

УДК 629.734

Данилюк І. А. ORCID: 0000-0003-0955-0108 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
Радченко М. М. ORCID: 0000-0002-8272-0727 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
Шаповал В. М. ORCID: 0000-0003-4637-9362 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
Сидоркін П. Г. ORCID: 0000-0003-2374-1402 (НДЦ ІСЗЗІ
НТУ України «КПІ ім. Ігоря Сікорського»)

МЕТОДИКА РАЦІОНАЛЬНОГО ВИБОРУ БЕЗПЛОТНОГО АВІАЦІЙНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ПОБУДОВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ АЕРОПЛАТФОРМ

Авіаційний ринок безпілотних авіаційних комплексів переповнений безпілотними апаратами, різноманітними за призначенням, класами, технічним рівнем і вартістю. Для вибору зразка безпілотного апарата, придатного для побудови телекомунікаційної аероплатформи, авторами запропонована методика, що вирішує завдання побудови телекомунікаційної аероплатформи як складової наземно-повітряної мережі систем радіозв'язку військового призначення з великою кількістю вагомих факторів.

З огляду на те, що при здійсненні вибору більшість дослідників у різних галузях схиляються до застосування методу аналізу ієрархій із залученням досвіду експертів у цих галузях, автори статті пропонують застосувати цей метод під час вибору варіанта безпілотного авіаційного комплексу для побудови зазначеної телекомунікаційної аероплатформи. В методиці виділені такі етапи аналізу ієрархій, як: визначення мети аналізу; визначення основних та варіантів; побудова дерева ієрархії від мети через параметри до варіантів; побудова матриць попарних порівнянь параметрів за метою та варіантів за параметрами; визначення ваг варіантів по системі ієрархії.

Наведені розрахунки здійснення вибору варіанта безпілотного авіаційного комплексу дозволили сформулювати наступні висновки: метод аналізу ієрархій відповідає потребі оперативного обґрунтування рішення щодо вибору варіанта безпілотного авіаційного комплексу для забезпечення виконання завдань телекомунікаційних аероплатформ при наявності групи експертів відповідної кваліфікації в галузі досліджень.

Напрямами подальших досліджень автори вважають можливість використання запропонованої методики для раціонального вибору обладнання (наприклад, безпілотного авіаційного комплексу) для розробки нових протоколів і алгоритмів функціонування самоорганізуючих радіомереж на основі безпілотних літальних апаратів.

Ключові слова: безпілотний авіаційний комплекс, метод аналізу ієрархій, телекомунікаційна аероплатформа, система зв'язку, управлінські рішення, вагові коефіцієнти.

I. Danyliuk, M. Radchenko, V. Shapoval, P. Sidorkin Method of rational choice of unmanned aircraft for construction of telecommunication aeroplatforms.

The aviation market of unmanned aerial systems is saturated with unmanned vehicles, diverse in their purpose, classes, technical level, and cost. To select a suitable unmanned aerial vehicle for building a telecommunication air platform, the authors propose a methodology that addresses the task of constructing a telecommunication air platform as part of the ground-air network of military communication systems with a multitude of significant factors.

Given that when making a choice, most researchers in various fields tend to employ the Analytic Hierarchy Process (AHP) method with expert involvement, the authors of this article recommend applying this method when selecting an unmanned aviation complex variant for constructing the aforementioned telecommunication air platform. The methodology consists of the following AHP stages: defining the analysis objective, identifying key parameters and variants, constructing a hierarchy tree from the objective through the parameters to the variants, creating matrices of pairwise comparisons for parameters by objective and variants by parameters, determining the weights of variants within the hierarchy system.

The provided calculations for choosing an unmanned aviation complex variant have led to the following conclusions: the Analytic Hierarchy Process method aligns with the need for an expeditious justification of decisions regarding the selection of an unmanned aviation complex variant to fulfill the tasks of telecommunication air platforms in the presence of a group of experts with relevant qualifications in the research field.

The authors consider the possibility of using the proposed methodology for the rational selection of equipment (for example, unmanned aerial vehicle) for the development of new protocols and algorithms for the functioning of self-organizing radio networks based on unmanned aerial vehicles as directions for further research.

Keywords: *unmanned aerial system, analytic hierarchy process, telecommunication aerial platform, communication system, management decisions, weighting factors.*

Постановка завдання у загальному вигляді

Одним із сучасних напрямів розроблення систем озброєнь у збройних силах різних країн, згідно з оглядом трендів розвитку перспективних видів озброєння [1; 2], є використання робототехніки й автономних безпілотних апаратів. Військово-політичним керівництвом країни наряду із заходами щодо раціонального розподілу військово-технічної допомоги між учасниками сил оборони для відсічі повномасштабного вторгнення РФ в Україну проводиться робота щодо синергії внутрішніх ресурсів і можливостей швидкого та безпечного виробництва безпілотних авіаційних комплексів (далі – БпАК) (під БпАК розуміється безпілотний літальний апарат та наземна станція керування ним) на потужностях різноманітних розробників.

Оснащення БпАК ретрансляторами радіосигналів перетворює їх в телекомунікаційні аероплатформи (далі – ТА). Застосування ТА в мережах зв'язку військового призначення дозволяє [3]:

- швидко (порівняно з наземними ретрансляторами) та незначними ресурсами (одиниці ТА) розширити зону функціонування мереж радіозв'язку військового призначення (територію виконання завдання бойовими підрозділами);

- покращити радіозв'язність між елементами мережі (радіозв'язок прямої видимості з більшою кількістю абонентів, можливість забезпечити зв'язність незв'язних компонент мережі, можливість забезпечити радіозв'язок між мобільними абонентами при їхньому значному віддаленні від основних сил або в умовах впливу РЕП противника тощо);

- значно покращити основні властивості (пропускну здатність, живучість, мобільність тощо) мережі зв'язку та характеристики процесу передачі інформації.

Отже, на сьогодні є актуальним наукове завдання щодо розробки методики раціонального вибору БпАК, необхідного для створення ТА з урахуванням багатьох варіантів вже розроблених БпАК, характеристик ретрансляторів радіосигналів, вимог до систем військового зв'язку та параметрів інформаційного обміну між органами управління та посадовими особами в сучасних бойових діях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Вибір варіанта БпАК для створення ТА пропонується здійснити з позицій системного підходу – шляхом дослідження об'єкта як цілісної множини елементів в сукупності відношень і взаємозв'язків між ними.

Під час синтезу раціонального варіанта ТА необхідно врахувати множину різних параметрів та факторів [4–7], таких як:

- технічні характеристики БпАК на відповідність вимогам бойового застосування підрозділів ЗСУ;

- технічні характеристики ретранслятора на їх відповідність вимогам інформаційного обміну системи військового зв'язку між мобільними абонентами (за пропускну здатністю, швидкістю передавання даних, типу трафіка тощо);

- необхідність забезпечення електромагнітної сумісності безпосередньо БпАК із обладнанням радіоретранслятора;

- необхідність оснащення ТА додатковим обладнанням (наприклад, антенами);

- конструктивні особливості щодо розміщення обладнання радіоретранслятора та додаткового обладнання тощо.

Крім того, вирішуючи завдання вибору БпАК для побудови ТА, необхідно врахувати велику кількість параметрів та різну їхню природу, тому пропонується використати методи експертної оцінки.

Завдання за обраною тематикою дослідження достатньо висвітлюються у публікаціях низкою авторів [8–11], як оціночні інструменти для багатокритеріальних задач із врахуванням

особливостей галузей застосування визнають доцільними саме експертні методи, де використовуються знання та досвід фахівців в обраній галузі.

Зважаючи на вищенаведене, авторами проаналізовано можливості використання експертних методів для вирішення поставленої задачі щодо раціонального вибору ТА на базі БпАК, які можна використовувати для отримання експертних оцінок [12; 13], а саме:

1. Метод Делфі. Цей метод використовується для отримання консенсусу серед групи експертів. Експерти надають свої оцінки певним питанням анонімно, а потім результати аналізуються і надсилаються їм для повторного розгляду. Процес повторюється до досягнення консенсусу.

2. Метод анкетування експертів. Експерти заповнюють анкети, де вони надають свої оцінки або ранжують альтернативи. Результати анкетування потім аналізуються для прийняття рішення.

3. Метод аналізу ієрархій (Analytic Hierarchy Process). Експерти порівнюють альтернативи попарно за допомогою шкали або оцінюють їх за певними критеріями. За допомогою математичних розрахунків визначається важливість кожної альтернативи.

4. Метод оцінки за допомогою експертних груп. Експерти збираються разом і обговорюють питання, що вимагають оцінки. Вони намагаються досягти консенсусу або приймають рішення на основі дискусії.

5. Метод вагових коефіцієнтів. Експерти надають числові вагові коефіцієнти кожному критерію або альтернативі відповідно до їхньої важливості. Потім проводяться обчислення для визначення сумарних оцінок.

6. Метод ранжування. Експерти ранжують альтернативи в порядку їхньої важливості або прийнятності.

7. Метод Борда. Експерти надають бали альтернативам відповідно до їхньої важливості, а потім сумують бали для кожної альтернативи.

8. Метод сценаріїв. Експерти розробляють різні сценарії розвитку подій та оцінюють їх вірогідність і наслідки.

9. Метод голосування. Експерти голосують за альтернативи або питання, і рішення приймається на основі голосів більшості.

10. Метод експертного судження. Експерти надають свої суб'єктивні оцінки на основі свого досвіду та знань.

Кожен із цих методів має свої переваги і недоліки та може бути застосованим залежно від конкретного контексту завдання. Важливо правильно підібрати метод експертних оцінок з урахуванням обставин і мети прийняття рішення.

Для вибору БпАК в якості ТА із перелічених методів експертної оцінки автори статті пропонують використати метод аналізу ієрархій (метод Сааті) [13], ґрунтуючись на наступних підставах:

1. Структурованість рішення. Метод ієрархій розкладає складне завдання вибору моделі БпАК на послідовні кроки та підзавдання. Це сприяє більш структурованому та системному підходу до прийняття рішення.

2. Узгодженість експертних оцінок. Цей метод дозволяє враховувати різні точки зору експертів і оцінки їхньої узгодженості, що допомагає уникнути суб'єктивних виборів і підвищує об'єктивність прийняття рішення.

3. Множинні критерії. Вибір моделі БпАК може бути визначений багатьма критеріями, такими як максимальна відстань, витрати, час роботи тощо. Метод Сааті дозволяє враховувати ці критерії та їхню важливість для кінцевого рішення.

4. Сприяє зростанню якості рішення. Враховуючи різні аспекти вибору та їхню важливість, метод Сааті допомагає зробити кращий вибір моделі БпАК, що відповідає специфікаціям проекту і потребам.

Автори вважають, що використанню методу Сааті властиві наступні недоліки:

1. Час та ресурси. Проведення аналізу ієрархій може вимагати значних зусиль, часу та ресурсів, особливо якщо задача дуже складна і велика кількість критеріїв та альтернатив. Даний недолік може бути вирішений завдяки достатнім розрахунковим можливостям сучасної комп'ютерної техніки, що нівелює цей недолік.

2. Суб'єктивність експертів. Результати методу Сааті можуть сильно залежати від обраної групи експертів. Якщо експерти недостатньо кваліфіковані або мають різний погляд, це може спричинити неточні результати. Цей недолік може бути усунений завдяки залученню досвідчених фахівців, які спеціалізуються саме на розробці БпАК в якості ТА.

3. Схильність до маніпуляцій. Можливість маніпуляції результатами аналізу ієрархій може виникнути, якщо деякі учасники намагаються вплинути на результати шляхом зміни їхніх оцінок або важливості критеріїв. Нівелюється шляхом сподівання на порядність залучених експертів.

4. Обмежена узгодженість. Деякі задачі можуть бути настільки складними, що досягнення узгодженості між оцінками може бути викликано важкістю порівняння різних альтернатив. Це нейтралізується завдяки порозумінню експертів у вибраних кількісних характеристиках моделей БпАК.

Публікацій за темою пошуку вибору шляхів підтримки управлінських рішень з використанням методу експертних оцінок, з огляду на важливість питання, існує достатня кількість.

Авторами [8] зазначено, що під час проектування і супроводження розподілених автоматизованих інформаційних систем потрібні інструменти комплексного оцінювання різних за своєю природою факторів якісного і кількісного характеру та врахування різних внутрішніх і зовнішніх зв'язків, а також виконано аналіз методів і процедур шкального оцінювання в задачах прийняття рішень. Комплексна оцінка представлена як узагальнена думка групи експертів про важливість (пріоритетність) конкретного об'єкта всередині деякої їхньої сукупності або про величину інтенсивності (концентрації) тієї чи іншої властивості об'єкта. Запропоновані числові шкали відношень Сааті дозволяють встановити відносні пріоритети важливості об'єктів – критеріїв і альтернатив рішень, що приймаються експертами. Ці шкали дозволяють експерту вибирати чисельні значення відношень переваги одного порівнюваного об'єкта перед іншим. Відмічено, що застосування методу аналізу ієрархій дає хороші результати при використанні дев'ятибальної шкали відношень у задачах прийняття рішень при проектуванні і супроводженні розподілених автоматизованих інформаційних систем.

У статті [9] наведено удосконалену методику вибору маршруту руху транспортного засобу для отримання максимального економічного ефекту під час доставки продукції від відправника до одержувача, а також описано застосування цієї методики на прикладі рішення практичної задачі. У процесі вдосконалення методики щодо вибору маршруту руху транспортного засобу для розвезення товару використовувався метод експертних оцінок, в якому 25 експертів визначали ранг кожного з критеріїв, що оцінювались. Зазначено, що метод експертних оцінок, який використано для раціонального вибору параметрів перевезення, суттєво зменшує витрати на транспортні послуги.

Автори статті [10] визначили шляхи розв'язання задачі раціонального вибору комплексу авторських засобів розробки курсів дистанційного навчання шляхом застосування методу аналізу ієрархій (далі – МАІ). Математична постановка задачі раціонального вибору комплексу передбачає побудову ієрархічної системи показників, що характеризують комплекс. А методика раціонального вибору авторських засобів згідно з методом аналізу ієрархій формує п'ять етапів розв'язання задачі вибору (порівняльної експертизи комплексу), а саме: з'ясування цілі дослідження, ієрархічну декомпозицію задачі, складання матриць

попарних порівнянь відносної важливості показників, формування локальних пріоритетів, експертизу. Зазначено, що розв'язання задачі множинного вибору за допомогою методу аналізу ієрархій є хоч і суб'єктивною процедурою особи, яка приймає рішення, але одночасно й відносно простим, доступним і ефективним для практичного використання методом щодо вибору комплексу авторських засобів розробки курсів дистанційного навчання.

В [11] наведено, що оцінка рівня кібербезпеки інформаційно-телекомунікаційного вузла (далі – ІТВ) відноситься до класу багатокритеріальних завдань і для її здійснення в умовах невизначеності, а також для аналізу та прогнозування ситуацій з великою кількістю вагомих факторів і для її здійснення найбільш доцільно застосовувати методи, в основі яких закладені судження експертів у галузі кібернетичного захисту. В методиці оцінки кібернетичної захищеності ІТВ автори запропонували застосувати метод анкетування, який є найвідомішим серед методів експертного оцінювання і дозволяє безпосередньо використовувати судження та інтуїцію експертів при оцінюванні захисту формалізованої структури ІТВ. Експертна оцінка попарних порівнянь вагових значень компонентів ІТВ, які захищаються, розраховують згідно з якісною шкалою Сааті. Отримання коефіцієнтів важливості компонент ІТВ здійснюється з використанням методу рангових оцінок. Чим більше ранг, тим більша вага тієї чи іншої компоненти ІТВ для захисту, а сума всіх значень коефіцієнтів дорівнює одиниці. Запропонована методика надає посадовим особам, які відповідальні за кібернетичну безпеку ІТВ, можливість отримувати кількісний показник рівня кіберзахищеності, що дасть забезпечити якісне прийняття рішень щодо рівня кібернетичної захищеності ІТВ у цілому.

Тому автори статті пропонують розглянути метод аналізу ієрархій (метод Сааті) як інструменту для вибору моделі БпАК в якості ТА.

Метою цієї статті є розробка методики раціонального вибору БпАК для побудови ТА як складової наземно-повітряної мережі (далі – НПМ) систем транкінгового радіозв'язку військового призначення для вирішення наступних завдань [3]: поєднання незв'язних НПМ, резервування існуючої мережі радіозв'язку, збільшення зони покриття мережі радіозв'язку тощо.

Виклад основного матеріалу

Для вирішення завдання щодо вибору БпАК для ТА можливо використовувати кількісні та якісні методи прийняття управлінських рішень [12]. Кількісні методи застосовують, коли фактори, що впливають на вибір рішення, можна кількісно визначити та оцінити, а якісні методи використовують, коли фактори, що визначають прийняття рішення, не можна кількісно охарактеризувати або взагалі не піддаються кількісному виміру. До якісних методів належать переважно експертні методи. В рамках мети даної статті автори пропонують застосувати МАІ на основі вагових коефіцієнтів [13]. Як відомо, цей метод є загальним методом розв'язання широкого класу слабо структурованих задач прийняття рішень в умовах наявності багатьох критеріїв і дозволяє поєднати математичний апарат із досвідом та інтуїцією особи, що бере участь у підготовці рішення. Для оцінки відносної величини факторів за допомогою парних порівнянь використовується досвід окремих експертів. Кожен із респондентів повинен порівняти відносну важливість між двома пунктами відповідно до спеціально розробленої анкети МАІ, яка становить від 1 до 9 градацій оцінки [13].

Для вирішення поставленої мети роботи пропонується методика раціонального вибору БпАК під платформу ТА, яка складається з наступних етапів.

Етап 1. Визначення вихідних даних. Дано:

1) Варіанти ТА:

- ТА на базі БпАК літакового типу (ТА-Л);
- ТА на базі БпАК гвинтокрильного типу (ТА-Г);
- ТА на базі аеростатного типу (ТА-А).

2) Групи характеристик ТА для визначення критеріїв щодо прийняття рішень експертами:

- а) льотно-технічні характеристики ТА (далі – ЛТХ);
- б) коефіцієнт економічності силової установки (далі – КЕСУ);
- в) характеристики обладнання БпАК (далі – ХОТА);
- г) характеристики радіоретранслятора (далі – ХР);
- д) електромагнітна сумісність електротехнічних модулів БпАК з режимами роботи радіоретранслятора (далі – ЕМС);
- е) ринкова та експлуатаційна вартість ТА (далі – В).

Більш детально розглянемо кожен групу показників:

а) льотно-технічні характеристики ТА:

- максимальна дальність польоту (км), бойовий радіус дії (км);
- тип та режим зльоту та посадки;
- злітна маса (кг);
- економічна (крейсерська) швидкість (км/год);
- максимальна та мінімальна швидкість (км/год);
- статична стеля (м);
- маса корисного навантаження (кг);
- стартова потужність двигуна (Вт);
- ємність основного акумулятора (А*год);
- номінальна напруга акумулятора (В);
- коефіцієнт допустимого розряду акумулятора;

б) коефіцієнт економічності силової установки – показник, який відображає ефективність перетворення вхідної енергії (наприклад, палива, електроенергії тощо) на корисну роботу, що виконується силовою установкою. Цей показник визначається співвідношенням між корисно витраченою енергією та загальною вхідною енергією, вираженою у відсотках і може бути від 0 % до 100 %. Корисна робота вказує на виконану корисну роботу, яка може бути механічною, електричною, тепловою або іншого типу, залежно від конкретного випадку. Вхідна енергія означає загальну енергію, витрачену на силову установку, наприклад, енергія палива, електроенергії тощо. Чим більший коефіцієнт ефективності, тим ефективніше силова установка використовує вхідну енергію для виконання корисної роботи та оцінюється експертами за шкалою від 1 до 9 градаций оцінки;

в) характеристики обладнання БпАК:

- характеристики систем навігації (GPS, ГЛОНАСС-NAVSTAR, інерціальна, гібридна);
- характеристики станції управління та контролю польоту (система повернення до міста базування, наявність програмного забезпечення для автоматизації рішення задач планування, розгортання та оперативного управління ТА тощо);
- характеристики каналу управління ТА з пункту управління (тип радіозасобу та параметри антени, діапазон частот, дальність дії, швидкість передачі даних, кількість закритих каналів, довжина ключів шифрування тощо);

г) характеристики радіоретранслятора:

- діапазон частот (МГц);
- кількість радіоканалів;
- вихідна потужність передавача (Вт);
- крок частотної сітки (кГц);
- напруга живлення (В);

- стабільність частоти (ppm);
- струм споживання при передачі (А);
- струм споживання при очікуванні (А);
- чутливість приймача (мкВ);
- протоколи інформаційного обміну;
- швидкості передачі при певних режимах роботи;
- характеристики антени (тип, розміри та ін.);
- габаритні розміри (мм × мм × мм);
- вага (г);

- д) електромагнітна сумісність електротехнічних модулів БпАК із режимами роботи радіоретранслятора. Цей аналіз здійснюється експертами шляхом якісної оцінки впливу електромагнітних полів на електронні компоненти, антени, системи навігації та інші елементи БпАК для подальшого визначення способів забезпечення оптимальної роботи БпАК в якості ТА в умовах різних електромагнітних впливів;
- е) ринкова та експлуатаційна вартість ТА – це вартість придбання та експлуатації ТА.

3) Оперативно-тактичні та технічні вимоги до ТА для виконання завдань по зв'язку певної ланки управління ЗСУ (задання граничних значень показників ТА).

4) Цільові функції призначення ТА (наприклад, забезпечення зв'язності мобільних абонентів у зоні радіопокриття певного радіуса, забезпечення пропускну здатності певної кількості абонентів не менше заданого значення, забезпечення певного часу встановлення зв'язку на заданій відстані від точки старту тощо).

Експертами у процесі реалізації запропонованої методики були задіяні автори цієї публікації.

Етап 2. *Формування ієрархії ухвалення рішення* (рис. 1).

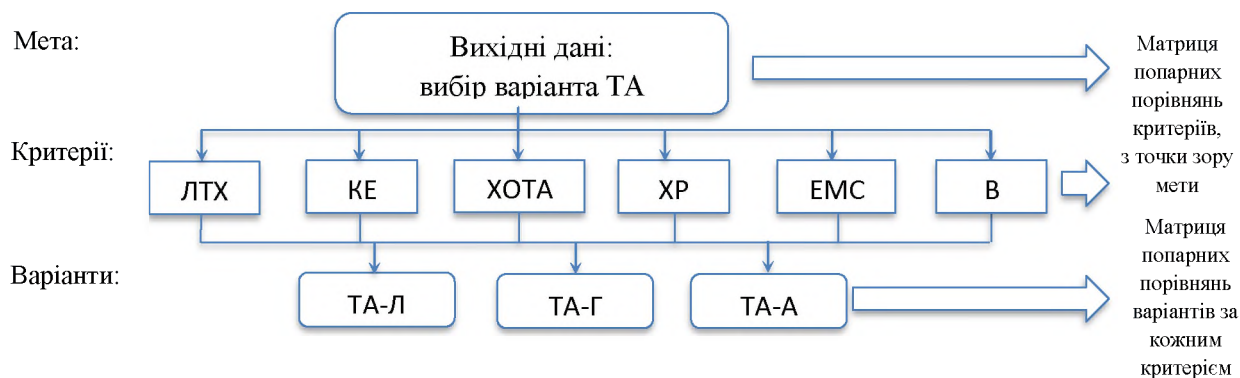


Рис. 1. Процес ухвалення рішення згідно з МАІ

Етап 3. *Побудова матриці попарних порівнянь критеріїв.*

3.1. Порівняння критеріїв за метою.

Експерти виконують попарне порівняння кожного з обраних критеріїв за якісною шкалою, з наступним перетворенням у бали:

- однаково, байдуже = 1;
- трохи краще (гірше) = 3 (1/3);
- краще (гірше) = 5 (1/5);
- значно краще (гірше) = 7 (1/7);
- принципово краще (гірше) = 9 (1/9).

При проміжній оцінці використовуються проміжні бали: 2, 4, 6, 8.

Складаємо матрицю, виходячи із умов:

a_{ij} – відношення критерію i до критерію j . $a_{ji} = 1/a_{ij}$, $a_{ii} = 1$.

Матриці за критеріями складаються так:

знаходимо суму елементів кожного стовпця за формулою: $S_j = a_{1j} + a_{2j} + \dots + a_{nj}$;

ділимо всі елементи матриці на суму елементів відповідного стовпця: $A_{ij} = \frac{a_{ij}}{S_j}$.

Ці дві дії називаються нормуванням матриці.

Знаходимо середнє значення для кожного рядка: виконуємо нормування за кожним критерієм (визначаємо вагу в долях).

Наприклад, у таблиці 1 представлено парні порівняння груп критеріїв згідно з прийнятою вище шкалою (експертами виступали автори статті).

Отримані стовпчики нормування (вага в долях та вага у відсотках) визначають «ваги» критеріїв із точки зору заданої мети. Ці стовпчики називають вагомими стовпчиками параметрів за метою.

З точки зору задоволення мети щодо виконання оперативно-тактичних та технічних вимог до ТА для виконання завдань по зв'язку певної ланки управління ЗСУ (задання граничних значень показників ТА) та досягнення цільової функції призначення ТА (забезпечення зв'язності мобільних абонентів у зоні радіопокриття певного радіуса, забезпечення пропускну здатності певної кількості абонентів не менше заданого значення, забезпечення певного часу встановлення зв'язку на заданій відстані), найбільш вагомими є критерії: за льотно-технічними характеристиками ТА (42,63 %); електромагнітною сумісністю електротехнічних модулів БПАК з режимами роботи ретранслятора (19,9 %); характеристик радіоретранслятора (16,27 %). Коефіцієнт економічності ТА має найменший ваговий коефіцієнт, який складає загалом 2,94 %.

Таблиця 1

Матриця попарних порівнянь критеріїв

Критерій ТА	ЛТХ	КЕСУ	ХОТА	ХР	ЕМС	В	Нормування	Нормування
							(вага в долях)	(вага в %)
ЛТХ	1,00	7,00	5,00	3,00	7,00	5,00	0,43	42,63%
КЕСУ	0,14	1,00	0,17	0,20	0,20	0,17	0,03	2,94%
ХОТА	0,20	6,00	1,00	0,33	0,20	0,25	0,07	7,37%
ХР	0,33	5,00	3,00	1,00	0,50	4,00	0,16	16,27%
ЕМС	0,14	5,00	5,00	2,00	1,00	4,00	0,20	19,90%
В	0,20	6,00	4,00	0,25	0,25	1,00	0,11	10,88%

3.2. Порівняння варіантів за критеріями.

Складаємо аналогічні матриці порівняння варіантів ТА за кожним критерієм (рис. 2).

Критерій ЛТХ	ТА-Л	ТА-Г	ТА-А	Критерій КЕСУ	ТА-Л	ТА-Г	ТА-А
ТА-Л	1,00	0,33	7,00	ТА-Л	1,00	0,33	0,13
ТА-Г	3,00	1,00	5,00	ТА-Г	3,00	1,00	0,20
ТА-А	0,14	0,20	1,00	ТА-А	8,00	5,00	1,00
Критерій ХОТА	ТА-Л	ТА-Г	ТА-А	Критерій ХР	ТА-Л	ТА-Г	ТА-А
ТА-Л	1,00	0,33	0,14	ТА-Л	1,00	0,20	0,33
ТА-Г	3,00	1,00	5,00	ТА-Г	5,00	1,00	3,00
ТА-А	7,00	0,20	1,00	ТА-А	3,00	0,33	1,00
Критерій ЕМС	ТА-Л	ТА-Г	ТА-А	Критерій В	ТА-Л	ТА-Г	ТА-А
ТА-Л	1,00	0,33	0,14	ТА-Л	1,00	0,33	0,13
ТА-Г	3,00	1,00	0,20	ТА-Г	3,00	1,00	0,17
ТА-А	7,00	5,00	1,00	ТА-А	8,00	6,00	1,00

Рис. 2. Матриці порівняння варіантів ТА за кожним критерієм

Критерій ЛТХ	ТА-Л	ТА-Г	ТА-А	Нормування (вага в долях)	Нормування (вага в %)
ТА-Л	1,00	0,33	7,00	0,33	33%
ТА-Г	3,00	1,00	5,00	0,59	59%
ТА-А	0,14	0,00	0,00	0,08	8%

Критерій КЕСУ	ТА-Л	ТА-Г	ТА-А	Нормування (вага в долях)	Нормування (вага в %)
ТА-Л	1,00	0,33	0,13	0,09	9%
ТА-Г	3,00	1,00	0,20	0,20	20%
ТА-А	8,00	5,00	1,00	0,82	82%

Критерій ХОТА	ТА-Л	ТА-Г	ТА-А	Нормування (вага в долях)	Нормування (вага в %)
ТА-Л	1,00	0,33	0,14	0,11	11%
ТА-Г	3,00	1,00	5,00	0,58	58%
ТА-А	7,00	0,20	1,00	0,31	31%

Критерій ХР	ТА-Л	ТА-Г	ТА-А	Нормування (вага в долях)	Нормування (вага в %)
ТА-Л	1,00	0,20	0,33	0,11	11%
ТА-Г	5,00	1,00	3,00	0,63	63%
ТА-А	3,00	0,33	1,00	0,26	26%

Критерій ЕМС	ТА-Л	ТА-Г	ТА-А	Нормування (вага в долях)	Нормування (вага в %)
ТА-Л	1,00	0,33	0,14	0,08	8%
ТА-Г	3,00	1,00	0,20	0,19	19%
ТА-А	7,00	5,00	1,00	0,72	72%

Критерій В	ТА-Л	ТА-Г	ТА-А	Нормування (вага в долях)	Нормування (вага в %)
ТА-Л	1,00	0,33	0,13	0,08	8%
ТА-Г	3,00	1,00	0,17	0,17	17%
ТА-А	8,00	6,00	1,00	0,75	75%

Рис. 3. Нормовані матриці порівняння варіантів за кожним критерієм для різних варіантів ТА

Проводимо нормування кожної із матриць кожного критерію за варіантами ТА й в результаті одержуємо стовпці (вектори) вагових коефіцієнтів різних варіантів ТА порівняно з поглядом відповідності окремим критеріям (рис. 3).

Аналіз порівняння варіантів ТА за обраними критеріями представлено у таблиці 2.

Таблиця 2

Порівняння варіантів ТА за обраними критеріями

Критерій	Варіанти ТА за вагомістю		
	Найбільш	Середньо	Найменш
ЛТХ	ТА-Г 59%	ТА-Л 33%	ТА-А 8%
КЕСУ	ТА-А 82%	ТА-Г 20%	ТА-Л 9%
ХОТА	ТА-Г 58%	ТА-А 31%	ТА-Л 11%
ХР	ТА-Г 63%	ТА-А 26%	ТА-Л 11%
ЕМС	ТА-А 72%	ТА-Г 19%	ТА-Л 8%
В	ТА-А 75%	ТА-Г 17%	ТА-А 8%

З таблиці 2 можна зробити наступні висновки щодо вибору варіанту ТА за отриманими критеріями: за критерієм ЛТХ найбільш вагомим є ТА-Г; за критерієм КЕСУ найбільш вагомим є ТА-А; за критерієм ХОТА найбільш вагомим є ТА-Г; за критерієм ХР найбільш

вагомим є ТА-Г; за критерієм ЕМС найбільш вагомим є ТА-А; за критерієм В найбільш вагомим є ТА-А.

Етап 4. Визначення ваг варіантів по системі ієрархії.

Внаслідок попередніх розрахунків порівняння результатів за обраними критеріями були сформовані:

- вектор ваг параметрів;
- матриця ваг варіантів за кожним критерієм, що складається з отриманих вагових стовпців.

Таблиця 3

Вектор ваг критеріїв за наступними характеристиками

	Нормування (вага в долях)
ЛТХ	0,43
КЕСУ	0,03
ХОТА	0,07
ХР	0,16
ЕМС	0,20
В	0,11

Таблиця 4

Матриця ваг варіантів за кожним критерієм

Варіанти / Критерії	ЛТХ	КЕСУ	ХОТА	ХР	ЕМС	В
ТА-Л	0,33	0,09	0,11	0,11	0,08	0,08
ТА-Г	0,59	0,20	0,58	0,63	0,19	0,17
ТА-А	0,08	0,82	0,31	0,26	0,72	0,75

Етап 6. Визначення ваг варіантів.

Знаходячи добуток матриці ваг варіантів за кожним критерієм (табл. 2) та вектором ваг критеріїв (табл. 3), отримуємо ваги варіантів із погляду досягнення мети (рис. 4):

$$\begin{pmatrix} 0,33 & 0,09 & 0,11 & 0,11 & 0,08 & 0,08 \\ 0,59 & 0,20 & 0,58 & 0,63 & 0,19 & 0,17 \\ 0,08 & 0,82 & 0,31 & 0,26 & 0,72 & 0,75 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0,43 \\ 0,03 \\ 0,07 \\ 0,16 \\ 0,20 \\ 0,11 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,19 \\ 0,46 \\ 0,35 \end{pmatrix}$$

Рис. 4. Розрахунок вектору ваг щодо вибору варіантів БпАК

Внаслідок обчислень отримуємо ваги варіантів із точки зору досягнення визначеної мети (табл. 5).

Таблиця 5

Таблиця вибору варіанту ТА за сукупністю обраних критеріїв (комплексного критерію)

Варіанти ТА	Вага в долях	Вага у %
ТА-Л	0,19	19%
ТА-Г	0,46	46%
ТА-А	0,35	35%

Отже, згідно із запропонованою методикою та обраними критеріями кращим варіантом виявився ТА на базі БпАК гвинтокрильного типу (ТА-Г), а найгіршим варіантом – ТА на базі БпАК літакового типу (ТА-Л).

Використання цієї методики доцільно розглядати під час створення дослідних зразків ТА підприємствами: Товариство з обмеженою відповідальністю “Укрспецсистемс”; Товариство з обмеженою відповідальністю науково-виробниче підприємство “Spaitech”; Державне підприємство “Чугуївський авіаційний ремонтний завод”; Науково-виробничий центр безпілотної авіації “Віраж”; Державне підприємство “Антонов”.

Кожен із наведених виробників мають досвід розробки БпАК та у випадку отримання ними технічного завдання на виготовлення такого комплексу потенційно спроможні створити БпАК в якості телекомунікаційної аероплатформи, визначеною в постановці завдання у загальному вигляді із необхідними характеристиками та показниками [13].

Висновки

Задача вибору варіанта БпАК для побудови ТА як повітряної складової системи зв'язку ЗС України відноситься до класу багатокритеріальних завдань, що здійснюються в умовах невизначеності з великою кількістю вагомих факторів. Тому, для досягнення мети вибору БпАК для побудови ТА запропоновано методику із застосуванням МАІ на основі вагових коефіцієнтів. Разом із перевагами (масштабованість як за кількістю критеріїв, так і за варіантами вибору, скорочення терміну між постановкою завдання і конкретним результатом) при застосуванні подібних методів варто назвати і недоліки, а саме: необхідно мати групу експертів відповідної кваліфікації в галузі досліджень та суб'єктивність оцінки, що зумовлена людським фактором особистості експерта.

Запропонована авторами методика може знайти своє застосування на підприємствах та в науково-дослідних організаціях, які вирішують завдання, пов'язані з розробкою ТА під задане функціональне призначення та з метою формування вимог та оцінки ефективності на етапі проектування, що може значно зменшити матеріальні та людські ресурси для виконання цього завдання.

Напрямок подальших досліджень автори вважають можливість використання запропонованої методики для раціонального вибору обладнання (наприклад, БпАК) для розробки нових протоколів і алгоритмів функціонування самоорганізуючих радіомереж на основі безпілотної літальних апаратів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кваша Т. К. Світові наукові та технологічні тренди у сфері забезпечення національної безпеки. Київ: УкрІНТЕІ, 2019. 107 с. URL: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/innovatsii-transfer-tehnologiy/2021/09/30/Svitovi.nauk.tekhn.trend.sfer.zabezp.nats.bezp-2019.30.09.pdf> (дата звернення: 27.06.2023).

2. Державний концерн «Укроборонпром» спільно з Генштабом Збройних сил України розробили програму розвитку безпілотної систем для Сил безпеки та оборони нашої держави (дата публікації: 26.08.2022) // Інтернет-портал концерну “Укроборонпром”. URL: <https://ukroboronprom.com.ua/news/ukroboronprom-spilno-z-genstabom-zsu-rozrobili-programu-rozvitku-bpla> (дата звернення: 27.06.2023).

3. Романюк В. А., Степаненко Є. О., Панченко І. В., Восколович О. І. Літаючі самоорганізуючі радіомережі // Збірник наукових праць ВІТІ. 2017. № 1. С. 104–114. URL: <https://journal.viti.edu.ua/index.php/cicst/romaniuk>.

4. Романюк В. А. Мережі MANET – основа побудови тактичних мереж зв'язку // IV науково-практичний семінар ВІТІ “Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення”. Київ: ВІТІ НТУУ “КПІ”. 2007. С. 15–28. URL: <https://journal.viti.edu.ua/index.php/cicst/romaniuk>.

5. Бондар Д. В., Гурник А. В., Литовченко А. О., Хижняк В. В., Шевченко В. Л., Ядченко Д. М. Застосування безпілотних авіаційних систем у сфері цивільного захисту: монографія. Київ, 2022. 312 с.
6. Илюшко В. М. Беспилотные летательные аппараты: методики приближенных расчетов основных параметров и характеристик // В. М. Илюшко, М. М. Митрахович, А. В. Самков и др.; под общ. ред. В. И. Силкова. Киев: ЦНИИ ВВТ ВС Украины, 2009. 302 с.
7. Катеринчук І. С., Балицький І. І. Інформаційна технологія обґрунтування раціональних значень параметрів застосування тактичних безпілотних літальних апаратів органу охорони державного кордону // Теорія та практика створення, розвитку і застосування високотехнологічних систем спеціального призначення з урахуванням досвіду антитерористичної операції: матеріали XXII Всеукраїнської науково-практичної конференції, м. Житомир, Житомирський військовий інститут ім. С. П. Корольова, 26 квітня 2018 р. С. 74–76.
8. Коломійцев О. В., Рябуха Ю. М., Калачова В. В., Третьяк В. Ф. Аналіз методів і процедур шкального оцінювання в задачах прийняття рішень при проектуванні і супроводженні розподілених автоматизованих інформаційних систем // International Forum: Problems and Scientific Solutions: матеріали 3-ї Міжнародної науково-практичної конференції, Австралія, м. Мельбурн, 26–28 квітня 2020 р. С. 250–259. URL: <https://ojs.ukrlogos.in.ua/index.php/interconf/article/view/2309> (дата звернення: 27.06.2023).
9. Поляков А. П., Галушак О. О., Галушак Д. О., Грабенко М. Д. Методика вибору рухомого складу, маршруту і графіка перевезення вантажів. машинобудування та транспорт // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. 2011. № 3. С. 1–10. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/288> (дата звернення: 27.06.2023).
10. Рябцев В. В., Тищенко М. Г. Методика рационального выбора комплекса авторских средств разработки курсов дистанционного обучения // Управляющие системы и машины. 2011. № 4. С. 72–77. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/82952/10-Riabtsev.pdf?sequence=1> (дата звернення: 27.06.2023).
11. Куцаев В. В., Радченко М. М. Методика оцінки кібернетичної захищеності інформаційно-телекомунікаційного вузла // Збірник наукових праць ВІПІ. Київ, 2018. Вип. 2. С. 67–76. URL: https://www.viti.edu.ua/index.php?view=coll_2018_2 (дата звернення: 27.06.2023).
12. Гевко І. Б. Методи прийняття управлінських рішень: підручник. 2009. 186 с.
13. Томас Саати Т. Принятие решений – Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 320 с.
14. Lav Gupta, Raj Jain, Gabor Vaszkun Survey of Important Issues in UAV Communication Networks, IEEE Communications Surveys and Tutorials, Volume PP, November 2015. DOI: 10.1109/COMST.2015.2495297.