

М. С. Скорецький, В. А. Каптур, О. Г. Іваненко, М. П. Гаврилюк

МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ПЕЛЕНГАЦІЇ ДЖЕРЕЛ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ

Показано складність вибору систем пеленгації джерел радіовипромінювання в процесі побудови системи ситуаційної обізнаності в умовах сучасної війни. Проведено аналіз досліджень і публікацій за темою статті. Запропоновано й описано методику оцінювання систем пеленгації джерел радіовипромінювання, яка ґрунтується на спрощеному методі аналізу ієрархій. Розглянуто підхід до визначення вагових коефіцієнтів на основі попарного порівняння критеріїв щодо їх застосування в конкретному експертному середовищі. Визначено критерії порівняння, виходячи з основних функціональних відмінностей різних систем пеленгації та їх особливостей із погляду експлуатаційно-технічних і сервісних параметрів, а також параметрів обслуговування. До складу критеріїв включено лише ті, що зазвичай висвітлені в публічних описах продуктів, які надаються виробником для загального ознайомлення. Формалізовано принципи оцінювання кожного із запропонованих критеріїв, що дозволяє безпосередньо перевести той чи інший технічний параметр у бальну оцінку. Крім того, описано алгоритм проведення обчислень із залученням відповідних експертів. Запропонована методика може бути використана як елемент системи багаторівневого оцінювання ефективності засобів електронної підтримки, зокрема для автоматизації процесу відбору технічних рішень під час розгортання засобів радіоелектронної розвідки в Силах оборони України. Показано, що наступним кроком у формуванні багаторівневої оцінки ефективності засобів електронної підтримки може стати проведення лабораторних досліджень для верифікації заявлених та фактичних характеристик того чи іншого виробу електронної підтримки.

Ключові слова: електронна підтримка; система пеленгації; радіоелектронна розвідка; джерело радіовипромінювання; метод аналізу ієрархій; критерій вибору; експертне оцінювання.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Бурхливий розвиток технологій електронної підтримки, який відбувся в останні роки на тлі зростання кількості та різноманітності джерел радіовипромінювання (ДРВ) в радіоелектронному спектрі, став причиною появи широкого масиву систем пеленгації, які відрізняються за принципами дії, технічними характеристиками та рівнем інтеграції до наявних перспективних систем ситуаційної обізнаності. Серед таких рішень можна відзначити системи від компаній Aaronia [1], Dedrone [2], а також продукти від Rohde & Schwarz [3], Thales [4] та інших виробників. У цих умовах питання вибору конкретної системи пеленгації для виконання певних оперативних завдань стає все більш складним. Для здійснення такого вибору сьогодні необхідно проводити комплексний аналіз, який враховує технічні

характеристики, економічну складову, умови експлуатації, необхідний рівень підготовки обслуговуючого персоналу та інші фактори.

Однак навіть проведенню такого аналізу мають передувати попередні дослідження, які ставлять за мету відсіяти заздалегідь недоцільні для розгляду варіанти, що не відповідають базовим вимогам ефективності, сумісності або адаптивності до конкретних умов застосування. Це дозволяє зосередити увагу на найбільш перспективних рішеннях та оптимізувати процес вибору системи пеленгації ДРВ для конкретних оперативних потреб.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Упродовж останнього десятиліття посилилася увага до систем пеленгації ДРВ як одного з ключових інструментів забезпечення радіоелектронної обстановки. У літературі все частіше розглядаються методи, що дозволяють об'єктивно оцінити ефективність таких систем залежно від умов застосування, конфігурації середовища, характеру сигналів та вимог до сумісності з наявними мережевими платформами. Зокрема, актуальним є питання комплексного багатокритерійного оцінювання пеленгаторів для їх подальшого впровадження в єдині системи управління та моніторингу.

У роботі [5] запропоновано методику вибору технологій для побудови телекомунікаційних мереж доступу, яка базується на багатокритерійному аналізі та ієрархічному підході до прийняття рішень. Хоча дослідження безпосередньо не стосується пеленгаційних систем, його методологічна частина – структурований підхід до ранжування варіантів із урахуванням широкого спектра критеріїв – є релевантною для завдань попереднього оцінювання ефективності систем пеленгації ДРВ. Особливо важлива ідея скорочення обсягу варіантів, які розглядаються, за рахунок ранньої фільтрації, що дозволяє зосередитися на найбільш доцільних рішеннях.

Окрему категорію становлять дослідження, присвячені технічним характеристикам й обмеженням сучасних систем пеленгації. Наприклад, у публікації [6] детально розглянуто впливи багатоприменності, фазових спотворень і перешкод на точність пеленгації, що критично важливо для розгортання систем у складній радіоелектронній обстановці. Автори в [7] додатково проаналізували широкий спектр методів локалізації в бездротових сенсорних мережах, які мають безпосереднє відношення до сучасних систем пеленгації, що часто будуються на модульному мережевому принципі.

У контексті оцінювання ефективності варто згадати роботи Рамушар Д. [8] і Сааті Т. [9], де описано застосування методу аналізу ієрархій (АНР) та його нечітких модифікацій до задач вибору технічних рішень. Такі підходи дозволяють формалізувати взаємодію експертів та інтегрувати якісні й кількісні оцінки в єдиний механізм пріоритезації. Це особливо важливо в умовах високої динаміки бойового середовища, де рішення мають прийматися швидко, але з урахуванням комплексу чинників: від мобільності до енергоспоживання.

Отже, сучасний науковий доробок дає підґрунтя для розроблення ефективної методики попереднього оцінювання систем пеленгації, яка поєднує технічні критерії з експлуатаційними умовами та економічними обмеженнями. Адаптація та спрощення багатокритерійних методів, як продемонстровано в [1], може суттєво покращити процес вибору та впровадження пеленгаційних рішень у військову практику.

Метою статті є розроблення методики оцінювання ефективності систем пеленгації ДРВ на базі спрощеного варіанта методу аналізу ієрархій [10–12].

Виклад основного матеріалу. Зазначена методика полягає в одержанні зваженого показника на основі бальних оцінок низки експлуатаційно-технічних критеріїв та їх вагових коефіцієнтів, обчислених шляхом їх попарного порівняння.

Особливістю вибраного підходу є те, що в ході проведення порівняльного аналізу відбувається взаємне обговорення деякої проблеми групою людей (експертів), при цьому кожен із них може висловлювати та модифікувати свої думки, у результаті чого обирається компромісний груповий висновок щодо певного критерію, який характеризує обговорювану проблему. У підсумку описаної вище взаємодії експертів у рамках експертної групи забезпечується об'єднання їх думок раціональним чином і, як результат, формування узагальненої оцінки того чи іншого критерію відносно конкретного об'єкта порівняння.

Для оцінювання ефективності систем пеленгації ДРВ застосовують лінійну згортку такого вигляду:

$$Q = \sum_{i=1}^n K_i B_i, \quad (1)$$

де K_i – ваговий коефіцієнт i -го критерію;

B_i – бальна оцінка i -го критерію.

Вагові коефіцієнти для заздалегідь прийнятих критеріїв обчислюють за методом їх попарного порівняння. Для цього формується порівняльна матриця A розміром $n \times n$ елементів a_{ij} , де кожний із них є результатом зваженого експертного порівняння i -го та j -го критеріїв. При цьому, якщо i -й критерій вважається експертами вагомим, ніж j -й, то елемент a_{ij} повинен дорівнювати 2 (у свою чергу, елемент a_{ji} має дорівнювати 0), а в разі, коли i -й критерій вважається менш вагомим, ніж j -й, то елемент a_{ij} повинен дорівнювати 0 (а a_{ji} має дорівнювати 2). Якщо ж i -й та j -й критерії вважаються рівнозначними, то елементи a_{ij} та a_{ji} повинні дорівнювати 1. Елементи головної діагоналі матриці дорівнюють 1. Приклад оформлення такої матриці наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Приклад оформлення матриці попарного порівняння критеріїв

	Критерій 1	Критерій 2	Критерій 3	...	Критерій n
Критерій 1	1	x	x	x	x
Критерій 2		1	X	x	x
Критерій 3			1	x	x
...				...	x
Критерій n					1

Отже, у результаті порівняння критеріїв одержуємо матрицю попарних порівнянь, значення елементів a_{ij} якої відображають суб'єктивний висновок експертів щодо важливості i -го критерію порівняно з j -м у конкретних умовах експертизи.

Для визначення вагових коефіцієнтів K_i i -го критерію необхідно знайти суму елементів матриці кожного рядка:

$$S_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}, \quad i = 1 \dots n, \quad (2)$$

де n – кількість критеріїв.

На наступному кроці необхідно обчислити загальну суму елементів матриці A :

$$S_k = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} = \sum_{i=1}^n S_i. \quad (3)$$

Нормоване значення вагового коефіцієнта K_i i -го критерію знаходимо за формулою

$$K_i = \frac{S_i}{S_k}, \quad i = 1 \dots n. \quad (4)$$

Для проведення порівняльного аналізу необхідно визначити критерії, відносно яких будемо порівнювати задані системи пеленгації ДРВ. Критерії оцінювання є об'єктивними та не залежать від суб'єктивної думки окремого фахівця під час оцінювання систем пеленгації ДРВ.

Аналіз сучасних технологічних рішень у сфері виявлення ДРВ [1–4] дозволяє виділити критерії та бальні діапазони (від 0 до 9) для здійснення оцінювання. Розглянемо їх детальніше.

1. Орієнтовна вартість мережі з 10 засобів (включно з таким допоміжним обладнанням: пеленгатори, радіомодуль, системи зв'язку й автономного живлення, комплекти для встановлення антенно-фідерних систем тощо). Визначення бальної оцінки відбувається відповідно до такої схеми: до 10 тис. дол. США (тут і далі – включно) – 9 балів; до 50 тис. дол. США – 8 балів; до 100 тис. дол. США – 7 балів; до 500 тис. дол. США – 6 балів; до 1 млн дол. США – 5 балів; до 5 млн дол. США – 4 бали; до 10 млн дол. США – 3 бали; до 25 млн дол. США – 2 бали; до 50 млн дол. США – 1 бал; більше 50 млн дол. США – 0 балів.

2. Діапазон робочих температур визначають як округлений до найближчого цілого значення результат суми значень за верхній та нижній діапазони робочих температур (у градусах Цельсія). Максимальна сума становить 9 балів. Маємо такий перелік значень: нижній поріг: (4) нижче -40°C ; (3,5) від -40°C ; (2,5) від -30°C ; (1,5) від -20°C ; (0,5) від -10°C ; верхній поріг: (0) від 0°C та вище; (0,5) до 25°C ; (1,5) до 35°C ; (2,5) до 45°C ; (3,5) до 55°C ; (5) вище 55°C .

3. Габаритні розміри зовнішнього штатного пристрою виявлення ДРВ (максимальне значення об'ємної або фактичної ваги) визначають як найбільшу з двох величин (фактична або об'ємна вага), розраховану за такою формулою: довжина * ширина * висота / 4000, при цьому величини вказано в сантиметрах [13]. Бальну оцінку встановлюють відповідно до такої схеми: до 5 кг (тут і далі – включно) – 9 балів; до 10 кг – 8 балів; до 20 кг – 7 балів; до 35 кг – 6 балів; до 50 кг – 5 балів; до 65 кг – 4 бали; до 80 кг – 3 бали; до 90 кг – 2 бали; до 100 кг – 1 бал; більше 100 кг – 0 балів.

4. Ступінь захисту оболонки (код IP), відповідно до міжнародних стандартів ІЕС 60529 (DIN 40050, ГОСТ 14254-96, ДСТУ EN 60529:2018) [14], визначають як округлений до найближчого цілого значення результат суми оцінок за першу цифру (характеризує, наскільки пристрій захищений від проникнення твердих предметів всередину корпусу), а також за другу цифру (наскільки він захищений від води). Максимальна сума – 9 балів. Перелік значень: для першої цифри: (0) IP 3X; (1) IP 4X; (2,5) IP 5X; для другої цифри: (4) IP 6X; (0,5) IP X1; (1) IP X2; (1,5) IP X3; (2) IP X4; (2,5) IP X5; (3) IP X6; (4) IP X7; (5) IP X8.

5. Максимально припустима відстань від антени до основного блоку й системи зв'язку, якої можна досягти з використанням штатних (що входять у комплект стандартного постачання) засобів підключення (між комплексом та робочим місцем оператора). Бальне оцінювання відбувається відповідно до такої схеми: більше 500 м – 9 балів; до 500 м (тут і далі – включно) – 8 балів; до 400 м – 7 балів; до 300 м – 6 балів; до 200 м – 5 балів; до 150 м – 4 бали; до 100 м – 3 бали; до 50 м – 2 бали; до 10 м – 1 бал; відстань дорівнює 0 м – 0 балів.

6. Оцінка складності інсталяції в людино-годинах (із розрахунку на один комплект) з урахуванням маскуванню комплексу. Бальне оцінювання здійснюють згідно з такою схемою: до 0,5 людиногодин (тут і далі – включно) – 9 балів; до 2 людиногодин – 8 балів; до 4 людиногодин – 7 балів; до 8 людиногодин – 6 балів; до 16 людиногодин – 5 балів; до 32 людиногодин – 4 бали; до 64 людиногодин – 3 бали; до 128 людиногодин – 2 бали; до 256 людиногодин – 1 бал; більше 256 людиногодин – 0 балів.

7. Наявність API (Application Programming Interface) [15]. Бальне оцінювання відбувається відповідно до такої схеми: API наявне, повністю достатнє для інтеграції із системами ситуаційної обізнаності [16], є можливість отримати зміни від виробника в разі появи нових вимог – 9 балів; API наявне, повністю достатнє для інтеграції із системою ситуаційної обізнаності, немає можливості модифікації API – 8 балів; резерв (застосовується на розсуд експерта) – 7 балів; резерв (застосовується на розсуд експерта) – 6 балів; API наявне, але дані потребують стороннього опрацювання (передаються фактичні записи сигналів або їх параметри, які потребують оброблення задля отримання конкретних пеленгацій) – 5 балів; резерв (застосовується на розсуд експерта) – 4 або 3 бали; немає наявного API, виробник готовий розробити в зрозумілі й гарантовані терміни – 2 бали; немає наявного API, виробник не надає засобів для інтеграції, вона можлива через нештатні засоби – 1 бал; немає наявного API, виробник не надає засобів для інтеграції, альтернативні методи інтеграції не відомі (або інформація відсутня) – 0 балів.

8. Індикацію / сигналізацію в разі виявлення цілі (ДРВ) визначають як зменшений на одиницю результат округлення до найбільшого цілого результату ділення добутку вибраних значень та десяти на суму всіх можливих значень, а саме: $\text{ROUND}((S * 10) / A) - 1$, де А – сума всіх можливих значень (36), S – сума вибраних значень. Якщо сума вибраних значень дорівнює нулю або параметри не визначені, то критерій оцінюється в 0 балів. Перелік значень: (1) вібросигналізація; (1) звукова сигналізація; (1) світлова сигналізація; (1) наявність РКС (рідкокристалічного) індикатора; (2) наявність графічного дисплея;

(2) відображення на дисплеї / екрані піктограми, що сигналізує про присутність ворожого БПЛА / БпАК; (3) визначення типу ДРВ (БПЛА, БпАК, РЕБ тощо); (4) відображення різновиду ДРВ («Орлан», «Ланцет», Zala, Mavic, Autel тощо); (4) відображення відстані до ДРВ; (5) відображення азимута на ДРВ; (6) відображення на екрані мапи та тріангуляційних направляючих; (6) відображення на екрані спектрограми (водоспаду).

9. Максимальна похибка відхилення пеленга для діапазону частот від 300 МГц до 6 ГГц (в ідеальних умовах). Бальне оцінювання відбувається відповідно до такої схеми: до $0,5^\circ$ (тут і далі – включно) – 9 балів; до $0,8^\circ$ – 8 балів; до $1,0^\circ$ – 7 балів; до $3,0^\circ$ – 6 балів; до $5,0^\circ$ – 5 балів; до $7,0^\circ$ – 4 бали; до $9,0^\circ$ – 3 бали; до $12,0^\circ$ – 2 бали; до $15,0^\circ$ – 1 бал; більше $15,0^\circ$ – 0 балів.

10. Діапазон робочих частот визначають як зменшений на одиницю результат округлення до найбільшого цілого результату ділення добутку вибраних значень та десяти на суму всіх можливих значень, а саме: $\text{ROUND}((S * 10) / A) - 1$, де A – сума всіх можливих значень (28), S – сума вибраних значень. Якщо сума вибраних значень дорівнює нулю або параметри не визначені, то критерій оцінюється в 0 балів. Перелік значень: (1) до 30 МГц; (2) від 30 МГц до 400 МГц; (6) від 400 МГц до 2 000 МГц; (6) від 2 000 МГц до 6 000 МГц; (4) від 6 000 МГц до 10 000 МГц; (3) від 10 000 МГц до 12 000 МГц; (3) від 12 000 МГц до 15 000 МГц; (2) від 15 000 МГц до 20 000 МГц; (1) більше 20 000 МГц.

11. Сектор ведення моніторингу розраховують як суму оцінок за горизонтальний кут охоплення (максимум 5 балів) та вертикальний кут охоплення (максимум 4 бали). Оцінку за горизонтальний кут охоплення визначають таким чином: $\text{ROUND}(G * 5 / 360^\circ)$, де G – заявлений виробником горизонтальний кут охоплення (максимальна величина становить 360°). Оцінку за вертикальний кут охоплення обчислюють у такий спосіб: $\text{ROUND}(V * 4 / 90^\circ)$, де V – заявлений виробником вертикальний кут охоплення (максимальна величина становить 90°).

12. Можливості щодо аналізу ДРВ, які працюють у режимі програмної перебудови робочої частоти (ППРЧ) [17], визначають як зменшений на одиницю результат округлення до найбільшого цілого результату ділення добутку вибраних значень та десяти на суму всіх можливих значень, а саме: $\text{ROUND}((S * 10) / A) - 1$, де A – сума всіх можливих значень (11), S – сума вибраних значень. Якщо сума вибраних значень дорівнює нулю або параметри не визначені, то критерій оцінюємо в 0 балів. Перелік значень: (2) виявлення сигналу з ППРЧ; (2) пеленгація сигналу з ППРЧ; (3) визначення декількох комплексів місцеположення та відображення координат ДРВ із ППРЧ на мапі в режимі реального часу з імовірністю не менше 0,85; (4) ідентифікація сигналів із ППРЧ. Якщо інформація відсутня, то 0 балів.

13. Можливість роботи в автоматичному режимі (детекцію) визначають як зменшений на одиницю результат округлення до найбільшого цілого результату ділення добутку вибраних значень та десяти на суму всіх можливих значень, а саме: $\text{ROUND}((S * 10) / A) - 1$, де A – сума всіх можливих значень (45), S – сума вибраних значень. Якщо сума вибраних значень дорівнює нулю або параметри не визначені, то критерій оцінюють в 0 балів. Перелік значень: (3) автоматичний розбір DJI drone ID [18]; (3) автоматичний розбір RID

[19]; (3) автоматичний розбір OpenDroneId [20]; (3) автоматичний пеленг дронів DJI (не drone ID); (2) автоматичний пеленг дронів AUTEL [21]; (2) автоматичний пеленг TBS [22]; (2) автоматичний пеленг ELRS [23]; (1) автоматичний пеленг analog Video 900 МГц; (2) автоматичний пеленг analog Video 1,2 ГГц; (1) автоматичний пеленг analog Video 2,4 ГГц; (2) автоматичний пеленг analog Video 5,8 ГГц; (3) автоматичний пеленг «Орлан 10»; (3) автоматичний пеленг «Орлан 30»; (3) автоматичний пеленг Zala / «Ланцет»; (2) автоматичний пеленг Supercam; (2) автоматичний пеленг Vector; (2) автоматичний пеленг Eleron; (2) автоматичний пеленг Orion; (2) автоматичний пеленг Merlin; (2) автоматичний пеленг Granat 1–4.

14. Супутникова система навігації (GNSS) [24] – це сукупність приладів, що забезпечують орієнтування об'єкта в просторі. Визначають як зменшений на одиницю результат округлення до найбільшого цілого результату ділення добутку вибраних значень та десяти на суму всіх можливих значень, а саме: $\text{ROUND}((S * 10) / A) - 1$, де A – сума всіх можливих значень (13), S – сума вибраних значень. Якщо сума вибраних значень дорівнює нулю або параметри не визначені, то критерій оцінюють у 0 балів. Перелік значень: (0) відсутня система навігації; (5) наявність системи GPS; (4) наявність системи ГЛОНАСС; (3) наявність системи Galileo; (1) наявність системи Beidou.

15. Смуга миттєвого огляду. Бальне оцінювання здійснюють відповідно до такої схеми: більше 200 МГц (тут і далі – включно) – 9 балів; більше 150 МГц – 8 балів; більше 100 МГц – 7 балів; більше 80 МГц – 6 балів; більше 60 МГц – 5 балів; більше 40 МГц – 4 бали; більше 20 МГц – 3 бали; більше 10 МГц – 2 бали; більше 5 МГц – 1 бал; менше 5 МГц – 0 балів.

16. Швидкість сканування діапазону частот (SCAN, SWEEP або інше). Бальну оцінку визначають відповідно до такої схеми: більше 1 ТГц (тут і далі – включно) – 9 балів; більше 100 ГГц – 8 балів; більше 10 ГГц – 7 балів; більше 1 ГГц – 6 балів; більше 100 МГц – 5 балів; більше 10 МГц – 4 бали; більше 1 МГц – 3 бали; більше 100 кГц – 2 бали; більше 10 кГц – 1 бал; менше 10 кГц – 0 балів.

17. Максимальна заявлена чутливість. Якщо чутливість приймача є різною в різних діапазонах, то використовують максимальне зі значень (саме чутливість приймача без застосування підсилювача). Бальне оцінювання відбувається відповідно до такої схеми: більше -170 dbm (тут і далі – включно) – 9 балів; більше -160 dbm – 8 балів; більше -150 dbm – 7 балів; більше -140 dbm – 6 балів; більше -130 dbm – 5 балів; більше -120 dbm – 4 бали; більше -110 dbm – 3 бали; більше -80 dbm – 2 бали; більше -60 dbm – 1 бал; менше -60 dbm – 0 балів.

18. Дальність виявлення (в ідеальних умовах прямої видимості) ДРВ із потужністю до 1 Вт у смузі частот до 40 МГц. Бальне оцінювання проводять відповідно до такої схеми: більше 80 км (тут і далі – включно) – 9 балів; до 80 км – 8 балів; до 70 км – 7 балів; до 50 км – 6 балів; до 30 км – 5 балів; до 20 км – 4 бали; до 10 км – 3 бали; до 7 км – 2 бали; до 3 км – 1 бал; до 0,5 км – 0 балів.

19. Час автономної роботи. Бальну оцінку визначають відповідно до такої схеми: більше 21 год. – 9 балів; до 21 год. (тут і далі – включно) – 8 балів; до 18 год. – 7 балів; до 15 год. – 6 балів; до 12 год. – 5 балів; до 9 год. – 4 бали; до 6 год. – 3 бали; до 3 год. – 2 бали; до 1 год. – 1 бал. Не комплектується засобами автономної роботи – 0 балів.

20. Наявність інтерфейсів та систем зв'язку, управління визначають як зменшений на одиницю результат округлення до найбільшого цілого результату ділення добутку вибраних значень та десяти на суму всіх можливих значень, а саме: $\text{ROUND}((S * 10) / A) - 1$, де A – сума всіх можливих значень (26), S – сума вибраних значень). Якщо сума вибраних значень дорівнює нулю або параметри не визначені, то критерій оцінюємо в 0 балів. Перелік значень: (1) 12/24/48 В постійного струму; (1) 240 В змінного струму; (1) 3G/4G-модем; (2) Ethernet PoE IEEE 802,3 bt; (2) GigE (10/100/1000 Base-T); (1) HDMI; (1) microSD (SDXC); (1) mSATA; (1) RJ45; (1) RS 232; (1) ВЧ-роз'єми; (2) USB 2.0 / USB 3.0; (2) клієнтський цифровий інтерфейс (GbE); (2) мережевий цифровий інтерфейси (GbE); (3) стільниковий зв'язок; (4) наявність додаткових інтерфейсів для віддаленого керування пеленгатором.

21. Можливості внутрішнього програмного забезпечення визначають як зменшений на одиницю результат округлення до найбільшого цілого результату ділення добутку вибраних значень та десяти на суму всіх можливих значень, а саме: $\text{ROUND}((S * 10) / A) - 1$, де A – сума всіх можливих значень (30), S – сума вибраних значень. Якщо сума вибраних значень дорівнює нулю або параметри не визначені, то критерій оцінюють у 0 балів. Перелік значень: (1) логування детекцій у внутрішній пам'яті; (2) формування звіту наявних детекцій; (3) збереження I/Q сигналів [25] у внутрішній пам'яті; (3) збереження I/Q сигналів у хмарному просторі; (8) наявність бази сигнатур та можливості автоматичної детекції сигналу та його класифікації; (5) можливість автоматичної пеленгації сигналів до XX мілісекунд; (4) множинне ведення цілей (більше чотирьох); (4) кількість діапазонів, у яких можна одночасно відстежувати цілі (не менше чотирьох).

У разі відсутності інформації за тим чи іншим критерієм встановлюється оцінка 0 балів. При цьому наприкінці оцінювання важливим є зазначення повноти отриманої для оцінювання інформації.

Аналіз результатів обчислення вагових коефіцієнтів за формулою (4) на основі матриці попарного порівняння та результати бального оцінювання критеріїв на базі експертних висновків для всіх систем пеленгації, а також виконання розрахункових операцій згідно з виразом (1) дозволяють зробити висновок щодо порівняння декількох об'єктів і вибрати найкращий із них. Зауважимо, що кількість балів (мінімум 0, максимум 9), присвоєних кожному критерію для кожного порівнюваного об'єкта, формується на основі досвіду фахівців (експертів) та з урахуванням показників (бажано задокументованих), що характеризують той чи інший об'єкт порівняння.

Висновки

1. Запропонована методика оцінювання ефективності систем пеленгації ДРВ на основі спрощеного методу аналізу ієрархій може бути покладена в основу системи багаторівневого оцінювання ефективності засобів електронної підтримки.

2. Критерії порівняння були сформовані з урахуванням функціональних відмінностей систем пеленгації, їх технічних, експлуатаційних та сервісних характеристик, що дозволяє адаптувати підхід до конкретних умов застосування.

3. Результати можуть бути використані для автоматизації процесу відбору технічних рішень у ході розгортання засобів радіоелектронної розвідки у військових або спеціальних

застосуваннях із урахуванням динаміки розвитку ворожих технічних засобів та конкретних умов.

Перспективи подальших досліджень. Наступним кроком у формуванні багаторівневого оцінювання ефективності засобів електронної підтримки може стати проведення лабораторних досліджень для верифікації заявлених та фактичних характеристик того чи іншого виробу електронної підтримки. Зокрема, із цією метою має бути розроблено методику лабораторних досліджень виробів для оцінювання рівня їх чутливості до сигналів типових ДРВ.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Aaronia AG. Direction Finding and Signal Monitoring Systems. URL: <https://www.aaronia.com> (last accessed: 25.05.2025).
2. Dedrone. Counter-Drone Technologies Overview. URL: <https://www.dedrone.com> (last accessed: 25.05.2025).
3. Rohde & Schwarz. Radio Monitoring and Direction Finding Systems. URL: <https://www.rohde-schwarz.com> (last accessed: 25.05.2025).
4. Thales Group. Electronic Warfare Solutions. URL: <https://www.thalesgroup.com> (last accessed: 25.05.2025).
5. Kaptur V., & Mammadov E. Methodology of Selecting Appropriate Technologies for Constructing Telecommunication Access Networks // PIC S&T. 2015. <https://doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2015.7357278>
6. Scaling Up MIMO: Opportunities and Challenges with Very Large Arrays / Rusek F., Persson D., Lau B. K., et al. // IEEE Signal Processing Magazine. 2013. Vol. 30 (1). P. 40–60. <https://doi.org/10.1109/msp.2011.2178495>
7. Mao G., Fidan B., & Anderson B. Wireless Sensor Network Localization Techniques // Computer Networks. 2007. Vol. 51 (10). P. 2529–2553. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2006.11.018>
8. Božanić D., Pamučar D., Čirović G. (2015). Modification of the AHP Using Fuzzy Logic for Decision Making in Military Logistics // Serbian Journal of Management. Vol. 10. P. 151–171. <https://doi.org/10.5937/sjm10-7223>
9. Saaty T. L. Decision Making for Leaders: The Analytic Hierarchy Process for Decisions in a Complex World. RWS Publications, 2008.
10. Saaty T. L. The Analytic Hierarchy Process. New York : McGraw-Hill, 1980. 287 p.
11. Ernest H. Forman, Saul I. Gass. The Analytic Hierarchy Process – An Exposition // Operations Research. 1983. Vol. 49, № 4. P. 469–486. <https://doi.org/10.1287/opre.49.4.469.11231>
12. Luis G. Vargas. An Overview of the Analytic Hierarchy Process and Its Applications // European Journal of Operational Research. 1990. Vol. 48, № 1. P. 2–8. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90056-h](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90056-h)
13. ICAO. Technical Instructions for the Safe Transport of Dangerous Goods by Air. Montreal: ICAO, 2021.

14. International Electrotechnical Commission. IEC 60529: Degrees of Protection Provided by Enclosures (IP Code). Geneva: IEC, 2013.
15. Fielding R. T. Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures. Dissertation. University of California, Irvine, 2000.
16. NATO. Federated Mission Networking – Interoperability Profiles. Ed. A, Version 1. NATO Standardization Office, 2021.
17. Mitola J. Cognitive Radio Architecture: The Engineering Foundations of Radio XML. Wiley, 2005. 473 p. <https://doi.org/10.1002/0471773735>
18. DJI. Drone ID and Remote Identification Overview. URL: <https://www.dji.com> (last accessed: 25.05.2025).
19. ASTM International. Standard Specification for Remote ID. ASTM F3411-22a, 2022.
20. OpenDroneID Working Group. Open Drone Identification Protocol. URL: <https://opendroneid.org> (last accessed: 25.05.2025).
21. Autel Robotics. EVO II Dual Series – RF Capabilities. URL: <https://autel drones.com> (last accessed: 25.05.2025).
22. Team BlackSheep. TBS Crossfire Technical Documentation. URL: <https://www.team-blacksheep.com> (last accessed: 25.05.2025).
23. ExpressLRS. Official Documentation. URL: <https://www.expresslrs.org> (last accessed: 25.05.2025).
24. GPS.gov. Global Positioning System Overview. URL: <https://www.gps.gov> (last accessed: 25.05.2025).
25. ITU. Technical Characteristics of I/Q Data Acquisition and Processing in Spectrum Monitoring. ITU-R SM.1875-0. Geneva, 2010.

Стаття надійшла до редакції 02.06.2025.

REFERENCES

1. Aaronia AG. *Direction Finding and Signal Monitoring Systems*. (n.d.). Retrived from <https://www.aaronia.com>
2. Dedrone. *Counter-Drone Technologies Overview*. (n.d.). Retrived from <https://www.dedrone.com>
3. Rohde & Schwarz. *Radio Monitoring and Direction Finding Systems*. (n.d.). Retrived from <https://www.rohde-schwarz.com>
4. Thales Group. *Electronic Warfare Solutions*. (n.d.). Retrived from <https://www.thalesgroup.com>
5. Kaptur, V., & Mammadov, E. (2015). Methodology of Selecting Appropriate Technologies for Constructing Telecommunication Access Networks. *PIC S&T*. <https://doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2015.7357278>
6. Rusek, F., Persson, D., & Lau, B. K. et al. (2013). Scaling Up MIMO: Opportunities and Challenges with Very Large Arrays. *IEEE Signal Processing Magazine*, 30 (1), 40–60. <https://doi.org/10.1109/msp.2011.2178495>
7. Mao, G., Fidan, B., & Anderson, B. (2007). Wireless Sensor Network Localization

- Techniques. *Computer Networks*, 51 (10), 2529–2553. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2006.11.018>
8. Božanić, D., Pamučar, D., & Ćirović, G. (2015). Modification of the AHP Using Fuzzy Logic for Decision Making in Military Logistics. *Serbian Journal of Management*, 10 (1), 151–171. <https://doi.org/10.5937/sjm10-7223>
9. Saaty, T. L. (2008). *Decision Making for Leaders: The Analytic Hierarchy Process for Decisions in a Complex World*. RWS Publications.
10. Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. New York : McGraw-Hill.
11. Ernest H. Forman, Saul I. Gass. (1983). The Analytic Hierarchy Process – An Exposition. *Operations Research*, 49, 4, 469–486. <https://doi.org/10.1287/opre.49.4.469.11231>
12. Luis G. Vargas. (1990). An Overview of the Analytic Hierarchy Process and Its Applications. *European Journal of Operational Research*, 48, 1, 2–8. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90056-h](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90056-h)
13. ICAO. (2021). *Technical Instructions for the Safe Transport of Dangerous Goods by Air*. Montreal.
14. *International Electrotechnical Commission. IEC 60529: Degrees of Protection Provided by Enclosures (IP Code)*. (2013). Geneva.
15. Fielding, R. T. (2000). *Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures*. Dissertation. University of California, Irvine.
16. NATO. (2021). *Federated Mission Networking – Interoperability Profiles*. Ed. A, Version 1. NATO Standardization Office.
17. Mitola, J. (2006). *Cognitive Radio Architecture: The Engineering Foundations of Radio XML*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/0471773735>
18. DJI. *Drone ID and Remote Identification Overview*. (n.d.). Retrived from <https://www.dji.com>
19. ASTM International. (2022). *Standard Specification for Remote ID*. ASTM F3411-22a.
20. OpenDroneID Working Group. (n.d.). *Open Drone Identification Protocol*. Retrived from <https://opendroneid.org>
21. Autel Robotics. (n.d.). *EVO II Dual Series – RF Capabilities*. Retrived from <https://autel drones.com>
22. Team BlackSheep. (n.d.). *TBS Crossfire Technical Documentation*. Retrived from <https://www.team-blacksheep.com>
23. ExpressLRS. (n.d.). *Official Documentation*. Retrived from <https://www.expresslrs.org>
24. GPS.gov. (n.d.). *Global Positioning System Overview*. Retrived from <https://www.gps.gov>
25. ITU. (2010). *Technical Characteristics of I/Q Data Acquisition and Processing in Spectrum Monitoring*. ITU-R SM.1875-0. Geneva.

M. S. Skoretskyi, V. A. Kaptur, O. G. Ivanenko, M. P. Havryliuk

ASSESSMENT METHODOLOGY FOR THE EFFECTIVENESS OF RADIO EMISSION DIRECTION-FINDING SYSTEMS

The article highlights the complexity of selecting direction-finding systems for radio emission sources in the process of building a situational awareness system under the conditions

of modern warfare. A thorough analysis of current research and publications relevant to the topic has been conducted. A methodology for evaluating direction-finding systems is proposed and described. This methodology is based on a simplified Analytic Hierarchy Process and is adapted for practical use in expert decision-making environments.

The approach includes determining weight coefficients through pairwise comparison of evaluation criteria, considering the context of specific expert environments. The selection of criteria is grounded in the key functional differences between various direction-finding systems, as well as their performance in terms of operational-technical characteristics, service-related parameters, and maintenance requirements. Only those criteria that are typically present in publicly available product descriptions provided by manufacturers for general reference have been included in the evaluation model.

Each criterion is formalized through clear evaluation principles, which allow for the direct conversion of a given technical parameter into a score-based rating. A detailed algorithm for performing calculations with the participation of subject matter experts is presented. The proposed methodology can serve as a component of a multi-level assessment system for the efficiency of electronic support measures. It also has practical application for automating the selection process of technical solutions during the deployment of electronic intelligence assets within the Defense Forces of Ukraine.

Furthermore, it is argued that a logical next step in the development of a comprehensive multi-level evaluation framework for electronic support measures would be the execution of laboratory-based research to verify the declared and actual characteristics of specific electronic support systems. This would significantly enhance the reliability of system selection processes and contribute to the operational readiness of defense technologies in real-world conditions.

Keywords: electronic support; direction-finding system; electronic intelligence; radio emission source; analytic hierarchy process; selection criteria; expert evaluation.