

Олександр Юрійович Пермяков (доктор технічних наук, професор)<sup>1</sup>

Марина Валеріївна Дудко<sup>2</sup>

Наталія Олександрівна Королюк (кандидат технічних наук, доцент)<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Національний університет оборони України ім. І. Черняхівського, Київ, Україна

<sup>2</sup> Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, Україна

## МЕТОД ФОРМАЛІЗАЦІЇ ЗНАНЬ ПРО ПРОЦЕС ВИЗНАЧЕННЯ ДОЦІЛЬНОЇ СТРАТЕГІЇ ПОЛЬОТУ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ В ХОДІ ПІДГОТОВКИ ДО ВЕДЕННЯ ПОВІТРЯНОЇ РОЗВІДКИ НА ОСНОВІ НЕЧІТКИХ ЛОГІЧНИХ СИСТЕМ

У статті пропонується підхід щодо формалізації знань про процес визначення доцільної стратегії польоту безпілотного літального апарату на етапі планування повітряної розвідки за допомогою евристичних методів, які є найкращими з точки зору врахування практики, досвіду, інтуїції, знань осіб, що приймають рішення, при веденні повітряної розвідки, та шукають рішення усередині деякого підпростору можливих рішень. Розроблений метод дозволяє формалізувати фактори, що враховують тактичні умови проведення повітряної розвідки, вплив зовнішнього середовища на дальність польоту безпілотного літального апарату у вигляді лінгвістичних і інтервально-оцінюваних параметрів для кожного варіанту, які дозволяють врахувати невизначеність. Вихідними даними методу є рекомендація відносно доцільної стратегії польоту безпілотного літального апарату, яка містить інформацію про перелік найважливіших об'єктів розвідки, точки початку, кінця маршруту польоту, початковий курс польоту, рекомендовані висоти польоту на небезпечних ділянках, спосіб пошуку і огляду місцевості. Виходячи із MISO-структури нечітких продукційних правил, в яких використовуються дійсні числа (номер доцільної стратегії польоту безпілотного літального апарату), запропоновано в якості алгоритму виведення в логічній системі інтервального типу 2 використання виводу для нечітких множин другого порядку. Обґрунтовано, що компоненти архітектури нечіткої логічної системи інтервального типу 2 забезпечують реалізацію відповідного механізму виводу, який представляє собою сукупність правил виводу і способи їх застосування.

**Ключові слова:** планування маршруту польоту, інтервальні нечіткі множини типу 2, особа, що приймає рішення, нечітка логічна система, трикутні нечіткі числа, трапецієподібні нечіткі інтервали, знання, формалізація знань, стратегія польоту безпілотного літального апарату.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Сучасні загрози українській державності з боку РФ вимагають пошуку адекватної відповіді на щоденні виклики. Це можливо завдяки осмисленню сутності сучасних збройних зіткнень, аналізу, вивченню та узагальненню світового досвіду протистояння воєнній загрозі [1-3]. Актуальною задачею при оборонному характері воєнної доктрини стає постійне спостереження за противником для забезпечення своєчасного і організованого переходу військ з мирного на воєнний стан. Головна роль при цьому відводиться повітряній розвідці, яка є однією з найважливіших умов успіху бойових дій авіації та інших родів військ, завданнями якої є своєчасне забезпечення командування і штабів повними і достовірними даними про противника. Тому, саме в теперішній час безпілотні літальні апарати (БПЛА) розглядаються як ефективний та надійний засіб повітряної розвідки. Досягнення успішності ведення бойових дій здійснюється завдяки

оперативній доставці повної, достовірної інформації про противника.

Критерії ефективності планування маршруту польоту розвідувального БПЛА тактичної ланки обумовлюються [3-10]: завданням вищого штабу; можливостями противника щодо зриву розвідувального завдання; часовими параметрами планування та виконання завдання; параметрами, які визначають технічні можливості БПЛА. Застосування БПЛА в умовах вимог та обмежень, льотно-технічних можливостей, наявність засобів ураження противника передбачає велику множину варіантів маршруту польоту, що обумовлює складність у прийнятті обґрунтованого рішення щодо побудови оптимального маршруту польоту. Як доводить досвід практичного застосування БПЛА [1,4], умови, вимоги, обмеження, які висуваються до розвідувальних завдань, вплив зовнішніх факторів, врахування найважливіших об'єктів для обльоту можуть суперечити один одному, створюючи невизначеність при наданні пріоритету будь-якому з них під час планування.

Тому виробка рекомендацій щодо визначення доцільної стратегії польоту розвідувальних БПЛА на етапі планування повітряної розвідки є актуальним завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Підвищення ефективності повітряної розвідки з використанням БПЛА тактичної ланки є достатньо поширеною науковою проблематикою, яку розглядає ряд вітчизняних та зарубіжних науковців. В [1-3] не враховано фактори впливу зовнішнього середовища, які, у свою чергу, вносять зміни у вихідний результат планування. Наведені фактори впливу враховуються із високим ступенем суб'єктивізму особи, яка планує маршрут польоту. У працях [2-5] розглядаються математичні моделі, які мають за мету підвищення ефективності розвідки з БПЛА шляхом визначення оптимального маршруту польоту за допомогою розрахунку ймовірності виконання завдань розвідки. Проте, досвід застосування БПЛА в операції об'єднаних сил на сході України свідчить про необхідність врахування факторів, які впливають на ефективність розвідувальних операцій з БПЛА. Необхідно брати до уваги загрози та обмеження природного та технічного характеру [6-9], які суттєво впливають на кінцевий результат польотного завдання.

Висока вразливість БПЛА від різних факторів бойової обстановки, низька «інтелектуальність» в автономному режимі через відсутність таких людських якостей, як оперативне прийняття рішення, можливість перенесення основних зусиль на нові, більш важливі об'єкти, вміння ухилитися від небезпеки і оперативно застосовувати заходи до обману противника, є сьогодні нерозв'язними проблемами, що знижують ефективність бойового застосування сучасних БПЛА та потребують врахування вищеперахованих факторів на етапі планування повітряної розвідки [11-15].

З точки зору формального опису відомі методи планування маршруту польоту БПЛА можна розділити на дві категорії: детерміновані і евристичні. Детерміновані методи засновані на точних математичних моделях, строго певній послідовності обчислень. За допомогою евристичних методів шукають рішення усередині деякого підпростору можливих прийнятних рішень, при чому знайдене рішення формально може не бути оптимальним (глобальним екстремумом), воно є найкращим з точки зору повсякденної практики щодо вирішення завдань повітряної розвідки, оснований на досвіді, інтуїції, знаннях особи, що приймає рішення (ОПР).

В рамках досліджуваної предметної області, як правило, фактори, що впливають на планування маршруту, мають нечіткі (розмиті) границі, а для деяких елементів інтервалу не можна з повною впевненістю стверджувати належність цих елементів однозначно до інтервалу. У той же час, деякі параметри району особливої уваги, ширини смуги розвідки, зовнішні фактори традиційно

задаються у вигляді лінгвістичних, а не числових значень [2,3]. Представлені подібним чином дані формалізуються, як правило, з використанням математичного апарату нечітких множин [5-10].

Отже, як показав аналіз публікацій за темою дослідження, описана вище задача, має важливість для науки і практики, залишається актуальною та потребує свого вирішення.

**Мета статті.** Розробка методу формалізації знань про процес визначення доцільної стратегії польоту безпілотних літальних апаратів в ході підготовки до ведення повітряної розвідки на основі нечітких логічних систем в умовах невизначеності.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Процес зіставлення значень факторів, що враховують тактичні умови проведення розвідки, вплив зовнішнього середовища, прогнозованих в ході підготовки до ведення повітряної розвідки, зі значеннями поточних параметрів в ході ведення повітряної розвідки, формування рекомендацій щодо побудови маршруту польоту БПЛА будемо називати процесом планування маршруту БПЛА. Результатами планування маршруту польоту приймається рішення про можливість вирішення задачі повітряної розвідки, побудови маршруту польоту, визначення переліку у найважливіших об'єктів розвідки, то задачу планування маршруту польоту БПЛА доцільно вважати, як одну з найбільш важливих завдань повітряної розвідки.

Вхідними даними методу, що розроблюється, є формалізовані знання про можливі варіанти оперативної побудови противника при визначеному виді операції, комбінації зовнішніх факторів, що спрогнозовані в ході підготовки до ведення повітряної розвідки з використанням інтервальних нечітких множин типу 2 (ІНМТ2) і поточні результати, які характеризують тактичні умови та зовнішні фактори в ході ведення повітряної розвідки противника. Вхідними даними методу є рекомендації відносно доцільної стратегії польоту БПЛА, яка містить інформацію про перелік найважливіших об'єктів розвідки, точки початку, кінця маршруту польоту, початковий курс польоту, рекомендовані висоти польоту на небезпечних ділянках, спосіб пошуку і огляду місцевості (загальний, детальний, обліт заданого об'єкту, лінійного об'єкту і т. ін.).

При обґрунтуванні вибору нечіткої логічної системи інтервального типу 2 для формалізації знань про процес визначення доцільної стратегії польоту БПЛА в ході ведення повітряної розвідки необхідно здійснити:

- вибір типу нечітких множин, які використовуються в якості значень лінгвістичних змінних (ЛЗ), що складають умови і висновки відповідних нечітких продукційних правил. Тип нечітких множин безпосередньо визначає і тип нечіткої логічної системи, тобто вибір типу алгоритму нечіткого виводу, що використовується

в нечіткій логічній системі (НЛС).

Так як в якості значень ЛЗ зі складу умов і висновків відповідних нечітких продукційних правил (бази правил) використовуються ІНМТ2, то в якості нечіткої логічної системи будемо використовувати нечітку логічну систему інтервального типу 2 (НЛС ІТ2). Тип алгоритму нечіткого виводу, що використовується в нечіткій логічній системі, визначається структурою нечітких продукційних правил (БП); процедурою фазифікації, агрегування, активізації, акумулювання і дефазифікації. Причому вибір реалізації навіть одного компонента часто визначає і вибір всіх інших компонентів і власне типу алгоритму нечіткого виведення [12]. Виходячи із структури нечітких продукційних правил (правила з MISO-структурою, в якості заключення використовуються дійсні числа - номер доцільної стратегії польоту БПЛА) в якості алгоритму нечіткого виведення НЛС ІТ2 пропонується використання виводу для нечітких множин другого порядку (НМ2).

Для нечіткої системи с входами  $x_1 \in X_1, \dots, x_p \in X_p$  та одним виходом  $y \in Y$ , нечіткий логічний вивід в загальному вигляді можливо представити

$$R^i: \text{ЯКЩО } x_1 = \tilde{A}_1^i \dots x_n = \tilde{A}_n^i \quad (1)$$

$$\text{ТОДІ } y = \tilde{B}^i, i = 1, \dots, M$$

Грунтуючись на нечіткій логіці типу 2, нечіткий вихід комбінує правила і дає відображення вхідних нечітких множин у вихідні НМ2. З точки зору математичної формалізації, нечітке продукційне правило, представлене виразом (1), розглядається як нечітка імплікація виду [7 – 9]:

$$\tilde{A} \rightarrow \tilde{B}, \tilde{A} \subseteq X, \tilde{B} \subseteq Y \quad (2)$$

З використанням математики НМТ2 нечітку імплікацію (2) можливо представити

$$\begin{aligned} \mu_{R^i}(x, y) &= \mu_{\tilde{A}^i \rightarrow \tilde{B}^i}(x, y) = \\ &= \mu_{\tilde{A}_1^i}(x_1) \prod \dots \prod \mu_{\tilde{A}_n^i}(x_n) \prod \mu_{\tilde{B}^i}(y) = \\ &= \mu_{R^i}(x_1, \dots, x_n, y) \end{aligned} \quad (3)$$

де  $\prod$  – операція перетину (meet), яка використовується в математиці для НМТ2.

В якості операції перетину використовуються операція добутку (product) або операція мінімуму (minimum).

Розроблений метод формалізації знань про процес визначення доцільної стратегії польоту БПЛА в ході підготовки до ведення повітряної розвідки з використанням алгоритму нечіткого виведення для НЛС ІТ2 включає наступні основні етапи (рис. 1):

– отримання результатів формалізованого представлення в термінах НЛС ІТ2 змінних, що описують параметри районів особливої уваги, ширини смуги розвідки, кількість засобів ППО,

вплив зовнішніх факторів на дальність польоту БПЛА, які були спрогнозовані в ході попередньої підготовки до ведення повітряної розвідки;

– отримання значень факторів, що описують реальну обстановку в ході ведення повітряної розвідки. Отримані значення використовуються в якості значень вхідних змінних НЛС ІТ2 для вирішення задачі планування маршруту польоту БПЛА;

– визначення значення зміни дальності польоту БПЛА від впливу факторів зовнішнього середовища (висоти польоту, швидкості попутного, зустрічного вітру, швидкості БПЛА, температури повітря) з використанням нечітких логічних рівнянь в ході ведення повітряної розвідки;

– виконання процедури фазифікації значень вхідних змінних НЛС ІТ2, тобто знаходження значень функцій приналежності ІНМТ2, що представляють антецеденти продукцій БП НЛС ІТ2;

– виконання процедури агрегування, тобто визначення агрегованого ступеня істинності за всіма умовами кожного активізованого нечіткого продукційного правила у вигляді активізаційного рівня;

– виконання процедури активізації, тобто визначення первинної приналежності (область визначення нечіткої ступеня приналежності вхідних значень факторів, що враховують тактичні умови проведення розвідки, впливу зовнішнього середовища), до наперед заданої стратегії польоту БПЛА;

– виконання процедури акумуляції для НЛС ІТ2, тобто знаходження значень нижньої і верхньої меж FOU ІНМТ2;

– блок приведення типу для отримання НМТ1 за результатами акумуляції висновків правил, що мають одну і ту ж вихідну ЛЗ, організація дефазифікації, тобто знаходження значення для НМТ1.

В якості вирішення задачі планування маршруту польоту БПЛА приймається номер стратегії (перелік найважливіших об'єктів розвідки, точки початку, кінця маршруту польоту, початковий курс польоту, рекомендовані висоти польоту на небезпечних ділянках, спосіб пошуку і огляду місцевості (загальний, детальний, обліт заданого об'єкту, лінійного об'єкту), який має максимальну нечітку ступінь належності.

Розглянемо особливості визначення значення зміни дальності польоту БПЛА від впливу факторів зовнішнього середовища з використанням нечітких логічних рівнянь в методі формалізації знань про процес визначення доцільної стратегії польоту.

попутного, зустрічного вітру, швидкості БПЛА, температури повітря на зміну дальності польоту і запропоновано використання методу ідентифікації для формалізації залежностей та формування нечіткої бази знань (рис. 2).

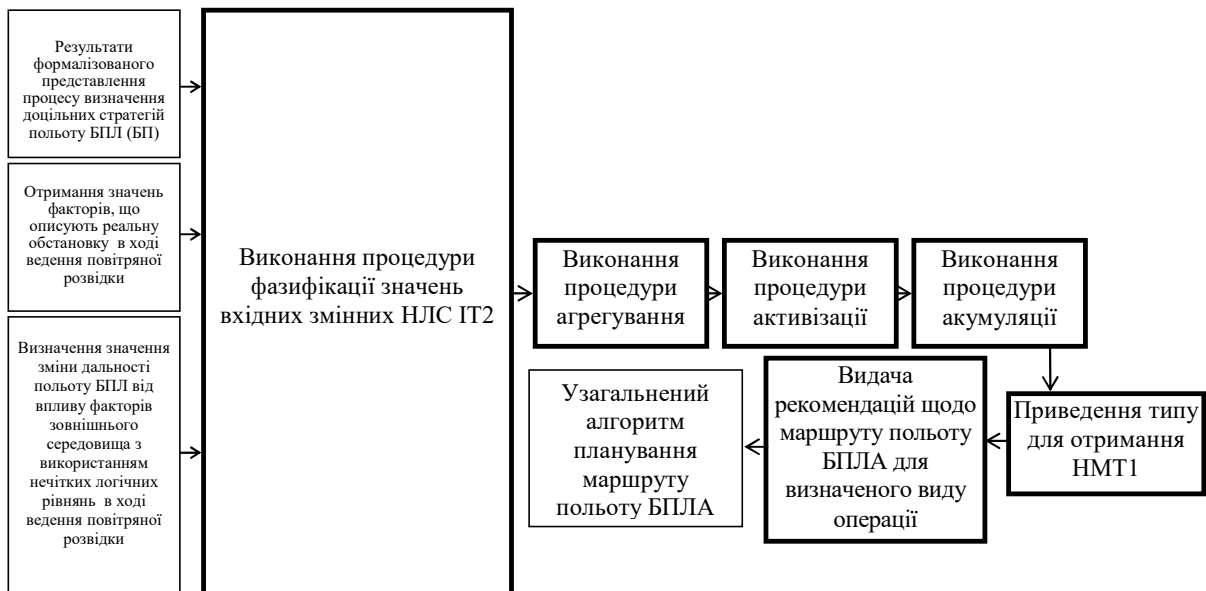


Рис. 1 Структура методу формалізації знань про процес визначення доцільної стратегії польоту БПЛА в ході підготовки до повітряної розвідки з використанням алгоритму нечіткого виводу для НЛС ІТ2

Для визначення впливу зовнішнього середовища на дальність польоту був проведений аналіз впливу висоти польоту, швидкості

Метод ідентифікації полягає в використанні нечітких логічних рівнянь, які формуються на основі матриці знань системи логічних

висловлювань (табл. 1) і дозволяють обчислювати значення функцій приналежності різних рішень при фіксованих значеннях вихідних змінних об'єкта з найбільшим значенням функції приналежності.

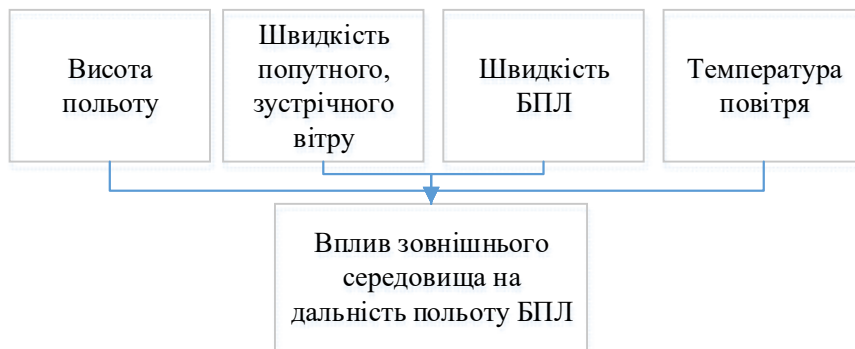


Рисунок 2 Залежність дальності польоту БПЛА від висоти польоту, швидкості попутного, зустрічного вітру, температури повітря та швидкості польоту

Процедуру визначення зміни дальності польоту від факторів зовнішнього середовища пропонується представити у вигляді нечіткої бази знань, що представляє собою сукупність лінгвістичних висловлювань типу ЯКЩО <входи>, ТОДІ <виходи>, налаштовуючи нечітку базу знань можна ідентифікувати нелінійні залежності з необхідною точністю. Будемо вважати відомими:

- множину рішень  $D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ , що відповідають вихідній змінній  $u$  (значення зміни дальності польоту від впливу зовнішнього середовища);

- множина вхідних змінних  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  (значення висоти польоту, швидкості попутного,

зстрічного вітру, температури повітря, швидкості).

- діапазони кількісної зміни кожної вхідної змінної  $x_i \in [\underline{x}_i, \overline{x}_i]$ ;  $i = \overline{1, n}$ ;

- функції приналежності, що дозволяють представляти вхідні змінні  $x_i$ ;  $i = \overline{1, n}$  і вихідну змінну у вигляді НМ1:

$$a_i^p = \int_{\underline{x}_i}^{\overline{x}_i} \mu^{a_i^p}(x_i) / x_i, \quad (4)$$

$$d_j = \int_{\underline{d}}^{\overline{d}} \mu^{d_j}(d) / d, \quad (5)$$

де  $\mu^{a_i^p}(x_i)$  – функція приналежності значення  $x_i \in [\underline{x}_i, \bar{x}_i]$  вхідної змінної терму  $a_i^p \in A_i; p = \overline{1, l_i}; i = \overline{1, n};$   
 $\mu^{d_j}(d)$  – функція приналежності значення  $y \in [\underline{y}, \bar{y}]$  вихідної змінної терму-рішенню  $d_j \in D; j = \overline{1, m};$

- нечітку базу знань.

Таблиця 1

Матриця знань системи логічних висловлювань

Номер вхідних комбінацій значень	Вхідні змінні				Вихідна змінна
	$x_1$	$x_2$	... $x_i$ ...	$x_n$	
11	$a_1^{11}$	$a_2^{11}$	... $a_i^{11}$ ...	$a_n^{11}$	$d_1$
12	$a_1^{12}$	$a_2^{12}$	... $a_i^{12}$ ...	$a_n^{12}$	
...	...	...	...	...	
$1 k_1$	$a_1^{1k_1}$	$a_2^{1k_1}$	$a_i^{1k_1}$	$a_n^{1k_1}$	
...					
$j1$	$a_1^{j1}$	$a_2^{j1}$	... $a_i^{j1}$ ...	$a_n^{j1}$	$d_j$
$j2$	$a_1^{j2}$	$a_2^{j2}$	... $a_i^{j2}$ ...	$a_n^{j2}$	
...	...	...	...	...	
$jk_j$	$a_1^{jk_j}$	$a_2^{jk_j}$	$a_i^{jk_j}$	$a_n^{jk_j}$	
...					
$m1$	$a_1^{m1}$	$a_2^{m1}$	... $a_i^{m1}$ ...	$a_n^{m1}$	$d_m$
$m2$	$a_1^{m2}$	$a_2^{m2}$	... $a_i^{m2}$ ...	$a_n^{m2}$	
...	...	...	...	...	
$mk_m$	$a_1^{mk_m}$	$a_2^{mk_m}$	$a_i^{mk_m}$	$a_n^{mk_m}$	

Розмірність нечіткої бази знань дорівнює  $(n+1) \times N$ , где  $(n+1)$  – число стовпців, а  $N = k_1 + k_2 + \dots + k_m$  – число рядків. Перші  $n$  стовпців нечіткої бази знань відповідають вхідним змінним  $x_i, i = \overline{1, n}$ , а  $(n+1)$ -ий стовпець відповідає значенням  $d_j$  вихідної змінної  $y (j = \overline{1, m})$ . Кожен рядок нечіткої бази знань представляє комбінацію значень вихідної змінної  $y$ . При цьому перші  $k_1$  рядків відповідають значенню вихідної змінної  $y = d_1$ , другі  $k_2$  рядків – значенню  $y = d_2$ , останні  $k_m$  рядків – значенню  $y = d_m$ . Нечітка база знань визначає систему логічних висловлювань типу «ЯКЩО-ТОДІ, ІНАКШЕ», що зв'язують значення вхідних змінних  $x_1 \div x_n$  з одним з можливих рішень:

ЯКЩО  $(x_1 = a_1^{11})$  ТА  $(x_2 = a_2^{11})$  ТА... ТА  $(x_n = a_n^{11})$  або  $(x_1 = a_1^{12})$  ТА  $(x_2 = a_2^{12})$  ТА ... ТА  $(x_n = a_n^{12})$  або  $(x_1 = a_1^{1k_1})$  ТА  $(x_2 = a_2^{1k_1})$  ТА... ТА  $(x_n = a_n^{1k_1})$  або ТОДІ  $y = d_1$ , ІНАКШЕ ЯКЩО  $(x_1 = a_1^{21})$  ТА  $(x_2 = a_2^{21})$  ТА... ТА  $(x_n = a_n^{21})$  або  $(x_1 = a_1^{22})$  ТА  $(x_2 = a_2^{22})$  ТА...

ТА  $(x_n = a_n^{22})$  або  $(x_1 = a_1^{2k_2})$  ТА  $(x_2 = a_2^{2k_2})$  ТА ТА  $(x_n = a_n^{2k_2})$  або ТОДІ  $y = d_2$ , ІНАКШЕ (6) ЯКЩО  $(x_1 = a_1^{m1})$  ТА  $(x_2 = a_2^{m1})$  ТА... ТА  $(x_n = a_n^{m1})$  або  $(x_1 = a_1^{m2})$  ТА  $(x_2 = a_2^{m2})$  ТА... ТА  $(x_n = a_n^{m2})$  або  $(x_1 = a_1^{mk_m})$  ТА  $(x_2 = a_2^{mk_m})$  ТА... ТА  $(x_n = a_n^{mk_m})$  або ТОДІ  $y = d_m$ , де  $d_j (j = \overline{1, m})$  – оцінка вихідної змінної  $y$ ;

$a_i^{jp}$  – лінгвістична оцінка вхідної змінної  $x_i$  в  $p$ -ому рядку  $j$ -ої диз'юнкції, що обрана з відповідної терм-множини  $A_i, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}, p = \overline{1, k_j}$ ;

$k_j$  – кількість правил, що визначають значення вихідної змінної  $y = d_j$ .

З використанням операцій  $\cup$  (АБО) і  $\cap$  система логічних висловлювань (6) має вигляд

$$\bigcup_{p=1}^{k_j} \left[ \bigcap_{i=1}^n (x_i = a_i^{jp}) \right] \rightarrow y = d_j, j = \overline{1, m}. \quad (7)$$

$$\mu^{d_j}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \bigvee_{p=1}^{k_j} \left[ \bigwedge_{i=1}^n \mu^{a_i^{jp}}(x_i) \right], j = \overline{1, m}. \quad (8)$$

Проведений аналіз впливу висоти польоту,

швидкості попутного, зустрічного вітру, швидкості, температури повітря на зміну дальності польоту дозволив сформувати нечітку базу знань, перейти визначенню зміни дальності польоту БПЛА [7]:

1. Аналіз вхідної інформації: фіксується вектор значень вхідних змінних (значення висоти польоту, швидкості попутного, зустрічного вітру, температури повітря, швидкості БПЛА)  $X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$  і визначаються ЛЗ по ознакам

$\langle x_1^*, \alpha_1, \dots \rangle \dots \langle x_n^*, \alpha_j, \dots \rangle$ , де  $\alpha_j$  - терм-множина параметра  $x_n$ .

2. Визначення значень функцій приналежності для значень вхідних, вихідних змінних  $x_i^*, y_i, i = \overline{1, n}$ .

3. Використання нечітких логічних рівнянь, отриманих на основі правил (9), що дозволяють обчислити значення функцій приналежності різних рішень при фіксованих значеннях вхідних змінних

$$R : \left\{ \begin{array}{l} \text{IF } x_1 = \alpha_1^{(11)} \text{ AND } x_2 = \alpha_2^{(11)} \dots \left[ \text{AND } x_k = \alpha_k^{(11)} \right] \dots x_n = \alpha_n^{(1h_1)} \\ \text{THEN } y_1 = d_1, \\ \text{IF } x_1 = \alpha_1^{(21)} \text{ AND } x_2 = \alpha_2^{(21)} \dots \left[ \text{AND } x_k = \alpha_k^{(21)} \right] \dots x_n = \alpha_n^{(2h_2)} \\ \text{THEN } y_2 = d_2, \\ \dots \dots \dots \\ \text{IF } x_1 = \alpha_1^{(ml)} \text{ AND } x_2 = \alpha_2^{(ml)} \dots \left[ \text{AND } x_k = \alpha_k^{(ml)} \right] \dots x_n = \alpha_n^{(mh_m)} \\ \text{THEN } y_m = d_m. \end{array} \right. \quad (9)$$

Зв'язок між функціями приналежності може бути представлений у вигляді рівнянь

$$\begin{aligned} \mu_{(0...10)}(x_1, x_2, \dots, x_n) &= \mu_{\tilde{A}(\alpha_1^{11})}(x_1) \wedge \mu_{\tilde{A}(\alpha_2^{11})}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu_{\tilde{A}(\alpha_n^{11})}(x_n) \vee \\ &\quad \mu_{\tilde{A}(\alpha_1^{12})}(x_1) \wedge \mu_{\tilde{A}(\alpha_2^{12})}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu_{\tilde{A}(\alpha_n^{12})}(x_n) \vee \dots \\ &\quad \dots \vee \mu_{\tilde{A}(\alpha_1^{1k_1})}(x_1) \wedge \mu_{\tilde{A}(\alpha_2^{1k_1})}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu_{\tilde{A}(\alpha_n^{1k_1})}(x_n), \\ \mu_{(11...20)}(x_1, x_2, \dots, x_n) &= \mu_{\tilde{A}(\alpha_1^{21})}(x_1) \wedge \mu_{\tilde{A}(\alpha_2^{21})}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu_{\tilde{A}(\alpha_n^{21})}(x_n) \vee \\ &\quad \mu_{\tilde{A}(\alpha_1^{22})}(x_1) \wedge \mu_{\tilde{A}(\alpha_2^{22})}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu_{\tilde{A}(\alpha_n^{22})}(x_n) \vee \dots \\ &\quad \dots \vee \mu_{\tilde{A}(\alpha_1^{2k_2})}(x_1) \wedge \mu_{\tilde{A}(\alpha_2^{2k_2})}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu_{\tilde{A}(\alpha_n^{2k_2})}(x_n), \\ \mu_{(21...30)}(x_1, x_2, \dots, x_n) &= \mu_{\tilde{A}(\alpha_1^{31})}(x_1) \wedge \mu_{\tilde{A}(\alpha_2^{31})}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu_{\tilde{A}(\alpha_n^{31})}(x_n) \vee \\ &\quad \mu_{\tilde{A}(\alpha_1^{32})}(x_1) \wedge \mu_{\tilde{A}(\alpha_2^{32})}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu_{\tilde{A}(\alpha_n^{32})}(x_n) \vee \dots \\ &\quad \dots \vee \mu_{\tilde{A}(\alpha_1^{3k_3})}(x_1) \wedge \mu_{\tilde{A}(\alpha_2^{3k_3})}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu_{\tilde{A}(\alpha_n^{3k_3})}(x_n). \end{aligned} \quad (10)$$

Таким чином, згідно методу нечіткої ідентифікації по заданому вектору вхідних змінних  $X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$  та сформованої нечіткої бази знань можливе знаходження дискретних значень  $(d_1, d_2, \dots, d_m)$ , що є прогнозованими значеннями зміни дальності польоту БПЛА при впливі зовнішнього середовища. Находження дискретного значення  $\{d_1, d_2, \dots, d_m\}$  вихідної змінної у по заданому вектору фіксованих значень вхідних змінних  $X^* = \langle x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^* \rangle$  і нечіткої бази знань дозволяє знайти значення зміни дальності польоту БПЛА.

Розроблений метод формалізації знань про

процес визначення доцільної стратегії польоту БПЛА на основі ІНМТ2 дозволяє формалізувати фактори, що враховують тактичні умови проведення повітряної розвідки, вплив зовнішнього середовища на дальність польоту у вигляді лінгвістичних і інтервально-оцінюваних параметрів для кожного варіанту, які дозволяють врахувати невизначеність; формувати область визначення лінгвістичних змінних, що використовують для опису тактичних умов проведення повітряної розвідки та впливу зовнішнього середовища на дальність польоту БПЛА; формувати з множини найважливіших об'єктів повітряної розвідки найбільш значимих наземних об'єктів на основі оцінки міри невідомості елементів; формалізувати стратегії

польоту БПЛА для кожного можливого варіанту оперативної побудови, впливу зовнішнього середовища у вигляді нечітких продукційних правил (в якості антецедента, консеквента використовують нечіткі лінгвістичні висловлювання).

### Висновки й перспективи подальших досліджень

Таким чином, досліджено, що для задачі планування маршруту польоту БПЛА на етапі планування повітряної розвідки доцільно використовувати евристичні методи, які шукають рішення усередині деякого підпростору можливих прийнятних рішень і вони є найкращими з точки зору врахування практики, досвіду, інтуїції, знань ОПР при веденні повітряної розвідки. Значення

окремих прогнозованих факторів доцільно представляти з використанням математичного апарату нечітких множин. В цілому розгляд компонентів архітектури НЛС ІТ2 забезпечує реалізацію відповідного механізму виводу, який представляє собою сукупність правил виводу, тобто в даному випадку це база правил НЛС ІТ2 (декларативні знання), і способи застосування цих правил, тобто в даному випадку це процедури фазифікації, агрегування, акумулювання, приведення типів і дефазифікації. В якості вирішення задачі планування маршруту польоту БПЛА приймається номер стратегії, який має максимальну нечітку ступінь приналежності (первинну приналежність).

### Література

1. Камінський В.В. Аналіз застосування безпілотних літальних апаратів в сучасних збройних конфліктах та АТО на Сході України / В.В. Камінський, В.В. Тюрін, О.А. Корщев, Н.О. Королюк // Наука і оборона. – 2017. – № 3(4). – С.4-8. 2. Степанов Г.С. Погляди щодо проблемних питань застосування Повітряних Сил в протиповітряній обороні / Г.С. Степанов, В.В. Камінський, М.А. Павленко // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2018. – №1(30). – С. 18-23. 3. Камінський В.В. Боротьба з повітряним тероризмом має починатися з землі / В.В. Камінський // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2014. – № 1(14). – С. 16-23. 4. Олизаренко С.А. Нечеткие множества типа 2. Терминология и представление / С.А. Олизаренко, Е.В. Брежнев, А.В. Перепелица // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2010. – Вип. 8(89). – С. 131–140. 5. Олизаренко С.А. Интервальные нечеткие множества типа 2. Терминология, представление, операции / С.А. Олизаренко, А.В. Перепелица, В.А. Капранов // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2011. – Вип. 2(92). – С. 39 – 45. 6. Королюк Н.О. Обґрунтування сучасного підходу щодо автоматизації процесів прийняття рішень по управлінню авіацією / Н.О. Королюк, О.В.Першин, Т.О. Грідньова, С.О. Шевченко // Збірник наукових праць. - 2019. - №1(59). – С.32-39. 7. Saaty, T. “Structures in decision making: On the subjective geometry of hierarchies and networks [on line]”. European Journal of Operational Research, vol. 199, is. 3, 2009, p. 867–872. 8. Королюк Н.О. Процедура формалізації даних, які використовуються при описі процесу управління рухом повітряних об’єктів / Н.О. Королюк, Р.В. Корольов, О.А. Корщев // Збірник наукових праць ХНУПС. – 2017. – № 4(53). – С.103-106. 9. Korolyuk, N. “An approach to prediction of the telecommunication network quality parameters under the conditions of non-stochastic uncertainty”, Telecommunications and Radio Engineering, Issue 11, Volume 76, 2017. Pages 1027-1032. 10. Королюк Н.О. Удосконалення програмного забезпечення комплексів засобів автоматизації при розпізнаванні типу повітряного об’єкта / Н.О.Королюк, В.В. Синявський, Д.О. Хаустов // Системи озброєння і військової техніки. – 2017. – № 1(49). – С. 67-80. 11. Тимочко О.І. Метод оцінки ступеня небезпеки

нештатних ситуацій у повітряному просторі / О.І. Тимочко, П.П. Зуєв // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2017. – № 1(26). – С. 49-53. Теоретические основы автоматизации процессов выработки решений в системах управления / В.Е. Ярушек, В.П. Прохоров, А.В. Мишин, Б.Н. Судаков. – Х.: ХУВС, 2011. – 355 с. 12. Ротштейн О.П. Діагностика на базі нечітких відношень в умовах невизначеності: моногр. / О.П. Ротштейн, Г. Б. Ракитянська. – Вінниця: Універсум, 2006 – 275 с. 13. Korolyuk, N. (2014) , “Hybrid model of knowledge for situation recognition in airspace”, Automatic Control and Computer Sciences, Vol. 49, pp.16-25. 14. Alimpiev, A. (2017), “Selecting a model of unmanned aerial vehicle to accept it for military purposes with regard to expert data” P.Berdnik, N.Korolyuk, O.Korshets, M. Pavlenko, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies ISSN 1729-3774. - №1/9 (85 pp 53-60. 15. Hnagra, H. Introduction to Interval Type-2 Fuzzy Logic Controllers – Towards Better Uncertainty Handling in Real World Applications / Hani Hnagra, Christian Wagner // IEEE eNewsletter. Systems, Man and Cybernetics Society. – Issue 27. –June 2009. 16. Mendel, J. Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems Made Simple / J.M. Mendel, R.I. John, Feilong Liu // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. – December 2006. – Vol. 14, no. 6. – P. 808-821. 17. Пермяков О.Ю. Інформаційно – телекомунікаційні технології і сучасна збройна боротьба / О.Ю. Пермяков, Н.О. Королюк // Науково-технічна конференція молодих учених «Актуальні проблеми інформаційних технологій» (20-21 листопада 2018 року). - Київ: НУОУ, 2018. - С. 5-6. 18. Mendel, J. Standard Background Material About Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems / J.M. Mendel, H. Hnagra, R.I. John // IEEE CIS Standards Committee [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://ieee-cis.org/technical/standards/>. 19. Wu, H. Uncertainty Bounds and Their Use in the Design of Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems / H. Wu, J.M. Mendel // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. – October 2002. – Vol. 10, no. 5. – P. 622-639. 20. Wu, D. Enhanced Karnik-Mendel Algorithms / D. Wu, J.M. Mendel // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. – August 2009. – Vol. 17, no. 4. – P. 923-934. 21. Mendel, J. On centroid calculations for Type-2 Fuzzy Sets / J.M. Mendel // Appl. Comput. Math. – 2011. – V.10, no.1, Special Issue. – P. 88-96.

**МЕТОД ФОРМАЛИЗАЦИИ ЗНАНИЙ О ПРОЦЕССЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦЕЛЕСООБРАЗНОЙ СТРАТЕГИИ ПОЛЕТА БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В ХОДЕ ПОДГОТОВКИ К ВЕДЕНИЮ ВОЗДУШНОЙ РАЗВЕДКИ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКИХ ЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

*Александр Юрьевич Пермяков (доктор технических наук, профессор)<sup>1</sup>*

*Марина Валерьевна Дудко<sup>2</sup>*

*Наталья Александровна Королюк (кандидат технических наук, доцент)<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Национальный университет обороны Украины имени И. Черняховского, Киев*

<sup>2</sup>*Харьковский национальный университет Воздушных Сил имени И. Кожедуба, Харьков*

*В статье предлагается подход по формализации знаний о процессе определения целесообразной стратегии полета беспилотного летательного аппарата на этапе планирования воздушной разведки с помощью эвристических методов, которые являются лучшими с точки зрения учета практики, опыта, интуиции, знаний лиц, принимающих решения, при ведении воздушной разведки, и осуществляющих поиск решения внутри некоторого подпространства возможных приемлемых решений. Разработанный метод позволяет формализовать факторы, учитывающие тактические условия ведения воздушной разведки, влияние внешней среды на дальность полета беспилотного летательного аппарата в виде лингвистических и интервально-оцениваемых параметров для каждого варианта, которые позволяют учесть неопределенность. Исходными данными метода является рекомендация по применению целесообразной стратегии полета беспилотного летательного аппарата, содержащая информацию о перечне важнейших объектов разведки, точки начала, конца маршрута полета, начальный курс полета, рекомендованные высоты полета на опасных участках, способ поиска и осмотра местности. Исходя из MISO- структуры нечетких продукционных правил, в заключении которых используются действительные числа (номер целесообразной стратегии полета беспилотного летательного аппарата), предлагается в качестве алгоритма вывода в логической системе интервального типа 2 использование вывода для нечетких множеств второго порядка. Обосновано, что компоненты архитектуры нечеткой логической системы интервального типа 2 обеспечивают реализацию соответствующего механизма вывода, который представляет собой совокупность правил вывода и способы их применения.*

**Ключевые слова:** *планирование маршрута полета, интервальные нечеткие множества типа 2, лицо, принимающее решение, нечеткая логическая система, треугольные нечеткие числа, трапецевидные нечеткие интервалы, знания, формализация знаний, стратегия полета беспилотного летательного аппарата*

**METHOD FOR FORMALIZING KNOWLEDGE ABOUT THE PROCESSES OF DETERMINING PERFECT FLIGHT STRATEGIES FOR UNMANNED VEHICLES DURING PREPARATION FOR AERIAL SURVEILLANCE BASED ON FUZZY LOGICAL SYSTEMS**

*Aleksandr Permiakov (Doctor of technical sciences, professor)<sup>1</sup>*

*Marina Dudko<sup>2</sup>*

*Natalia Korolyuk (Candidate of Technical Sciences, associate professor)<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*National defence University of Ukraine named after Ivan Chernyakhovsky, in Kiev, Ukraine*

<sup>2</sup>*Kharkiv national Air Forces University named after I. Kozhedub, Kharkiv, Ukraine*

*The article proposes an approach to the formalization of knowledge about the process of determining an appropriate flight strategy for an unmanned aerial vehicle at the stage of planning aerial reconnaissance using heuristic methods, which are the best in terms of taking into account practice, experience, intuition, knowledge of decision-makers, when conducting aerial reconnaissance, and are looking for solutions within some sub-space of possible acceptable solutions. The developed method allows one to formalize factors, takes into account the tactical conditions of aerial reconnaissance, the influence of the external environment on the flight range of an unmanned aerial vehicle in the form of linguistic and interval-estimated parameters for each option, which allow for uncertainty. The initial data of the method is a recommendation regarding an expedient flight strategy for an unmanned aerial vehicle, containing information on the list of the most important reconnaissance objects, the start point, the end of the flight route, the initial flight path, the recommended flight altitudes in dangerous areas, the method search and inspection of the terrain. Based on the structure of fuzzy production rules by the MISO-structure, in the conclusion of which real numbers (the number of the expedient strategy for the flight of an unmanned aerial vehicle) are used, which is proposed as a fuzzy inference algorithm in a fuzzy logical system of interval type 2 for derivation of inference for fuzzy sets of the second order. It is substantiated that the components of the architecture of a fuzzy logical system of interval type 2 provide the implementation of the corresponding inference mechanism, which is a set of inference rules and methods of their application.*



**Keywords:** *flight route planning, interval fuzzy sets of type 2, decision maker, fuzzy logical system, triangular fuzzy numbers, trapezoidal fuzzy intervals, knowledge, knowledge formalization, unmanned aerial vehicle flight strategy*

### References

1. **Kaminskiy, V.V.**, Analysis of application of UAF in modern armed conflicts on East of Ukraine / V.V. Kaminskiy, V.V. Turin, // Science and defense. - 2017. - № 3 (4). - P.4-8. 2. **Stepanov, G.S.**, Kaminskiy, V.V., Pavlenko, M.A. (2018), "Take a look at the problematic power supply of the Reconciled Forces in the prototype defense", [Pohlyady odnositel'no problemnykh voprosam! Zastosuvannya Povitryanykh Syl v protipovitryaniy oboroni], Science and Technology of the Air Forces of the Armed Forces of Ukraine, No. 1(30), pp.18-23. 3. **Kaminskiy, V.V.**, (2014), "The fight against air terrorism must begin with land", [Borotba z povitryanim terorizmom mae pochynatisya z zemli], Science and technology of the Air Forces of the Armed Forces of Ukraine, No. 1(14), pp. 16-23. 4. **Olizarenko, S.A.**, Brezhnev, Ye.V., Perepelitsa, A.V. (2010), "Nechetkiye mnozhestva tipa 2. Terminologiya i predstavleniye" [Nechitki mnozhyiny typu 2. Terminolohiya i uyavleniyya], Systems for processing information, VIP. 8(89). pp. 131–140. 5. **Olizarenko, S.A.**, Perepelitsa, A.V., Kapranov, V.A. (2011), "Interval fuzzy sets of type 2. Terminology, representation, operations" [Interval'nyye nechetkiye mnozhestva tipa 2. Terminologiya, predstavleniye, operatsii], Systems for processing information, VIP. 2 (92), pp. 39 - 45. 6. **Korolyuk, N.**, Pershin, A. (2019), "Ground of modern method in relation to the avtomatik processes of making decision for by the aviation's" [Osnova suchasnoho metodu shchodo avtomatychnykh protsesiv pryynyattya rishennya aviatsiyeyu], Collection of scientific works, №1 (59), pp. 32-39. 7. **Saaty, T.**, (2009), "Structures in decision making: On the subjective geometry of hierarchies and networks [on line]", European Journal of Operational Research, vol. 199, is. 3, pp. 867–872. 8. **Korolyuk, N.O.**, Korolov, R.V. and Korshets, O.A., (2017), "Procedura formalizacii danih, yaki vikoristovuyut'sya pri opisi procesu upravlinnya ruhom povitryanih ob'ektiv", [Procedure for formalizing data used in describing the process of controlling the movement of air objects], Communication, radio engineering, acoustics and navigation. pp. 103-106. 9. **Korolyuk, N.**, (2017), "An approach to prediction of the telecommunication network quality parameters under the conditions of non-stochastic uncertainty", Telecommunications and Radio Engineering, Issue 11. Volume 76, pp. 1027-1032. 10. **Korolyuk, N.O.**, Sinyavsky, V.V. and Haustov, D.O. (2017), "Udoskonalennya programnogo zabezpechennya kompleksiv zasobiv avtomatizacii pri rozpiznavanni tipu povitryanogo ob'ekta", [Improvement of software of complexes of automation means when recognizing the type of air object], Systems of armament and military equipment, No. 1(49), pp. 67-80. 11. **Timochko, O.I.**, and Zuyev, P.P. (2017), "Metod ocinki stupenya nebezpeki neshtatnih situacij u povitryanomu prostori", [Method of estimation of the degree of danger of abnormal situations in the air space], Science and technology of the Air Forces of the Armed Forces of Ukraine, No. 1(26), pp. 49-53. 12. **Yarushek, V.E.**, Prokhorov, V.P., Mishin, A.V. and Sudacov, B.N. (2011), "Teoreticheskie osnovy avtomatizacii processov vyrabotki reshenij v sistemah upravleniya", [Theoretion bases of automation of decision-making processes in control systems], KNAFU, 355 p. 13. **Rotshtein O. P.**, (2006) "Diahnostyka na bazi nechetkikh vidnoshen' v uslovyakh nevizna-chenosti", [Diagnosis based on fuzzy relationships in conditions of uncertainty ], Vinnica, MD, 275 p. 14. **Korolyuk, N.**, (2014) , "Hybrid model of knowledge for situation recognition in airspace", Automatic Control and Computer Sciences, Vol. 49, pp.16-25. 15. **Alimpiev, A.**, (2017), "Selecting a model of unmanned aerial vehicle to accept it for military purposes with regard to expert data" P.Berdnik, N.Korolyuk, O.Korshets, M. Pavlenko, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies ISSN 1729-3774. - №1/ 9 (85 pp 53-60. 16. **Hagras, H.**, Introduction to Interval Type-2 Fuzzy Logic Controllers – Towards Better Uncertainty Handling in Real World Applications / Hani Hagras, Christian Wagner // IEEE eNewsletter. Systems, Man and Cybernetics Society. – Issue 27. –June 2009. 17. **Mendel, J.M.**, Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems Made Simple / J.M. Mendel, R.I. John, Feilong Liu // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. – December 2006. – Vol. 14, no. 6. – P. 808-821. 18. **Permiakov, O.**, Korolyuk, N. (2018), "Informatsiyno – telekomunikatsiyni tekhnolohiyi i suchasna zbroyna borot'ba" [Information and telecommunication technologies and modern armed struggle], Scientific and technical conference of young scientists "Actual problems of information technologies", Kiev, MD, pp. 5-6. 19. **Mendel, J.M.**, Standard Background Material About Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems / J.M. Mendel, H. Hagras, R.I. John // IEEE CIS Standards Committee [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://iee-cis.org/technical/standards/>. 20. **Wu, H.**, Uncertainty Bounds and Their Use in the Design of Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems / H. Wu, J.M. Mendel // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. – October 2002. – Vol. 10, no. 5. – P. 622-639. 21. **Wu, D.**, Enhanced Karnik-Mendel Algorithms / D. Wu, J.M. Mendel // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. – August 2009. – Vol. 17, no. 4. – P. 923-934. 22. **Mendel, J.M.**, On centroid calculations for Type-2 Fuzzy Sets / J.M. Mendel // Appl. Comput. Math. – 2011. – V.10, no.1, Special Issue. – P. 88-96.