УДК 510.22, 330.42
https://doi.org/10.17721/1812-5409.2023/1.17

С. І. Колесник[1], *студ.*
М. В. Максюта[1], *к.ф.-м.н., доц.*
В. В. Обуховський[1], *д.ф.-м.н., проф.*

Порівняльний аналіз деяких систем ПРО/ППО за допомогою теорії нечітких множин

[1]Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 03187, м. Київ, пр-т. Глушкова 4г,
e-mail: ua.serhii.kolesnyk@gmail.com
e-mail: maksyuta.nik@gmail.com
e-mail: obukhovsky.v@gmail.com

S. I. Kolesnyk[1], *Stud.*
M. V. Maksyuta[1], *PhD., Associate Professor*
V. V. Obukhovsky[1], *Dr. of Sci., Professor*

Comparative analysis of some anti-missile defense/air defense systems using fuzzy set theory

[1]Taras Shevchenko National University of Kyiv, 03187, Kyiv, Glushkova avenue, 4g,
e-mail: ua.serhii.kolesnyk@gmail.com
e-mail: maksyuta.nik@gmail.com
e-mail: obukhovsky.v@gmail.com

Стаття присвячена проблемі використання систем ПРО/ППО для захисту критичної та військової інфраструктури під час військових дій. Звертається увага на те, що ці системи можуть піддаватися атакам та пошкодженням, що може призводити до значних втрат критичної інфраструктури. Для запобігання (або зменшення) цих втрат у даній роботі пропонується використовувати інформацію, яку можна одержати на основі порівняльного аналізу тактико-технічних характеристик використовуваних систем ПРО/ППО. Зокрема, на прикладі п'яти систем ПРО/ППО продемонстровано як можна здійснювати цей порівняльний аналіз за допомогою теорії нечітких множин.
Ключові слова: системи ПРО/ППО; критична та військова інфраструктура; зенітно-ракетний комплекс; техніко-економічний аналіз; нечіткі множини.

The article is devoted to the problem of using air defense / missile defense systems to protect critical and military infrastructure during hostilities. Attention is drawn to the fact that these systems can be attacked and damaged, which can lead to significant losses of critical infrastructure. To prevent (or reduce) these losses, this paper proposes to use information that can be obtained on the basis of a comparative analysis of the performance characteristics of the used air defense / missile defense systems. In particular, on the example of five such systems, it is demonstrated how this comparative analysis can be carried out using the theory of fuzzy sets (for this, the work considered inclusion operations, dominance relations, calculated the so-called linear and quadratic fuzzy indices, and also constructed various sets of α-levels).
Keywords: anti-missile defense/air defense systems; critical and military infrastructure; anti-aircraft missile complex; technical and economic analysis; fuzzy sets.

Статтю представив д.ф.-м.н., професор Савенков С.М.

Вступ

Проблема захисту критичної та військової інфраструктури за використанням систем протиракетної оборони/протиповітряної оборони (ПРО/ППО) стає основним завданням під час будь-яких військових дій. Внаслідок таких дій, розпочатих 24 лютого 2022 року, протиракетна оборонна система в Україні зазнала пошкоджень, що призвело до втрат радіолокаційних станцій та зенітно-ракетних комплексів (ЗРК). Такі втрати не можна компенсувати швидко, тому що на створення такого складного обладнання, як радіолокаційна станція, потрібно приблизно півтора року. Незважаючи на це, системи ПРО/ППО все-таки працюють і надають певний рівень захисту критичної інфраструктури. Проте для цього потрібно використовувати різні комплекси для відповідного збиття цілей.

З метою оптимального вибору відповідних систем ПРО/ППО в роботі показується як можна здійснювати порівняльний аналіз їх тактико-технічних характеристик за допомогою теорії нечітких множин. Вибір такої формальної мови, у першу чергу, обумовлений нечіткістю інформації (частіше її засекреченістю) щодо необхідних для проведення порівняльного аналізу техніко-економічних характеристик.

Необхідно зазначити, що результати цього аналізу можуть бути використані для покращення наявних систем ПРО/ППО та розробки нових. Наприклад, в результаті аналізу можна визначати найбільш ефективні комплекси. Крім того, можна визначати слабкі місця наявних систем, що дозволить спрямувати зусилля на їхнє поліпшення та підвищення надійності.

Отже, проведення технічного-економічного аналізу систем ПРО/ППО та подібних комплексів за допомогою теорії нечітких множин є актуальним та необхідним для забезпечення ефективного захисту критичної та військової інфраструктури. Результати аналізу можуть бути використані для покращення наявних систем та розробки нових, що дозволить забезпечити надійний захист від ворожих атак.

Оскільки інформація щодо систем ППО/ПРО не є загальнопоширеною, то літературних джерел недостатньо багато. Ми черпали інформацію із відкритих інтернет-ресурсів (проте достовірність цієї інформації може бути сумнівною). Стосовно ж літератури по використанню теорії нечітких множин для розглядуваного у даній статті аналізу, то авторам взагалі нічого не відомо.

Таким чином, тут вперше проводиться порівнювальний аналіз деяких систем ПРО/ППО на основі використання їх тактико-технічних характеристик (а також їх вартостей).

Короткий опис п’яти систем ПРО/ППО

Першою для розгляду вибираємо систему (або комплекс) “IRIS-T” SLM [1, 2]. Це – найсучасніша система ППО німецького виробництва. Її не мають ще навіть німецькі збройні сили. Цей комплекс розроблений німецькою оборонною компанією Diehl Defence. “IRIS-T” – комплекс ЗРК середнього радіусу дії, який призначений для знищення крилатих та балістичних ракет, а також літаків, гелікоптерів та безпілотних літальних апаратів. Основою ЗРК є модифіковані авіаційні ракети “IRIS-T” класу “повітря-повітря”. Пускові установки можуть мати колісне або гусеничне шасі та містять 4 направляючих або 8 контейнерів з ракетами для вертикального пуску (див. рис. 1а).

Другим нехай буде ЗРК “NASAMS” [3], до складу якого входять пускові установки, радіолокаційні станції (РЛС) Raytheon AN/MPQ-64F1 Sentinel від консорціуму Raytheon і Kongsberg. Фактично – це система ППО малої дальності й вона може збивати все в небі: від безпілотників до балістичних ракет і винищувачів. Кожна пересувна пускова установка має шість контейнерів із зенітними ракетами. Основним засобом виявлення повітряних об’єктів є РЛС “AN/MPQ-64”, яка виявляє повітряні цілі на відстані до 40 км. Цей ЗРК показаний на рис. 1б.

Третім ЗРК вважатимемо мобільний ракетний комплекс ПРО/ППО “MIM-23 HAWK” [4], який є комплексом середньої дальності. Він має три пускових установки M192 з трьома зенітними керованими ракетами MIM – 23B на кожній. Крім того, до його складу входять імпульсна РЛС вказівки AN/MPQ-50, радіолокаційний далекомір AN/MPQ – 51 тощо (див. рис. 1в).

Останнім із ЗРК, але не останнім з розглядуваних є ЗРК “Stormer HVM” (High Velocity Missile) [5] – ЗРК малої дальності. Він являє собою пускову установку ракет Starstreak або Martlet LMM з 8 контейнерами, що встановлені на броньовану гусеничну платформу Stormer. На даху машини встановлений панорамний (всеракурсний) приціл і система попередження про повітряну загрозу для розпізнавання цілей та визначення їх пріоритетності (рис. 1г).

Останнім комплексом для розгляду буде зенітна самохідна установка (ЗСУ) “Gepard” [6, 7]. Це – німецька установка, яка має автоматизовану систему управління ведення вогню. Вона під час стрільби враховує атмосферний тиск, температуру та вологість повітря, а також швидкість і напрямок вітру. Установка призначена для прикриття важливих об’єктів інфраструктури та військових підрозділів від атак гелікоптерів та літаків на малих і надмалих висотах. “Gepard” базується на шасі танка “Leopard 1” (див. рис. 1д).



а **б** **в**


г **д**

Рис. 1. Системи ПРО/ППО: а – ЗРК “IRIS-T” SLM, б – ЗРК “NASAMS”, в – ЗРК “MIM-23 HAWK”, г – ЗРК “Stormer HVM”, д – ЗСУ “Gepard”

З метою проведення порівняльного аналізу показаних на рис. 1 систем ПРО/ППО за допомогою використання теорії нечітких множин наводимо в табл. 1 їх тактико-технічні характеристики та їх вартості.

Таблиця 1

Тактико-технічні характеристики та вартість ЗРК/ЗСУ

ЗРК/ЗСУ Характеристики	ЗРК “IRIS-T”	ЗРК “NASAMS”	ЗРК “MIM-23 HAWK”	ЗРК “Stormer HVM”	ЗСУ “Gepard”
Дальня межа зони поразки, км	40	40	40	7	4
Ближня межа зони поразки, км	2,5	2,5	1	0,1	0,1
Мінімальна висота поразки, км	0,015	0,03	0,03	0,03	0,1
Максимальна висота поразки, км	20	16	18	7	3
Імовірність поразки однією ЗР	0,9 – 0,95	0,85	0,85	0,95	0,9
Швидкість цілі, м/с	1020	1000	900	1360	400
Кількість супроводжуваних цілей	8	6	3	1	1
Кількість ПУ у комплексі	3	3	3	6	4
Приблизна вартість, млн. дол.	156	202	109	200	54

Переходимо тепер до порівняльного розгляду цих систем ПРО/ППО за допомогою теорії нечітких множин, які вперше були введені в роботі [8].

Утворення нечітких підмножин для п’яти систем ПРО/ППО

Застосовуємо тепер теорію нечітких множин до тактико-технічних та вартісних характеристик (множина із дев’яти параметрів) розглядуваних п’яти систем ПРО/ППО. Для цього вводимо позначення для описаних вище систем ПРО/ППО за використанням перших великих літер латинського алфавіту: **A** – ЗРК “IRIS – T”; **B** – ЗРК “NASAMS”; **C** – ЗРК “MIM –23 HAWK”; **D** – ЗРК Stormer HVM”; **E** – ЗСУ “Gepard”.

Наступний крок пов’язаний із введенням позначень для тактико-технічних та вартісних характеристик. При цьому наводяться і найкращі числові значення цих параметрів, на яких характеристичній функції приналежності (див. [1]) присвоюється максимальне значення 1 з інтервалу приналежності [0, 1]. Слід зазначити, що, якщо найкраще числове значення – це максимум серед однойменних характеристик, то характеристична функція на даному числовому інтервалі набуває одиничне значення. Якщо ж найкращим значенням вважатиметься мінімальне значення серед всіх однойменних характеристик, то тоді характеристичній функції присвоюється одиничне значення на оберненій числовій величині.

Отже, як видно з табл. 1, найкращими значеннями у множині тактико-технічних та вартісних характеристик є такі: 1) x_1 – дальня зона поразки аеродинамічної цілі – 40 км; 2) x_2 – ближня зона поразки аеродинамічної цілі – 0,1 км; 3) x_3 – максимальна висота поразки аеродинамічної цілі – 20 км; 4) x_4 – мінімальна висота поразки аеродинамічної цілі – 0,015 км; 5) x_5 – імовірність поразки однією ЗР аеродинамічної цілі – 0,95); 6) x_6 – швидкість цілі, яку можна поразити – 1360 м/с; 7) x_7 – кількість супроводжуваних та обстрілюваних цілей – 8); 8) x_8 – кількість ПУ у комплексі – 6); 9) x_9 – вартість системи ПРО/ППО – 54 млн. дол.

З урахуванням цих позначень після розрахунку характеристичних функцій приналежностей $\mu_{\underset{\sim}{\mathbf{A}}}(x_i)$, $\mu_{\underset{\sim}{\mathbf{B}}}(x_i)$, $\mu_{\underset{\sim}{\mathbf{C}}}(x_i)$, $\mu_{\underset{\sim}{\mathbf{D}}}(x_i)$, $\mu_{\underset{\sim}{\mathbf{E}}}(x_i)$ (обчислюються прості пропорції) для кожної із дев'яти характеристик кожній із п'яти систем ПРО/ППО зіставляються такі нечіткі підмножини:

$$\underset{\sim}{\mathbf{A}}=\{(x_1\,|\,1),(x_2\,|\,0,04),(x_3\,|\,1),(x_4\,|\,1),(x_5\,|\,0,97),(x_6\,|\,0,75),(x_7\,|\,1),(x_8\,|\,0,5),(x_9\,|\,0,33)\}. \quad (1)$$

$$\underset{\sim}{\mathbf{B}}=\{(x_1\,|\,1),(x_2\,|\,0,04),(x_3\,|\,0,5),(x_4\,|\,0,8),(x_5\,|\,0,9),(x_6\,|\,0,74),(x_7\,|\,0,75),(x_8\,|\,0,5),(x_9\,|\,0,27)\}. \quad (2)$$

$$\underset{\sim}{\mathbf{C}}=\{(x_1\,|\,1),(x_2\,|\,0,1),(x_3\,|\,0,5),(x_4\,|\,0,9),(x_5\,|\,0,9),(x_6\,|\,0,66),(x_7\,|\,0,38),(x_8\,|\,0,5),(x_9\,|\,0,5)\}. \quad (3)$$

$$\underset{\sim}{\mathbf{D}}=\{(x_1\,|\,0,18),(x_2\,|\,1),(x_3\,|\,0,5),(x_4\,|\,0,35),(x_5\,|\,1),(x_6\,|\,1),(x_7\,|\,0,13),(x_8\,|\,1),(x_9\,|\,0,27)\}. \quad (4)$$

$$\underset{\sim}{\mathbf{E}}=\{(x_1\,|\,0,1),(x_2\,|\,1),(x_3\,|\,0,15),(x_4\,|\,0,15),(x_5\,|\,95),(x_6\,|\,29),(x_7\,|\,0,13),(x_8\,|\,67),(x_9\,|\,1)\}. \quad (5)$$

Далі буде продемонстровано, що за допомогою одержаних нечітких підмножин (1) – (5) набагато легше та швидше порівнювати тактико-технічні характеристики різних систем ПРО/ППО (як із урахуванням характеристики вартості, так і без неї) у порівнянні з неформалізованим аналізом. Інший аргумент використання нечітких множин (особливо у військовій справі) пов'язаний з тим, що часто інформація щодо деяких характеристик має наближений (імовірнісний, а у деяких випадках і засекречений характер). У наступному пункті за використанням простих операцій (див. попередній пункт) і проводиться порівняльний аналіз розглядуваних систем ПРО/ППО, яким зіставляються нечіткі підмножини (1) – (5).

Порівняльний аналіз систем ПРО/ППО за допомогою операцій із теорії нечітких множин

Достатньо простий аналіз систем ПРО/ППО за допомогою теорії нечітких множин вже можна провести за допомогою простої операції включення, пов'язаної безпосередньо з відношенням домінування [9]. Як видно з формул (1) і (2), підмножина $\underset{\sim}{\mathbf{B}}$ строго включається у множину $\underset{\sim}{\mathbf{A}}$, тобто $\underset{\sim}{\mathbf{B}} \subset\subset \underset{\sim}{\mathbf{A}}$. Це, дійсно, так, оскільки серед нерівностей $\mu_{\underset{\sim}{\mathbf{B}}}(x_i) \le \mu_{\underset{\sim}{\mathbf{A}}}(x_i)$ є й строгі (ще говорять, що множина $\underset{\sim}{\mathbf{A}}$ домінує над множиною $\underset{\sim}{\mathbf{B}}$). З іншими ж нечіткими підмножинами підмножину $\underset{\sim}{\mathbf{A}}$ не можна порівнювати.

Інших відношень домінувань між нечіткими підмножини $\underset{\sim}{\mathbf{A}}$, $\underset{\sim}{\mathbf{B}}$, $\underset{\sim}{\mathbf{C}}$, $\underset{\sim}{\mathbf{D}}$, $\underset{\sim}{\mathbf{E}}$ не спостерігається. Це означає, що ідеальний комплекс може існувати лише теоретично. Із цього короткого аналізу слідує, що комплекс **A** (далі будемо комплекси називати коротко, користуючись введеними для них позначеннями) може виконувати ті ж самі задачі краще, ніж комплекс **B**, маючи при цьому меншу вартість.

Із формул (1) – (5) можна також бачити, що для нечітких підмножин $\underset{\sim}{\mathbf{A}}$, $\underset{\sim}{\mathbf{B}}$, $\underset{\sim}{\mathbf{C}}$, $\underset{\sim}{\mathbf{D}}$, $\underset{\sim}{\mathbf{E}}$, із яких виключені, наприклад, елементи x_6, x_7, x_8, з'являється ще одне відношення домінування:

тепер і комплекс **C** домінує над комплексом **B**, маючи при цьому меншу вартість, ніж комплекс **A**. Якщо ж виключити і елемент x_9, який є характеристикою вартості, то з'являється ще домінування комплексу **D** над комплексом **E**. Таким чином, і в цих випадках абсолютне домінування одного комплексу над усіма іншими не існує.

Можна і далі розглядати різні варіанти щодо пошуку нових домінувань. Проте існують й інші операції маніпулювання з нечіткими підмножинами, які є більш чутливими до значень характеристичних функцій приналежностей на елементах x_i.

Розраховуємо, наприклад, лінійні та квадратичні індекси нечіткостей. Для цього, у відповідності з критерієм

$$\mu_{\underset{\approx}{\mathbf{A}}}(x_i)=\begin{cases} 0, & \mu_{\underset{\sim}{\mathbf{A}}}(x_i)<0{,}5, \\ 1, & \mu_{\underset{\sim}{\mathbf{A}}}(x_i)>0{,}5, \\ 0 \text{ або } 1, & \mu_{\underset{\sim}{\mathbf{A}}}(x_i)=0{,}5, \end{cases}$$

(див. [9]), виписуємо звичайні підмножини $\underset{\approx}{\mathbf{A}}$, $\underset{\approx}{\mathbf{B}}$, $\underset{\approx}{\mathbf{C}}$, $\underset{\approx}{\mathbf{D}}$ і $\underset{\approx}{\mathbf{E}}$, які розташовані на найменших евклідових відстанях від відповідних нечітких підмножин $\underset{\sim}{\mathbf{A}}$, $\underset{\sim}{\mathbf{B}}$, $\underset{\sim}{\mathbf{C}}$, $\underset{\sim}{\mathbf{D}}$ і $\underset{\sim}{\mathbf{E}}$.

$$\underset{\approx}{\mathbf{A}}=\{(x_1\,|\,1),(x_2\,|\,0),(x_3\,|\,1),(x_4\,|\,1),(x_5\,|\,1),(x_6\,|\,1),(x_7\,|\,1),(x_8\,|\,1),(x_9\,|\,0)\}. \tag{6}$$

$$\underset{\approx}{\mathbf{B}}=\{(x_1\,|\,1),(x_2\,|\,0),(x_3\,|\,1),(x_4\,|\,1),(x_5\,|\,1),(x_6\,|\,1),(x_7\,|\,1),(x_8\,|\,1),(x_9\,|\,0)\}. \tag{7}$$

$$\underset{\approx}{\mathbf{C}}=\{(x_1\,|\,1),(x_2\,|\,0),(x_3\,|\,1),(x_4\,|\,1),(x_5\,|\,1),(x_6\,|\,1),(x_7\,|\,0),(x_8\,|\,1),(x_9\,|\,1)\}. \tag{8}$$

$$\underset{\approx}{\mathbf{D}}=\{(x_1\,|\,0),(x_2\,|\,1),(x_3\,|\,1),(x_4\,|\,0),(x_5\,|\,1),(x_6\,|\,1),(x_7\,|\,0),(x_8\,|\,1),(x_9\,|\,0)\}. \tag{9}$$

$$\underset{\approx}{\mathbf{E}}=\{(x_1\,|\,0),(x_2\,|\,1),(x_3\,|\,0),(x_4\,|\,0),(x_5\,|\,1),(x_6\,|\,0),(x_7\,|\,0),(x_8\,|\,1),(x_9\,|\,1)\}. \tag{10}$$

За формулами $d\left(\underset{\sim}{\mathbf{A}},\underset{\sim}{\mathbf{B}}\right)=\sum_{i=1}^{n}\left|\mu_{\underset{\sim}{\mathbf{A}}}(x_i)-\mu_{\underset{\sim}{\mathbf{B}}}(x_i)\right|$ і $e\left(\underset{\sim}{\mathbf{A}},\underset{\sim}{\mathbf{B}}\right)=\sum_{i=1}^{n}\left[\mu_{\underset{\sim}{\mathbf{A}}}(x_i)-\mu_{\underset{\sim}{\mathbf{B}}}(x_i)\right]^2$ знаходимо відстані Хеммінга та евклідові відстані між відповідними підмножинами $\underset{\sim}{\mathbf{A}}$, $\underset{\sim}{\mathbf{B}}$, $\underset{\sim}{\mathbf{C}}$, $\underset{\sim}{\mathbf{D}}$, $\underset{\sim}{\mathbf{E}}$ та $\underset{\approx}{\mathbf{A}}$, $\underset{\approx}{\mathbf{B}}$, $\underset{\approx}{\mathbf{C}}$, $\underset{\approx}{\mathbf{D}}$, $\underset{\approx}{\mathbf{E}}$ [9]. Після цього за формулами $\nu\left(\underset{\sim}{\mathbf{A}}\right)=\frac{2}{n}d\left(\underset{\sim}{\mathbf{A}},\underset{\approx}{\mathbf{A}}\right)$ і $\eta\left(\underset{\sim}{\mathbf{A}}\right)=\frac{2}{\sqrt{n}}e\left(\underset{\sim}{\mathbf{A}},\underset{\approx}{\mathbf{A}}\right)$ (див. [9]) обчислюємо лінійні $\nu\left(\underset{\sim}{\mathbf{A}}\right)$, $\nu\left(\underset{\sim}{\mathbf{B}}\right)$, $\nu\left(\underset{\sim}{\mathbf{C}}\right)$, $\nu\left(\underset{\sim}{\mathbf{D}}\right)$, $\nu\left(\underset{\sim}{\mathbf{E}}\right)$ та квадратичні $\eta\left(\underset{\sim}{\mathbf{A}}\right)$, $\eta\left(\underset{\sim}{\mathbf{B}}\right)$, $\eta\left(\underset{\sim}{\mathbf{C}}\right)$, $\eta\left(\underset{\sim}{\mathbf{D}}\right)$, $\eta\left(\underset{\sim}{\mathbf{E}}\right)$ індекси нечіткостей (див. табл. 2).

Таблиця 2

Лінійні та квадратичні індекси нечіткостей для використовуваних систем ПРО/ППО

Комплекси ПРО/ППО	ЗРК "IRIS – T"	ЗРК "NASAMS"	ЗРК "MIM – 23 HAWK"	ЗРК "Stormer HVM"	ЗСУ "Gepard"
ν	0,26	0,47	0,56	0,32	0,27
η	0,43	0,53	0,67	0,47	0,34

Як видно із табл. 2, лінійні індекси нечіткостей для ЗРК "IRIS – T" і ЗСУ "Gepard майже збігаються. Задаємось запитанням: на що це може вказувати? Як випливає із теорії нечітких множин [9], має місце така цікава властивість:

$$\forall x_i\in\mathbf{E}:\left|\mu_{\underset{\sim}{\mathbf{A}}}(x_i)-\mu_{\underset{\approx}{\mathbf{A}}}(x_i)\right|=\mu_{\underset{\sim}{\mathbf{A}}\cap\overline{\underset{\sim}{\mathbf{A}}}}(x_i). \tag{11}$$

Очевидно, що з рівності (11) випливають ще дві такі еквівалентні формули для розрахунку лінійного індексу нечіткості:

$$\nu\left(\underset{\sim}{\mathbf{A}}\right)=\frac{2}{n}\sum_{i=1}^{n}\mu_{\underset{\sim}{\mathbf{A}}\cap\overline{\underset{\sim}{\mathbf{A}}}}\left(x_i\right), \tag{12}$$

$$\nu\left(\underset{\sim}{\mathbf{A}}\right)=\frac{2}{n}\sum_{i=1}^{n}\mathrm{MIN}\left(\mu_{\underset{\sim}{\mathbf{A}}}\left(x_i\right),\mu_{\overline{\underset{\sim}{\mathbf{A}}}}\left(x_i\right)\right). \tag{13}$$

Із формули (12) видно, що має місце така (важлива для нашого подальшого аналізу) формула:

$$\nu\left(\underset{\sim}{\mathbf{A}}\right)=\nu\left(\overline{\underset{\sim}{\mathbf{A}}}\right). \tag{14}$$

Отже, на основі формули (14) можна констатувати, що між комплексами **A** і **E** проявляється відношення достатньо близького взаємного доповнення, незважаючи на те, що строгого доповнення нечіткої підмножини $\underset{\sim}{\mathbf{A}}$ до нечіткої підмножини $\underset{\sim}{\mathbf{E}}$ (і навпаки), як видно із формул (1) і (5), не існує. Також, як видно із табл. 2, у якійсь мірі, взаємно доповнюють один одного і зенітно-ракетні комплекси “NASAMS” та “MIM – 23 HAWK”.

Для встановлення нових властивостей нечітких підмножин $\underset{\sim}{\mathbf{A}}$, $\underset{\sim}{\mathbf{B}}$, $\underset{\sim}{\mathbf{C}}$, $\underset{\sim}{\mathbf{D}}$ і $\underset{\sim}{\mathbf{E}}$ необхідно побудувати для них так звані звичайні підмножини α-рівнів. Наприклад, для нечіткої підмножини $\underset{\sim}{\mathbf{A}}$ підмножина α-рівня визначається так:

$$\mathbf{A}_{\alpha}=\left\{x_i\,\middle|\,\mu_{\underset{\sim}{\mathbf{A}}}\left(x_i\right)\geq\alpha\right\}. \tag{15}$$

Аналогічно будуються й інші підмножини $\mathbf{B}_{\alpha}$, $\mathbf{C}_{\alpha}$, $\mathbf{D}_{\alpha}$ і $\mathbf{E}_{\alpha}$.

Для значень $\alpha\in\{0{,}25;\,0{,}5;\,0{,}75\}$ на рис. 2 побудовані гістограми, за допомогою яких можна проводити наглядний аналіз поведінки нечітких підмножин $\underset{\sim}{\mathbf{A}}$, $\underset{\sim}{\mathbf{B}}$, $\underset{\sim}{\mathbf{C}}$, $\underset{\sim}{\mathbf{D}}$ $\underset{\sim}{\mathbf{E}}$ щодо обмежень (вимог), які задаються відповідними α-рівнями.

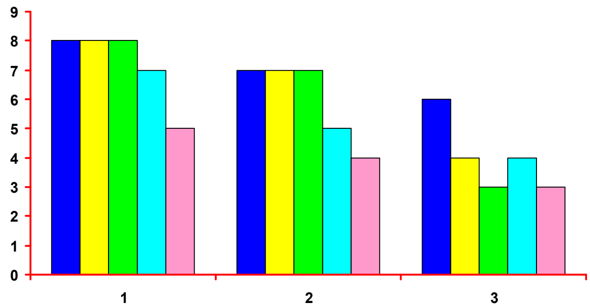

Рис. 2. Гістограми візуалізації звичайних підмножин 0,25-рівнів – (1), 0,5-рівнів – (2) і 0,75-рівнів – (3), побудованих на нечітких підмножинах $\underset{\sim}{\mathbf{A}}$, $\underset{\sim}{\mathbf{B}}$, $\underset{\sim}{\mathbf{C}}$, $\underset{\sim}{\mathbf{D}}$ і $\underset{\sim}{\mathbf{E}}$ (по осі ординат указуються кількості елементів, що долають відповідні рівні)

Як видно із рис. 2, при зростанні α не всі розглядувані нечіткі підмножини (системи ПРО/ППО) поводять себе однаковим чином. При $\alpha=0{,}25$ у підмножинах $\underset{\sim}{\mathbf{A}}$, $\underset{\sim}{\mathbf{B}}$, $\underset{\sim}{\mathbf{C}}$ не долає цього бар’єру лише один елемент x_2. При цьому підмножина $\underset{\sim}{\mathbf{D}}$ на цьому рівні втрачає два елементи (x_1 і x_7), а підмножина $\underset{\sim}{\mathbf{E}}$ чотири елементи (x_1, x_3, x_4 і x_7). На рівні $\alpha=0{,}5$ підмножини $\underset{\sim}{\mathbf{A}}$, $\underset{\sim}{\mathbf{B}}$, $\underset{\sim}{\mathbf{C}}$ продовжують зберігати свою відносну стабільність щодо зміни α, втрачаючи ще лише по одному елементу (x_9 підмножини $\underset{\sim}{\mathbf{A}}$, $\underset{\sim}{\mathbf{B}}$ і x_7 підмножина $\underset{\sim}{\mathbf{C}}$). Підмножина ж $\underset{\sim}{\mathbf{D}}$ на цьому рівні втрачає ще два елементи (x_4 і x_9), але підмножина $\underset{\sim}{\mathbf{E}}$ не дораховується лише одного елемента x_6. Нарешті, на рівні $\alpha=0{,}75$ однакову стабільність, як видно із гістограм на рис. 1, мають тільки підмножини $\underset{\sim}{\mathbf{A}}$ і $\underset{\sim}{\mathbf{E}}$ (порівнюючи числові дані в табл. 2 з гістограмами на рис. 2, можна помітити між ними кореляцію).

Якщо проведений аналіз перевести на мову комплексів, то можна переконливо стверджувати, що комплекс “IRIS – T” є одним з найкращих. Показано, що з ним у зв’язці бажано працювати ЗСУ “Gepard”. У випадку ж форс-мажорних ситуацій може використовуватись і зв’язка ЗРК “NASAMS” із ЗРК “MIM – 23 HAWK”.

Висновки

На основі вибору восьми тактико-технічних характеристик (з включенням вартості) для п’яти систем ПРО/ППО, а саме ЗРК “IRIS – T”, “NASAMS”, “MIM – 23 HAWK”, “Stormer HVM” і ЗСУ “Gepard”, були утворені п’ять нечітких підмножин $\underset{\sim}{\mathbf{A}}$, $\underset{\sim}{\mathbf{B}}$, $\underset{\sim}{\mathbf{C}}$, $\underset{\sim}{\mathbf{D}}$, $\underset{\sim}{\mathbf{E}}$.

За допомогою операцій над цими нечіткими підмножинами був проведений порівняльний аналіз. У результаті розрахунку лінійних та квадратичних індексів нечіткостей встановлені наближені відношення доповнень між п’ятьма комплексами ПРО/ППО. Розраховані та досліджені також звичайні підмножини 0,25; 0,5; 0,75 – рівнів з метою встановлення нових властивостей між нечіткими підмножинами $\underset{\sim}{\mathbf{A}}$, $\underset{\sim}{\mathbf{B}}$, $\underset{\sim}{\mathbf{C}}$, $\underset{\sim}{\mathbf{D}}$, $\underset{\sim}{\mathbf{E}}$. На основі цього зроблені попередні оцінювання можливостей досліджуваних п’яти систем ПРО/ППО.

Зазначимо, що за використанням так званої неймовірнісної ентропії [10] та різних нечітких відношень [9] порівняльний аналіз може стати ще більш витонченішим.

Список використаних джерел

1. IRIS – T – Вікіпедія – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/IRIS – T.
2. Німецький комплекс для української ППО – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://mil.in.ua/uk/blogs/nimetskyj-kompleks-dlya-ukrayinskoyi-protypovitryanoyi-oborony/.
3. Зенітний ракетний комплекс NASAMS, Ракетна техніка – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://missilery.info/missile/nasams.
4. ЗРК Improved Hawk (MIM 23B), Ракетна техніка – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://missilery.info/missile/ihawk.
5. Alvis Stormer HVM CVRT For Sale – Tracked Fighting Vehicle – [Internet resource] – Access: https://tanks-alot.co.uk/product/alvis-stormer-hvm/.
6. Гепард (ЗСУ) – Вікіпедія – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://surl.li/dxyrx.
7. Зенітні установки “Gepard” працюють на Харківщині – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://mil.in.ua/uk/news/zenitni-ustanovky-gepard-pratsyuyut-na-harkivshhyni/.
8. *Zadeh L.A.* Fuzzy Sets / L.A. Zadeh // Inform. and Control – 1965. – V. 8. – P. 338-353.
9. *Kaufmann A.* Introduction a la theorie des sous-ensembles flous (Fuzzy Set Theory) / A. Kaufmann. – Paris-New York-Barcelone-Milan: Masson, 1977. – 334 p.
10. *De Luca A., Termini S.* A Definition of a Nonprobabilistic Entropy in the Setting of Fuzzy Sets Theory / L.A. Zadeh, S. Termini // Inform. and Control – 1972. – V. 20. – P. 301-312.

References

1. Lawrence M.S., IRIS – T – Vikipediya [IRIS – T – Wikipedia]. Available at: <https://uk.wikipedia.org/wiki/IRIS – T> [Accessed 24 April 2023].
2. Chmut T.M., Nimets′kyy kompleks dlya ukrayins′koyi PPO [German complex for Ukrainian air defense]. Available at: <https://mil.in.ua/uk/blogs/nimetskyj-kompleks-dlya-ukrayinskoyi-protypovitryanoyi-oborony/> [Accessed 24 April 2023].
3. Gurov S.N., Zenitnyy raketnyy kompleks NASAMS, Raketna tekhnika [NASAMS anti-aircraft missile system, Missile technology]. Available at: <https://missilery.info/missile/nasams> [Accessed 24 April 2023].
4. Gurov S.N., ZRK Improved Hawk (MIM 23B), Raketna tekhnika [Improved Hawk air defense system (MIM 23B), Missile technology]. Available at: <https://missilery.info/missile/ihawk> [Accessed 24 April 2023].
5. “Tanks-a lot”, Alvis Stormer HVM CVRT For Sale – Tracked Fighting Vehicle. Available at: <https://tanks-alot.co.uk/product/alvis-stormer-hvm/> [Accessed 24 April 2023].
6. Lawrence M.S., Hepard (ZSU) – Vikipediya [Flakpanzer Gepard Wikipedia]. Available at: <http://surl.li/dxyrx> [Accessed 24 April 2023].
7. Chmut T.M., Zenitni ustanovky “Gepard” pratsyuyut na Kharkivshchyni [“Gepard” anti-aircraft installations operate in Kharkiv region]. Available at: <https://mil.in.ua/uk/news/zenitni-ustanovky-gepard-pratsyuyut-na-harkivshhyni/> [Accessed 24 April 2023].
8. *Zadeh L.A.,* 1965, Fuzzy Sets. Information and Control, no. 8, pp. 3383 – 53.
9. *Kaufmann A.,* 1977. Introduction a la theorie des sous-ensembles flous (Fuzzy set theory). Paris-New York-Barcelone-Milan: Masson
10. *De Luca A., Termini S.*, 1972. A Definition of a Nonprobabilistic Entropy in the Setting of Fuzzy Sets Theory. Information and Control, no. 20, pp. 301 – 312.

Надійшла до редакції: 23.04.2023