТТХ зразків БПЛ в умовах нестохастичної невизначеності на основі постановки експертизи та обробці експертних даних;
- обґрунтування рішення щодо зразка БПЛ за прийнятими показниками з урахуванням вектора пріоритетів основних характеристик.

4. Методи вибору зразка БПЛ з урахуванням прогнозних значень основних тактико-технічних характеристик

Порівняльна оцінка декількох зразків БПЛ пов'язана з постановкою та розв'язанням багатокритеріальної задачі оптимізації. Відомі методи розв'язання задач багатокритеріальної оптимізації: формування узагальненого критерію, виділення основного критерію, аналізу ієрархій.

Метод виділення основного критерію полягає в тому, що багатокритеріальна початкова задача зводиться до однокритеріальної задачі оптимізації. Формування задачі здійснюється після отримання відповіді для задачі ранжування критеріїв та визначення обмежень для критеріїв. Метод формулювання узага-

льненого критерію при його застосуванні обмежений тим, що при розгляді прикладних задач складання узагальненого критерію викликає такі труднощі, які важко подолати. Метод послідовних поступок також потребує перш за все розв'язання задачі ранжування критеріїв і зведення їх виміру до однієї шкали, визначення величин поступок по кожному критерію. Метод аналізу ієрархій, який розглядається в [17, 18], з точки зору його застосування для розв'язання багатокритеріальних задач оптимізації різної фізичної природи недоліків чи «незручностей» немає. Більш того критерії можуть відповідати чинникам, які відображають як кількісну так і якісну ознаку [19].

Згідно [7] до основних ТТХ БПЛ відносять:

- тривалість польоту;
- швидкість польоту;
- висота польоту;
- радіус дії;
- вартість виготовлення;
- необхідність на ринку озброєння;
- конкурентоспроможність.

При розгляді перспективних зразків БПЛ зазначені вище їх основні ТТХ будуть мати прогнозовані значення. Відзначимо, що, якщо дослідник має статистику, нехай, наприклад, щодо значень радіуса дії при спостереженні за полем бою, то задача прогнозування значення цієї характеристики може бути поставлена та розв'язана в умовах стохастичної невизначеності. Згладжування стохастичних значень на момент часу

$$t_i < t_0, \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

де t_0 – час прийняття рішення, може бути виконано по методу найменших квадратів при допущенні прийнятої функціональної залежності значень цієї ТТХ від часу. Тоді задача прогнозування на термін часу $t = t_0 + \tau$ полягає в тому, що отримане згладжування значень ТТХ екстраполюють. Таке визначення прогнозних значень передбачає допущення, які полягають в тому, що сукупність чинників, яка визначала статистичні значення ТТХ, залишається незмінною на прогнозований термін часу τ . При такому допущенні довгострокове прогнозування значень ТТХ не може вважатись задовільним. Якщо дослідник не має статистики чи вона обмежена, то прогнозування значень ТТХ зразків БПЛ слід розглядати в умовах нестохастичної невизначеності.

В умовах нестохастичної невизначеності прогнозування значень ТТХ БПЛ можливе тільки на основі постановки експертизи та обробці експертних даних. При організації експертизи розв'язується задача прийняття рішень

$$\langle \Omega_1, \text{ОП}_1 \rangle, \quad (2)$$

де Ω_1 – множина оцінок значень ТТХ експерта, а ОП_1 – принцип оптимальності експерта. Дослідник може запропонувати таку схему експертизи, в якій кожний

l -й експерт свою суб'єктивну думку відносно прогнозного значення ТТХ зразка БПЛ висловлює у чіткій постановці трьома оцінками: песимістичною, найбільш очікуваною та оптимістичною. Подальше підвищення довіри до суб'єктивних оцінок експертів може полягати в нечітких оцінках прогнозних значень ТТХ, коли кожний експерт висловлює свою думку відносно прогнозного значення у вигляді нечіткого трикутного числа.

Нечітке число \tilde{A} на дійсній прямій – це нечітка підмножина, яка характеризується функцією належності $\mu_{\tilde{A}}(x): \mathbb{R} \rightarrow [0,1]$. Нечітке число \tilde{A} подають у вигляді:

$$\tilde{A} = \int (\mu_{\tilde{A}}(x) / x), \quad (3)$$

де $\mu_{\tilde{A}}(x) \in [0,1]$ – ступінь належності $x \in \mathbb{R}$ підмножини \tilde{A} , \int – символ об'єднання за всіма $x \in \mathbb{R}$.

Тоді прогнозування значення k -тої ТТХ зразка БПЛ описується нечітким трикутним числом (нечіткою підмножиною), функція належності якого подана на рис. 1 та має вигляд:

$$\mu_{\tilde{C}_k}(x) = \begin{cases} (x - (C_k - \delta_1)) / \delta_1 & \text{при } C_k - \delta_1 \leq x \leq C_k; \\ ((C_k + \delta_2) - x) / \delta_2 & \text{при } C_k \leq x \leq C_k + \delta_2; \\ 0 & \text{при } 0 \leq x \leq C_k - \delta_1, x \geq C_k + \delta_2. \end{cases} \quad (4)$$

Схема експертизи передбачає, що кожний l -й експерт висловлює свою суб'єктивну думку у вигляді трьох значень щодо C_k -ої ТТХ зразка БПЛ, а саме:

- $(C_k^{(l)} + \delta_1^{(l)})$ – песимістичну оцінку;
- $C_k^{(l)}$ – оцінку, яка найбільш очікується;
- $(C_k^{(l)} + \delta_2^{(l)})$ – оптимістичну оцінку.

Потім ці оцінки відповідно усереднюються з урахуванням вагових коефіцієнтів експертів та утримують опис l -ої ТТХ у вигляді (4).

Якщо прийняти $\mu_{\tilde{C}_k}(x) = \alpha$, то визначаються чіткі α -рівневі підмножини:

$$\{C_k^\alpha = \bar{C}_k^\alpha, \dots, \bar{\bar{C}}_k^\alpha\}, \quad (5)$$

де \bar{C}_k^α , $\bar{\bar{C}}_k^\alpha$ – відповідно ліва та права границі значення C_k -ої ТТХ зразка БПЛ. Виходячи із змісту нечіткої підмножини \tilde{C}_k дослідник приймає $\alpha \geq \alpha_{н.д}$ – рівень необхідної довіри прогнозних значень C_k -ої ТТХ, наприклад, $\alpha_{н.д}$ може визначатись як $\alpha_{н.д} = 0,5$.

З метою визначень за прогнозованими значеннями основних ТТХ в нечіткій постановці перспективних зразків озброєння на прикладі БПЛ, розглянемо наступну можливу декомпозицію проблеми в ієрархію, яка представлена на рис. 2.

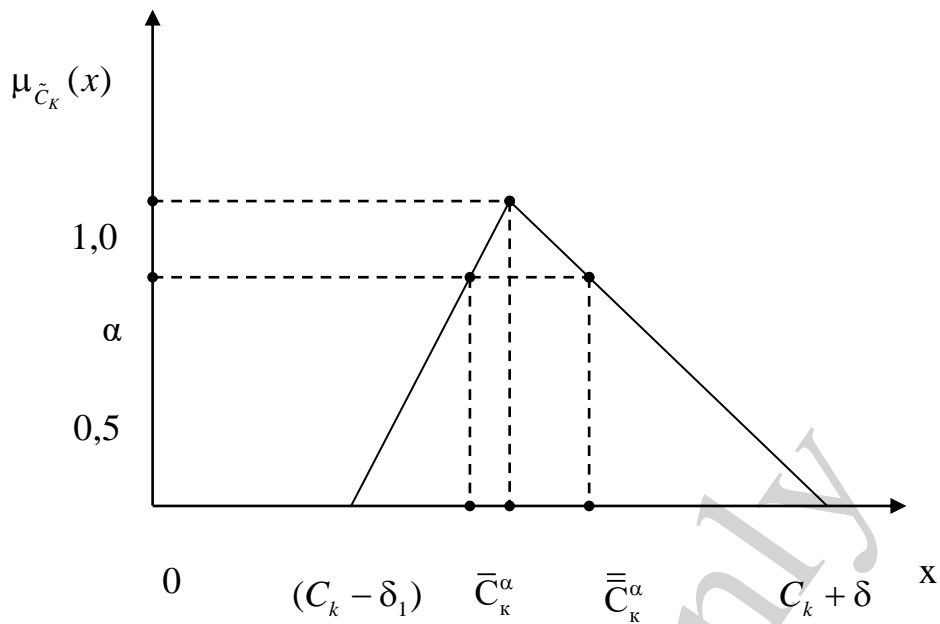


Рис. 1. Опис значення ТТХ зразка БПЛ нечітким трикутним числом

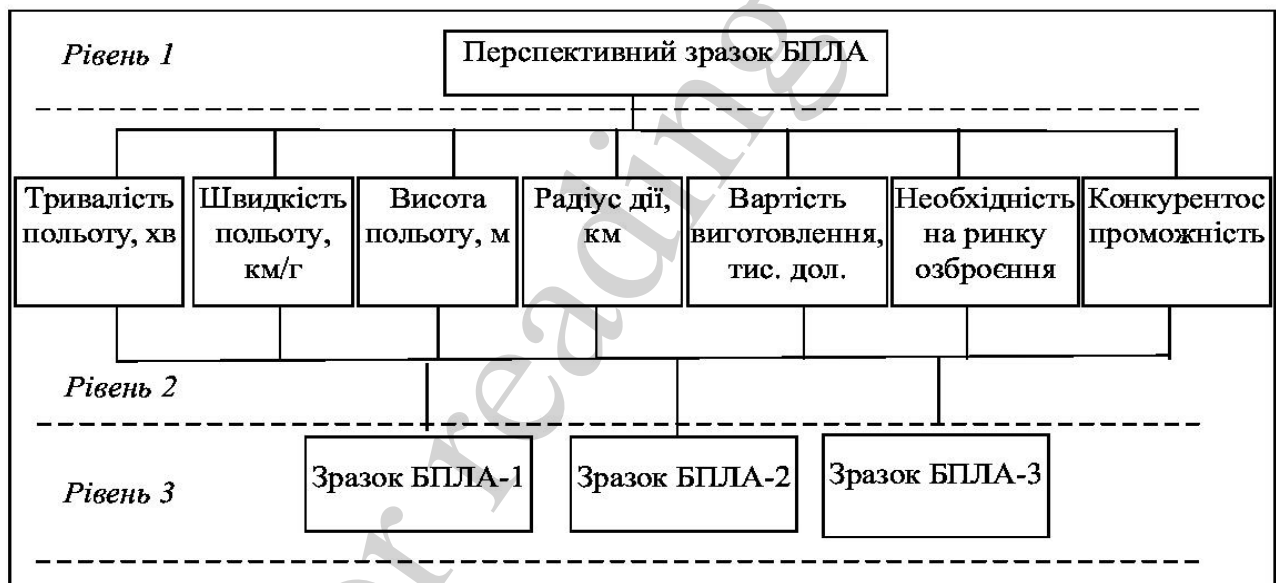


Рис. 2. Декомпозиція проблеми в ієрархію

Як це визначено на рис. 2, декомпозиція проблеми в ієрархію має три рівня:

- рівень перший відповідає меті, яка досягається при вирішенні проблеми;
- рівень другий включає показники (критерії), за якими повинна прийматися та чи інша альтернатива щодо перспективної зразка БПЛ;
- рівень третій відповідає переліку вихідних даних, який за думкою особи, що приймає рішення, складає повну їх множину

Таким чином, декомпозиція проблеми в ієрархію відображає зміст багатокритеріальної задачі оптимізації, яка має особливість:

– нечіткий опис прогнозних значень C_k основних ТТХ БПЛ (показники C_1, C_2, C_3, C_4), які мають чітко виражену кількісну природу та вимірюються у відповідних величинах;

– нечіткий прогнозний опис показника «вартості виготовлення зразка БПЛ» (показник C_5), який може бути віднесений до кількісної природи і до якісної природи;

– нечіткий прогнозований опис показників «необхідність на ринку озброєнь», «конкурентоздатність», які мають чітко виражену якісну природу. Вище відзначено, що показники, які мають кількісну природу, слід прогнозувати в нечіткій постановці та прогнозні їх значення описувати нечіткими трикутними числами. Показники, які мають якісну природу, слід прогнозувати на підставі введення до розгляду відповідних лінгвістичних змінних.

Згідно [17], під лінгвістичною змінною розуміють кортеж

$$\langle \beta, T(\beta), G, M \rangle, \quad (6)$$

де β – назва лінгвістичної змінної; G – синтаксичне правило, яке породжує назву нечіткої змінної $\gamma \in T(\beta)$ як вербальних значень лінгвістичної змінної; M – синтаксичне правило, яке ставить у відповідність кожній нечіткій змінній $\gamma \in T(\beta)$ нечітку підмножину $\tilde{C}(\gamma)$; $T(\beta)$ – терм-множина лінгвістичної змінної, елементи якої $\gamma_i, i = \overline{1, n}$, є назва нечіткої змінної як лінгвістичних значень лінгвістичної змінної

$$\langle \gamma, X, \tilde{C}(\gamma) \rangle, \quad (7)$$

де X – область визначення нечіткої змінної, $\tilde{C}(\gamma)$ – значення функції належності нечіткої підмножини

$$\tilde{C}(\gamma) = \left\{ \mu_{\tilde{C}(\gamma)}(x) / x \right\}, \quad x \in X, \quad \mu_{\tilde{C}(\gamma)}(x), \quad (8)$$

Відносно нечіткого показника «необхідність на ринку озброєння», може бути визначена лінгвістична змінна β_n – «необхідність», а терм-множина $T(\beta_n)$ може визначатись двома нечіткими змінними: $\gamma_{n,1}$ – «мала необхідність» та $\gamma_{n,2}$ – «велика необхідність». Відносно нечіткого якісного показника «конкурентоспроможність» може бути визначена лінгвістична змінна β_k – «конкурентоспроможність», а терм-множина $T(\beta_k)$ може визначатись трьома нечіткими змінними: $\gamma_{k,1}$ – «допустима конкурентоспроможність», $\gamma_{k,2}$ – «значна конкурентоспроможність», $\gamma_{k,3}$ – «висока конкурентоспроможність». Визначення функцій належностей нечітких змінних $\gamma_{n,1}, \gamma_{n,2}$ лінгвістичної змінної β_n та нечітких змінних $\gamma_{k,1}, \gamma_{k,2}, \gamma_{k,3}$ лінгвістичної змінної β_k досягається шляхом постановки експертизи та обробки експертних даних. Кожний l -й експерт,

$$\ell = \overline{1, L}, \quad (9)$$

висловлює своє суб'єктивне судження про таке: у скільки разів значення функції приналежності:

$$\mu_{\tilde{C}(\gamma_{n,1})}(x_i), \quad (10)$$

наприклад, розглядається нечітка підмножина $\tilde{C}(\gamma_{n,1})$ нечіткої змінної $\gamma_{n,1}$, більше значення функції приналежності:

$$\mu_{\tilde{C}(\gamma_{n,1})}(x_j), \quad (11)$$

де $x_i, x_j \in X$; $i, j = \overline{1, n}$, X – область визначення лінгвістичної змінної β_n . Таке судження експерт подає, виходячи із якісної шкали оцінок, яка зазначена в [17].

Бінарні порівняння $\mu_{\tilde{C}(\gamma_{n,1})}(x_i)$ та $\mu_{\tilde{C}(\gamma_{n,1})}(x_j)$ за такою шкалою експерти подають у вигляді матриці:

$$A(\ell) = \|a_{ij}(\ell)\|, \quad \ell = \overline{1, L}; \quad i, j = \overline{1, n}. \quad (12)$$

Потім матриці $A(\ell)$ усереднюються та розкладається матриця:

$$\square = \|a_{ij}\|, \quad i, j = \overline{1, n}. \quad (13)$$

Для всякої квадратної A їй відповідне матричне рівняння:

$$AY^T = \lambda Y, \quad (14)$$

яке дає змогу визначити їй відповідні власні числа:

$$\lambda_q, \quad q = \overline{1, G}, \quad (15)$$

як корені характеристичного рівняння:

$$A - \lambda E = 0, \quad (16)$$

де E – одинична матриця. Кожному власному числу λ_q відповідає власний вектор Y_q . Якщо для матриці A маємо, що:

$$a_{ij} > 0; \quad a_{ji} = 1/a_{ij}; \quad a_{ik} = a_{ij} \cdot a_{jk}; \quad i, j, k = \overline{1, n}, \quad (17)$$

тобто матриця A є невід'ємною, зворотньосиметричною та погодженою, то рівняння:

$$A - \lambda E = 0, \quad (18)$$

має один корінь:

$$\lambda = \lambda_{\max} = n. \quad (19)$$

Йому відповідає єдиний власний вектор Y . Тому якщо суб'єктивні судження експертів відносно:

$$\tilde{C}(\gamma_i) = \left\{ \mu_{\tilde{C}(\gamma_i)}(x) / x \right\}, x \in X, i = \overline{1, 5}, \quad (20)$$

для $\gamma_{н,1}, \gamma_{н,2}; \gamma_{к,1}, \gamma_{к,2}, \gamma_{к,3}$ будуть надані невід'ємною, зворотньосиметричною та погодженою матрицею, то рішення рівняння $AY^T = nY$ дозволяє визначити вектор:

$$Y = \left\{ \mu_{\tilde{C}(\gamma)}(x) \right\}, \quad (21)$$

а чисельну міру розходження λ_{\max} та n буде визначати чисельну міру погодженості суджень експертів. Кожний l -й експерт, користуючись якісною шкалою, яка зазначена в [17], висловлює своє судження відносно функції приналежності:

$$\mu_{\tilde{C}(\gamma)}(x_j); i, j = \overline{1 \dots n}; x_i, x_j \in X. \quad (22)$$

Згідно рівняння $A\mu^T = \lambda_{\max} \mu$ можна формувати вектор:

$$\mu = \left\{ \mu_{\tilde{C}(\gamma)}(x_j) \right\}, j = \overline{1, n}, \quad (23)$$

тому що

$$\mu_{\tilde{C}(\gamma)}(x_j) = 1/k_j. \quad (24)$$

В загальному випадку, отриманий вектор μ може не задовольняти рівнянню:

$$AY^T = nY, \quad (25)$$

тому що погодженість невід'ємної зворотньосиметричної матриці відповідає вимозі $\lambda_{\max} \geq n$. Відхилення від погодження оцінюють по співвідношенню:

$$\eta = (\tilde{\lambda}_{\max} - n) / (n - 1), \quad (26)$$

тому що при бінарному порівнянні n елементів висловлюються $(n-1)$ суджень, а λ_{\max} є середнє значення компонент $\bar{\lambda}_{\max}$, які отримують при по елементному діленні компонент вектора $A\mu^T$ на компоненти вектора μ . Якщо η не відповідає вимогам щодо точності, то матриця A поправляється з урахуванням отриманого вектора μ . Визначені вектори:

$$\mu_i = \left\{ \mu_{\tilde{c}(\gamma_i)}(x_j) \right\}, \quad j = \overline{1, n}; \quad i = \overline{1, 5}, \quad (27)$$

які відповідають нечітким змінним $\gamma_{H,1}, \gamma_{H,2}$ лінгвістичної змінної β_H та $\gamma_{K,1}, \gamma_{K,2}, \gamma_{K,3}$ лінгвістичної змінної β_K , нормуються. Графічне подання функцій належності нечітких підмножин, які відповідають відзначеним тут нечітким змінним, наведено на рис. 3, 4.

В якості розмірності області визначення X лінгвістичної змінної β_H – «необхідність на ринку озброєння», може прийматись вартість одиниці перспективного зразка БПЛ на ринку. В якості розмірності області визначення X лінгвістичної змінної β_K – «конкурентоспроможність», може виступати відношення вартості одиниці перспективного зразка БПЛ на ринку опонента до вартості одиниці зразка на ринку оперуючої сторони (сторона, за яку розглядається вирішення проблеми).

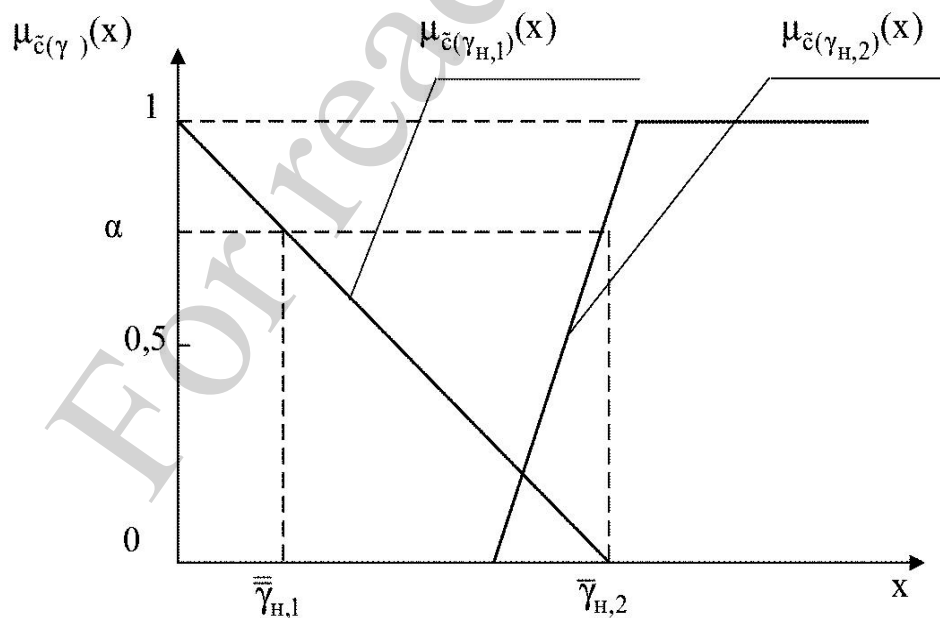


Рис. 3. Функції належності нечітких змінних $\gamma_{H,1}, \gamma_{H,2}$

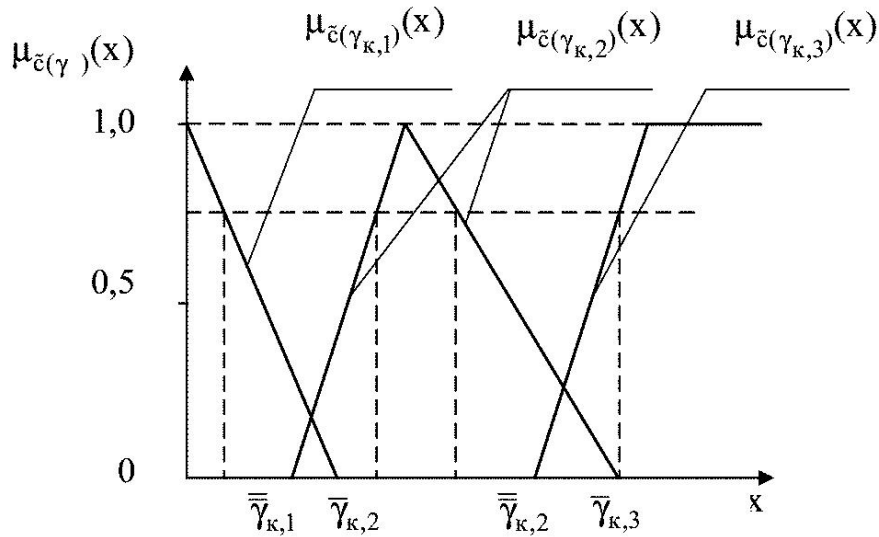


Рис. 4. Функції належності нечітких змінних $\gamma_{к,1}$, $\gamma_{к,2}$, $\gamma_{к,3}$

Для отримання функцій належності нечітких змінних $\gamma_{н,1}$, $\gamma_{н,2}$, $\gamma_{к,1}$, $\gamma_{к,2}$, $\gamma_{к,3}$ також слід визначити рівень функцій при належностей:

$$\alpha = \mu_{\bar{c}(\gamma_{н,1})}(x) = \mu_{\bar{c}(\gamma_{н,2})}(x) = \mu_{\bar{c}(\gamma_{к,1})}(x) = \mu_{\bar{c}(\gamma_{к,2})}(x) = \mu_{\bar{c}(\gamma_{к,3})}(x), \quad (28)$$

якому будуть відповідати наступні чіткі множини:

$$\text{для } \gamma_{н,1} - \{0, \dots, \bar{\bar{\gamma}}_{н,1}\}; \text{ для } \gamma_{н,2} - \{\bar{\bar{\gamma}}_{н,2}, \dots, \bar{\bar{\gamma}}_{н,2} > \bar{\gamma}_{н,2}\};$$

$$\text{для } \gamma_{к,1} - \{0, \dots, \bar{\bar{\gamma}}_{к,1}\}; \text{ для } \gamma_{к,2} - \{\bar{\bar{\gamma}}_{к,2}, \dots, \bar{\bar{\gamma}}_{к,2}\};$$

$$\text{для } \gamma_{к,3} - \{\bar{\bar{\gamma}}_{к,3}, \dots, \bar{\bar{\gamma}}_{к,3} > \bar{\gamma}_{к,3}\}.$$

Тоді згідно, зазначеної на рис. 2 декомпозиції проблеми в ієрархію, всі показники (критерії) будуть визначені у нечіткій постановці та враховуватися у подальшому розгляді в якості чітких множин (інтервалів) при прийнятому значенні α їх функцій належностей. При прийнятому рівні α визначимо згідно метода аналізу ієрархій пріоритетний прогнозований зразок БПЛ за показниками $C_1^\alpha C_2^\alpha C_3^\alpha C_4^\alpha C_5^\alpha$, які описуються інтервалами:

$$\{\bar{C}_к^\alpha, \dots, \bar{\bar{C}}_к^\alpha\}, \quad к = \bar{1}, \bar{5}, \quad (29)$$

та показниками, для яких розглянемо відповідні інтервали:

$$\gamma_{н,2}^\alpha = \{\bar{\gamma}_{н,2}^\alpha, \dots, \bar{\bar{\gamma}}_{н,2}^\alpha\} \text{ та } \gamma_{к,3}^\alpha = \{\bar{\gamma}_{к,3}^\alpha, \dots, \bar{\bar{\gamma}}_{к,3}^\alpha\}. \quad (30)$$

Таким чином, розглянута декомпозиція проблеми в ієрархію, яка відображає зміст багатокритеріальної задачі оптимізації. Особливостями формалізації є нечіткий опис прогнозних значень основних ТТХ БПЛ, які мають кількісну та якісну природу.

5. Результати обґрунтування рішення щодо вибору зразка БПЛ для прийняття на озброєння

Будемо вважати, що використовуючи інформацію щодо основних ТТХ БПЛ, яка приведена в [1, 14], проведена експертиза з метою визначення прогнозних значень кожної характеристики БПЛ. При обробці експертних даних значення кожної характеристики представлені нечіткою підмножиною (нечітким трикутним числом). Щодо показників «велика необхідність на ринку озброєння» та «висока конкурентоспроможність» розглянуті відповідні лінгвістичні змінні. Для визначених нечітких змінних лінгвістичних змінних побудовані функції приналежності. Для трьох можливих перспективних зразків БПЛ чіткі множини зміни значень показників при прийнятому рівні α функцій належностей приведені в табл. 1.

Таблиця 1

Значення показників ТТХ для перспективних зразків БПЛ

БПЛ \ ТТХ	C_1^α , хв	C_2^α , км/г	C_3^α , м	C_4^α , км	C_5^α , тис. дол	$\gamma_n^\alpha, 2$	$\gamma_k^\alpha, 3$
БПЛ-1	45,...,60	60,...,95	100,...,5000	0,...,10	33,...,35	65,...,70	0,8,...,1,3
БПЛ-2	45,...,120	40,...,120	100,...,2000	0,...,15	13,...,15	40,...,50	1,1,...,1,5
БПЛ-3	45,...,120	65,...,130	100,...,5000	0,...,30	13,...,14	50,...,60	1,8,...,2,5

Згідно методу аналізу ієрархій, передбачається виявлення порівняльної важності показників. Бінарне порівняння показників є результатом експертизи. При формуванні значень елементів, що складають другий рівень ієрархії, експерти керувались питанням. Питання наступне: у скільки разів показник, який розглядається, більш суттєвий (вагомий) по відношенню до іншого показника з точки зору мети. Мета для даного рівня полягає у визначенні прогнозованого перспективного зразка БПЛ (табл. 2). У табл. 3 зазначена матриця:

$$A = \|a_{i,j}\|, i, j = \overline{1,7}, \quad (31)$$

рішення матричного рівняння:

$$A\mu^T = \lambda_{\max} \mu, \quad (32)$$

дає власний вектор, який має константи:

$$\mu = \{0.029; 0.039; 0.051; 0.073; 0.436; 0.149; 0.11\}. \quad (33)$$

Таблиця 2
Бінарне порівняння показників БПЛ

Загальні вимоги до зразка БПЛ	C_1^α , хв	C_2^α , км/Г	C_3^α , м	C_4^α , км	C_5^α , тис. дол	$\gamma_{н,2}^\alpha$	$\gamma_{к,3}^\alpha$
Тривалість польоту, C_1^α	1	1/3	1/4	1/7	1/5	1/9	1/5
Швидкість польоту, C_2^α	3	1	1/4	1/3	1/5	1/9	1/3
Висота польоту, C_3^α	4	4	1	1/5	1/3	1/7	1/3
Радіус дії, C_4^α	7	3	5	1	1/4	1/5	1/3
Вартість виготовлення, C_5^α	5	5	3	4	1	5	9
Велика необхідність на ринку озброєння, $\gamma_{н,2}^\alpha$	9	9	7	5	1/5	1	8
Висока конкурентність, $\gamma_{к,3}^\alpha$	5	3	3	3	1/9	1/8	1

Нормований вектор:

$$\mu_i^{н,\alpha} = \mu_i^\alpha / \sum_{i=1}^7 \mu_i^\alpha, i = \overline{1,7}, \quad (34)$$

має вигляд:

$$\mu^{н,\alpha} = \{0.03; 0.05; 0.06; 0.07; 0.51; 0.15; 0.13\}, \quad (35)$$

де відзначено, що результат $\mu^{н,\alpha}$ відповідає прийнятому для всіх показників рівню α функцій належностей їм відповідним нечітким підмножинам:

$$\tilde{C}(\gamma_i), i = \overline{1,7}. \quad (36)$$

Розглянемо бінарні відношення переваг прогнозованих перспективних зразків озброєння БПЛ, які складають зміст третього рівня ієрархії, з точки зору того чи іншого показника, які складають зміст другого рівня ієрархії. Такі сім матриць подані в табл. 3, 4. Там же зазначені власні вектори відповідних матриць:

$$\mu_i^{н,\alpha}, i = \overline{1,7}. \quad (37)$$

Бінарні порівняння та третьому рівні ієрархії експерти проводять керуючись думкою. Зміст питання наступний: скільки разів зразок БПЛ, який розглядається, є доцільним по відношенню за кожним показником другою рівня ієрархії.

З метою утримання узагальнених показників щодо пріоритетного зразка БПЛ реалізується принцип синтезу, згідно якого компонента вектора пріоритетів щодо прогнозованого зразка БПЛ визначається за виразом:

$$\mu_k^{h,\alpha} = \sum_{i=1}^7 \mu_{i,k}^{h,\alpha} \mu_i^{h,\alpha}, k = \overline{1,3}, \quad (38)$$

де $\mu_{i,k}^{h,\alpha}$ – нормоване значення k -ої компоненти вектора пріоритету зразків БПЛ за i -м показником, значення якого визначені α -рівневим чітким інтервалом функції приналежності; $\mu_i^{h,\alpha}$ – нормоване значення i -ої компоненти вектора пріоритетів показників, за якими приймається рішення щодо доцільного перспективного зразка БПЛ. Для підрахування компоненти μ_k^α дані, отримані в табл. 1, 2, зручно надати в табл. 3.

Таблиця 3
Бінарні порівняння зразків БПЛ у відповідності до їх показників

C_1^α	БПЛ-1	БПЛ-2	БПЛ-3	$\mu_1^{h,\alpha}$
БПЛ-1	1	2	0.5	0.286
БПЛ-2	0.5	1	0.33	0.167
БПЛ-3	2	3	1	0.547
C_2^α	БПЛ-1	БПЛ-2	БПЛ-3	$\mu_2^{h,\alpha}$
БПЛ-1	1	0.5	5	0.321
БПЛ-2	2	1	5	0.586
БПЛ-3	0.2	0.25	1	0.093
C_3^α	БПЛ-1	БПЛ-2	БПЛ-3	$\mu_3^{h,\alpha}$
БПЛ-1	1	2	0.33	0.223
БПЛ-2	0.5	1	0.25	0.143
БПЛ-3	3	4	1	0.634
C_4^α	БПЛ-1	БПЛ-2	БПЛ-3	$\mu_4^{h,\alpha}$
БПЛ-1	1	3	5	0.65
БПЛ-2	0.33	1	3	0.23
БПЛ-3	1/5	0.33	1	0.12
C_5^α	БПЛ-1	БПЛ-2	БПЛ-3	$\mu_5^{h,\alpha}$
БПЛ-1	1	0.33	5	0.26
БПЛ-2	3	1	7	0.68
БПЛ-3	0.2	0.14	1	0.08
$\gamma_{h,2}^\alpha$	БПЛ-1	БПЛ-2	БПЛ-3	$\mu_6^{h,\alpha}$
БПЛ-1	1	2	0.33	0.229
БПЛ-2	0.5	1	0.5	0.206
БПЛ-3	3	2	1	0.564
$\gamma_{k,3}^\alpha$	БПЛ-1	БПЛ-2	БПЛ-3	$\mu_7^{h,\alpha}$
БПЛ-1	1	0.14	0.33	0.09
БПЛ-2	7	1	5	0.71
БПЛ-3	3	0.2	1	0.2

Таблиця 4
Узагальнення щодо зразків БПЛ

Показник	C_1^{α}	C_2^{α}	C_3^{α}	C_4^{α}	C_5^{α}	$\gamma_{н,2}^{\alpha}$	$\gamma_{к,3}^{\alpha}$	$\mu_1^{н,\alpha}$
Значення вектору пріоритетів	0.03	0.05	0.06	0.07	0.51	0.15	0.13	
БПЛ-1	0.286	0.321	0.223	0.65	0.26	0.229	0.09	0.255
БПЛ-2	0.167	0.586	0.143	0.23	0.68	0.206	0.71	0.527
БПЛ-3	0.547	0.093	0.634	0.12	0.08	0.564	0.2	0.218

Тоді слід прийняти рішення. Із трьох зразків БПЛ необхідно БПЛ-2 признати найбільш доцільним, тому що досягається найбільше значення $\mu_1^{н,\alpha}$ з урахуванням нечіткої природи значень показників.

Прийняття такого чіткого рішення в умовах нечіткого середовища, як відзначено в [17, 18], має відповідні значення показників ефективності та ризику. В такому випадку слід усі функції належності показників кількісної і якісної природи привести до однієї шкали виміру області визначення. Тоді показником ефективності прийняття рішення буде виступати міра чіткості перерізу нечітких підмножин, які відповідають введеним до розгляду показникам прогнозованих зразків озброєння.

6. Обговорення результатів дослідження щодо вибору зразка БПЛ для прийняття на озброєння

Питання оснащення ЗС сучасними БПЛ і прийняття їх на озброєння залишається невирішеним. На сьогоднішній час чітко не визначені потреби ЗСУ БПЛ та підходи щодо вибору конкретних зразків [8, 13]. В роботах [10, 11] пропонується метод проектування для розробки зразка з використанням групи експертів однак питання визначення доцільності даного класу БПЛ не розглядаються.

Пропонується вибір зразка озброєння визначати за сукупністю основних показників (критеріїв), які можуть мають кількісну і якісну природу. Обґрунтовується необхідність прогнозування значень показників в умовах нестационарної невизначеності. Відзначається, якщо б при дослідженні була статистика, то задача прогнозування значення цієї характеристики могла бути розв'язана в умовах стахостичної невизначеності. При цьому необхідно враховувати допущення, що сукупність чинників, яка визначала статистичні значення ТТХ, залишається незмінною на прогнозований термін часу. При такому допущенні довгострокове прогнозування значень ТТХ не може вважатися задовільним. Вочевидь прогнозування значень ТТХ зразків БПЛ розглядається в умовах нестационарної невизначеності на основі постановки експертизи та обробці експертних даних. Запропонована декомпозиція проблеми в ієрархію, що відображає зміст багатокритеріальної задачі оптимізації. Задача характеризується нечітким описом прогнозних значень основних ТТХ БПЛ, які мають чітко виражену кількісну і якісну природу та вимірюються у відповідних величинах.

Проведена експертиза з метою визначення прогнозованих значень кожної характеристики БПЛ. При обробці експертних даних значення кожної кількіс-

ної характеристики представлені нечітким трикутним числом. Щодо показників якісної природи, розглянуті відповідні лінгвістичні змінні. Згідно методу аналізу ієрархій здійснена порівняльна оцінка важності показників. З метою отримання узагальнених показників щодо пріоритетного зразка БПЛ запропонований принцип синтезу.

Таким чином, в результаті дослідження пропонується підхід, що дозволяє особі, що приймає рішення, в інтерактивному режимі знайти такий варіант (альтернативу), який найкращим чином узгоджується з розумінням суті проблеми і вимогами до її вирішення. Рекомендовано із трьох зразків признати найбільш доцільним БПЛ, для якого досягається найбільше значення узагальненого показника з урахуванням нечіткої їх природи. Однак недоліком підходу є необхідність отримання великого обсягу інформації від експертів та наявність переваг найкращого варіанту з безлічі існуючих альтернатив. Проведення відповідних досліджень було б дуже доцільним для визначення доцільних стратегій модернізації, створення нових зразків, визначення показників ефективності, ризику застосування, визначення найкращих для прийняття на озброєння в Повітряних Силах, Сухопутних Військах та Військово-Морських Силах.

7. Висновки

В результаті проведених досліджень здійснена порівняльна оцінка багатокритеріальних задач оптимізації, критерії яких можуть відповідати чинникам, що відображають як кількісну, так і якісну ознаку. Обґрунтований метод аналізу ієрархій для вибору зразка БПЛ для прийняття на озброєння.

Проведено прогнозування значень ТТХ зразків БПЛ в умовах нестохастичної невизначеності на основі постановки експертизи та обробці експертних даних. Бінарні порівняння значень експертами представлено у вигляді матриць, що дозволяє визначити вектора пріоритетів та чисельну міру погодженості суджень експертів.

Обґрунтовано рішення щодо зразка БПЛ за прийнятими показниками з урахуванням вектора пріоритетів основних характеристик. Реалізований принцип синтезу, згідно якого визначено найбільше значення узагальненого показника з урахуванням нечіткої природи.

Література

1. Dunn, D. H. Drones: disembodied aerial warfare and the unarticulated threat [Text] / D. H. Dunn // International Affairs. – 2013. – Vol. 89, Issue 5. – P. 1237–1246. doi: 10.1111/1468-2346.12069
2. Living Under Drones: Death, Injury and Trauma to Civilians From US Drone Practices in Pakistan [Text]. – Stanford Law School, 2012. – 182 p. – Available at: <http://chrgj.org/wp-content/uploads/2012/10/Living-Under-Drones.pdf>
3. Хроника гражданской войны в Сирии [Электронный ресурс]. – WarOnline. – Режим доступа: <http://waronline.org>
4. Masood, S. C.I.A. Leaves Base in Pakistan Used for Drone Strikes [Text] / S. Masood // The New York Times. – 2011. – Available at:

<http://www.nytimes.com/2011/12/12/world/asia/cia-leaves-pakistan-base-used-for-drone-strikes.html>

5. Novichko, N. The area of operations from Afghanistan to Africa [Text] / N. Novichko // *Voенно-promyshlennyi kur'er*. – 2012. – Issue 6 (423). – Available at: <http://vpk-news.ru/articles/8619>

6. Абросимов, В. К. Групповое движение интеллектуальных летательных аппаратов в антагонистической бреду [Текст]: монография / В. М. Абросимов. – М.: Наука, 2013. – 250 с.

7. Мосов, С. П. Беспилотная разведывательная авиация стран мира: история создания, опыт боевого применения, современное состояние, перспективы развития [Текст]: монография / С. Н. Мосов. – К.: Изд. дом. “Румб”, 2008. – 160 с.

8. Про схвалення Стратегії розвитку вітчизняної авіаційної промисловості на період до 2020 року [Текст]. – Кабінет Міністрів України, 2008. – № 1656-р. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1656-2008-%D1%80>

9. Більчук, В. М. Метод формування доцільних стратегій модернізації та створення нових зразків озброєння [Текст] / В. М. Більчук // *Системи озброєння і військова техніка*. – 2006. – № 2. – С. 39–46.

10. Goncalves, F. S. Managing CPS Complexity: Design Method for Unmanned Aerial Vehicles [Text] / F. S. Goncalves, G. V. Raffo, L. B. Becker // *IFAC-PapersOnLine*. – 2016. – Vol. 49, Issue 32. – P. 141–146. doi: 10.1016/j.ifacol.2016.12.204

11. Zbrutsky, O. V. Unmanned aerial vehicles and technologies by NTUU “KPI” [Text] / O. V. Zbrutsky, O. V. Prokhorchuk, V. B. Kolesnichenko, O. P. Marynoshenko // 2013 IEEE 2nd International Conference Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments Proceedings (APUAVD). – 2013. doi: 10.1109/apuavd.2013.6705268

12. Moorkamp, M. Pioneering with UAVs at the battlefield: The influence of organizational design on self-organization and the emergence of safety [Text] / M. Moorkamp, J.-L. Wybo, E.-H. Kramer // *Safety Science*. – 2016. – Vol. 88. – P. 251–260. doi: 10.1016/j.ssci.2015.09.029

13. Alimpiev, A. The result of analyses of great classes unmanned aircraft for evaluation the opportunity of joint employment with army aviation [Text] / A. Alimpiev, M. Vatan et. al. // *Weapons systems and military equipment*. – 2016. – Issue 1. – P. 6–9.

14. Kuprijanova, V. S. State and prospects unmanned aerial vehicle in Ukraine [Text] / V. S. Kuprijanova, I. Ju. Matjushenko // *Journal of transport Economics and industry*. – 2015. – Issue 50. – P. 334–340.

15. Буренок, В. М. Развитие военных технологий XXI века: проблемы планирование, реализация [Текст] / В. М. Буренок, А. В. Ивлев. – Тверь: Издательство ООО «КУПОЛ», 2009. – 624 с.

16. Україна отримала партію безпілотних літальних апаратів від США [Текст]. – Міністерство оборони України, 2016. – Режим доступу:

<http://www.mil.gov.ua/news/2016/07/27/ukraina-otrimala-partiyu-bezpilotnih-litalnih-aparativ-vid-ssha-/>

17. Saaty, T. L. Structures in decision making: On the subjective geometry of hierarchies and networks [Text] / T. L. Saaty, H.-S. Shih // European Journal of Operational Research. – 2009. – Vol. 199, Issue 3. – P. 867–872. doi: 10.1016/j.ejor.2009.01.064

18. Митихин, В. Еще раз о корректности метода анализа иерархий. Т. 1 [Текст]: матер. IV межд. науч.-практ. конф. / В. Митихин // Фундаментальные и прикладные науки сегодня. – 2014. – С. 188–194.

19. Черноруцкий, Г. С. Методы принятия решений [Текст] / Г. С. Черноруцкий. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.

For reading only