

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ КОМПЛЕКТАЦІЇ ГРУПИ БПЛА НА БАЗІ МОДЕЛЕЙ ГРАНУЛЬОВАНИХ ОБЧИСЛЕНЬ І НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

**Вступ.** Використання дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів (БПЛА) набуло масового характеру у різних сферах діяльності, зокрема у повітряній розвідці. В Україні військові БПЛА також розвиваються в напрямку групового застосування [1 – 7], інтелектуалізації і автономізації виконання операцій, інтеграції з системами НАТО, підвищення рівня ситуаційної обізнаності про оперативну обстановку. Збільшити ефективність збору інформації для гетерогенної групи БПЛА можна на основі оптимізації комплектації окремого літального апарату і вибору тактико-технічних характеристик членів групи.

Зростання кількості БПЛА призводить до збільшення навантаження на системи баз даних, що зберігають отриману інформацію і яку мають обробляти методи Big Data. Проблему прискорення обробки великих обсягів даних (Big Data) вирішують збільшенням продуктивності розподілених серверних систем, розробкою і вдосконаленням методів збору та обробки інформації. Це дозволяє прискорити прийняття рішення системами на базі штучного інтелекту або гібридними системами з людьми-операторами.

### Основні питання, що розглядаються в даній роботі:

- опис концепції обробки даних аерофотозйомки штучного інтелекту на базі гранульованих обчислень та методів Big Data;
- нечітка модель визначення або прогнозування якості аерофотознімків у БД;
- нечіткий алгоритм комплектування групи БПЛА обладнанням для прискорення виконання завдання та підвищення якості даних у БД.

### Визначення оптимального складу БПЛА для виконання поставленої задачі на основі теорії нечітких множин

В багатьох випадках для визначення того, чи здатен БПЛА з певним набором формалізованих характеристик виконати поставлені задачі, достатньо методики, описаної в [8 – 14]. Але можливі ситуації, коли доступні декілька БПЛА різних типів (тактичні, оперативні, стратегічні), що є приблизно еквівалентними для

*Розглянуто задачу оцінки якості комплектування обладнанням різномісних груп безпілотних літальних апаратів (БПЛА) на базі нечітких множин. Запропоновано новий підхід до підвищення продуктивності операцій реєстрації і обробки інформації за допомогою визначення якості зображення на основі кута нахилу відеокамер, висоти і швидкості польоту БПЛА. Оскільки вхідна інформація про стан сцени і дані з сенсорів БПЛА можуть бути неповними і слабо структурованими, у статті запропоновано застосовувати концепцію гранульованих обчислень та нечітких множин до побудови бази даних повітряної розвідки.*

**Ключові слова:** нечіткі множини, гранулярні обчислення, комбінаторна оптимізація, комплектація БПЛА.

виконання задачі (наприклад, повітряна розвідка, коректування вогню артилерії, ретрансляція зв'язку, доставка вантажу). В цьому випадку для застосування одного чи декількох БПЛА, що є оптимальними для виконання вищенаведеної задачі, інформації на основі формалізації характеристик на базі класифікацій буде недостатньо. Тому пропонується сформулювати на основі математичного апарату теорії нечітких множин та теорії статистичного аналізу уніфіковану систему оцінок БПЛА і розробити математичний апарат, що дозволить за цими формальними оцінками БПЛА та з використанням засобів автоматизації розв'язати поставлену задачу. Такий підхід застосовний не лише для вибору БПЛА з ряду наявних для виконання конкретної задачі, але й для вибору БПЛА (набору різних типів БПЛА), які слід закупити для найбільш ефективного виконання усієї сукупності задач, що можуть виникнути для них у майбутньому [11].

Низка робіт присвячена задачам класифікації БПЛА [8, 9] і визначенню складу колективу БПЛА для виконання спільних завдань [1 – 7, 9 – 12]. Подібні підходи на базі експертних оцінок застосовуються для визначення вимог до характеристик цифрових пристроїв [12] та у роботі банків для задачі оцінки платоспроможності запитувача кредита [13]. Задача аналізу комплектування також може розв'язуватись методами нелінійної оптимізації з використанням математичної статистики [14].

У більшості випадків застосування БПЛА їх завданням є аерофотозйомка [15, 16]. Зважаючи на різні умови її виконання (погода, час доби), обмеження: зони польоту БПЛА, доступні висоти, території з поганим станом радіозв'язку, вихідні дані будуть різної якості та масштабу. Інтегрувати такі слабкоструктуровані дані у єдину базу даних можна на основі підходів гранульованих обчислень. Гранульовані обчислення і нечіткі множини вищих порядків [17 – 20] застосовуються до низки проблем штучного інтелекту та Big Data, наприклад, при побудові алгоритмів цифрової обробки даних та створенні багаторівневих архітектур та ієрархічних систем.

#### **Гранульовані обчислення для систем дистанційного зондування**

Гранульовані обчислення (granulated computing) [17 – 20] – це підхід до розв'язування задач комп'ютерної обробки інформації з метою отримання знань, що ґрунтується на абстракції даних, об'єднанні даних у зв'язані інформаційні структури, а також використанні ієрархічних моделей складних систем та логічних мереж висловлювань для усвідомлення ситуації (situation awareness) людиною. Витоки гранульованих обчислень – це дослідження людського інтелекту та способів отримання знань з зібраних даних, мета яких є створення алгоритмів обробки даних штучного інтелекту для великих даних (Big Data).

Предметом досліджень гранульованих обчислень є різні рівні неоднорідності і нерегулярності інформації при вирішенні проблем. Ступені гранулярності інформації можна описати як рівні абстракції, ступені деталізації сцен, декомпозицію проблем, складності та рівні керування процесами обраних для моделювання систем. Об'єктами обробки гранульованих обчислень є сукупності гранул, які описують проблему на різних рівнях. Результат досліджень гранулярних обчислень – створення нових інформаційних структур, які зручні для обробки штучним інтелектом.

У системах обробки інформації за підходами гранульованих обчислень під гранулою розуміють подання або узагальнення певної інформації, у нашому випадку – даних аерофоторозвідки з метою прискорення реагування на події поля бою. Сукупність гранул різного розміру або їх походження утворює окремий рівень подання інформації (рис. 1). Декілька сукупностей гранул описують ієрархічно впорядковані множини даних. Структура частково впорядкованих кількох рівнів відома як ієрархія. Остання описує проблему з позицій вибраного класифікаційного підходу, що утворює декілька рівнів гранульованості інформації.

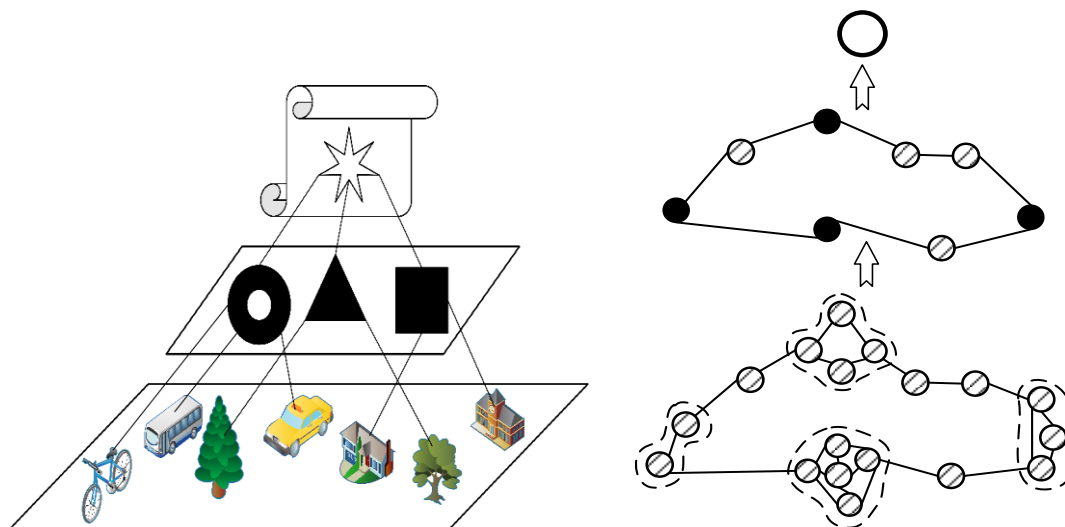


РИС. 1. Приклад, що ілюструє створення інформаційних гранул на декількох рівнях ієрархії та ілюстрація процесів структуривання даних і утворення інформаційних гранул з різними ієрархічними рівнями

На рис. 1 показано, як з зображень об'єктів утворюється три рівні абстракції, що розпізнаються, наприклад, нейромережевими алгоритмами [21] та поєднують у інформаційні гранули разом з даними телеметрії від БПЛА. В правій частині даного рисунку показано, що кілька вершин графу на вищому рівні об'єднуються в одну вершину.

Далі наводиться приклад побудови інформаційної гранули для оцінки або планування аерофоторозвідки БПЛА різного типу, або з різним оснащенням. Процес модифікації БД, що стосується аерофотозйомок відбувається наступним чином: на першому етапі вносяться координати пунктів відвідування, на другому – додаються гранульовані дані аерофотозйомки, на третьому – відбувається розпізнавання та опис сцен.

#### Особливості реєстрації інформації БПЛА

Можливості оснащення БПЛА засобами технічної розвідки обмежуються підйомною силою літального апарата та аеродинамічними характеристиками вантажу [8 – 11, 15, 16]. На вибір ширини поля зору камери (рис. 2) суттєво впливає потрібна якість зображення, висота польоту, атмосферні умови, типи давачів та передбачувана ціль. Вузька зона спостереження надає менше даних, але має кращі оцінки розмірів об'єктів та їх координат за результатами аерофотозйомки, а широке поле зору забезпечує більшу площу спостереження з меншою точністю реєстрації інформації.

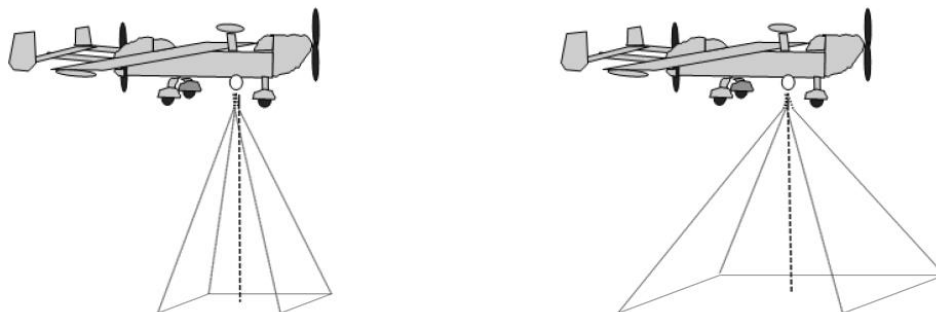


РИС. 2. Аерофотозйомка камерами з вузьким (ліворуч) і широким (праворуч) полем зору

Вибір раціонального оснащення БПЛА є першочерговим завданням, що визначає, які БПЛА підходять для виконання бойового завдання. Наприклад, багатоцільовому тактичному БПЛА з середніми часом польоту і висотою, який здатний нести на борту кілька різних камер, може бути доручено провести розвідку району, тоді як ударно-розвідувальному БПЛА буде призначено здійснювати нагляд за точковою ціллю. Це дозволяє використати переваги ширшого поля зору багатоцільового тактичного БПЛА для проведення розвідки, а оперативно-тактичний ударний БПЛА з відповідним оснащенням застосовувати по точковій цілі, оскільки він за потреби має на борту засоби для її знищення.

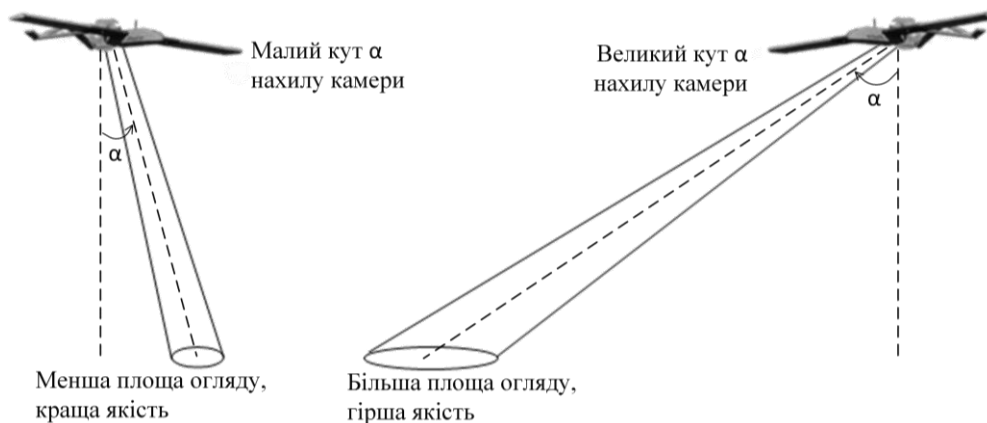


РИС. 3. Аерофотозйомка з малим (ліворуч) і великим (праворуч) кутом нахилу камери БПЛА щодо вертикалі

Сучасні БПЛА здатні розраховувати координати точок, на які спрямовано камери, і відображати їх поверх відеоданих за потреби. Точність обчислення координат залежить від відстані між БПЛА, точкою наведення та кута нахилу датчика. Якщо відстані однакові, великий кут нахилу (рис. 3 праворуч) може призвести до зменшення точності координат внаслідок геометричних спотворень образу, порівняно з координатами, отриманими з меншого кута (рис. 3 ліворуч). Автори робіт [15, 16] рекомендують вважати для досягнення кращої точності визначення координат об'єкта дотримуватись кута нахилу камери від 0 до 30° відносно вертикалі.

Крім того, БПЛА, дооснащені лазерним вимірювальним пристроєм відстані, надають точніші координати цілі, ніж БПЛА, що розраховують координати тільки за даними аерофотозйомки. Також зазначимо, що інформація, яка поступає у первинні системи ситуаційної обізнаності від БПЛА, має різну ступінь якості (гранульованості інформації) [17 – 20], що є невідворотним внаслідок дії фізичних і технічних обмежень засобів реєстрації і умов аерофотозйомки. Отже, для випадку аерофотозйомки гранулами виступають множини зображень з різними параметрами і умовами реєстрації та їх якості. Наведемо приклад формалізації якості зображення отриманого з БПЛА.

#### **Залежність якості зображень аерофотозйомки БПЛА від параметрів польоту**

Для горизонтального польоту БПЛА на фіксованій висоті з одним типом камери залежність якості аерофотозйомки від кута нахилу камери можна описати детерміновано гауссоподібною функцією (рис. 4).



РИС. 4. Залежність якості аерофотозйомки від кута нахилу камери БПЛА щодо вертикалі при фіксованій висоті польоту

Сучасні БПЛА обладнані кількома камерами і на якість зображення впливають: висота польоту, маневрування БПЛА, прискорення і швидкість під час реєстрації інформації та повертання камери під час реєстрації. Якість зображення можна приблизно описати функцією, яка показана на даному рисунку. Інакше можемо описати її, як нечіткість належності якості зображення від кута нахилу камери. Тобто якість зображення описується нечіткою множиною першого типу (Fuzzy set, type-1) [13, 20].

Розмитість залежності для якості зображення описує вплив висоти та інші фактори, які можна назвати шумами вимірювання та спотвореннями внаслідок руху, що впливають на розрізняльну здатність камери. Чим більша висота, тим менша розрізняльна здатність системи, і, відповідно, гірша якість деталізації фотографій. Залежність якості зображення від висоти польоту БПЛА має подібний вид на даному рисунку.

Розробимо нечітку модель прогнозування якості даних аерофотозйомки на керування параметрами польоту на основі даних телеметрії для постановки оптимізаційної задачі комплектування групи БПЛА.

#### **Нечітка модель керування висотою польоту БПЛА для визначення площі аерофотозйомки**

Розглянемо використання систем нечіткого виводу у задачі керування висотою польоту БПЛА при виконанні аерофотозйомки. Як алгоритм нечіткого виводу буде використовуватись алгоритм Сугено [13]. В загальному випадку різні правила матимуть різну вагу для агрегації нечітких продукцій. Але в даній роботі розглядається спрощений випадок, коли вага правил дорівнює одиниці та буде використовуватись логічне правило «І».

#### **Змістовна постановка задачі.**

При здійсненні аерофотозйомки БПЛА рухається по запланованому маршруту та відвідує пункти згідно до польотного завдання. Найкращі умови для аеро-фотозйомки визначаються на основі вимог замовника (наприклад, служба картографії, будівельна організація, агрохолдинг, підрозділ військової розвідки) до детальності серії фотографій або відеопотоку, яку найпростіше досягти при деякій (заданій або визначеній встановленою камерою) висоті польоту. Для даного розгляду знехтуємо параметрами швидкості, часом доби, порою року, погодними умовами, оптичним та цифровим збільшенням камери та іншими чинниками, що впливають на якість зйомки. Невраховання цих чинників наразі і додає невизначеності до залежності якості зображення від параметрів, що відображаються у моделі.

Суть задачі полягає в автоматичному регулюванні висоти польоту, на якій забезпечується потрібна замовнику якість фотографій. Досвід використання БПЛА, який відображено у статутах НАТО [15, 16], дозволяє сформулювати кілька евристичних правил, які застосовуються пілотом БПЛА для вибору висоти польоту.

1. Якщо висота замала, то слід збільшити тягу двигуна.
2. Якщо висота не дуже велика, то слід трохи збільшити тягу двигуна.
3. Якщо висота польоту задовільна, то не змінювати тягу двигуна.

4. Якщо висота польоту трохи більша за потрібну, то слід трохи зменшити тягу двигуна.
5. Якщо висота польоту завелика, то слід зменшити тягу двигуна.

Перелічені евристичні правила пропонується використовувати при побудові бази правил системи нечіткого виведення, яка технічно дозволяє реалізувати дану модель нечіткого програмного керування.

**Побудова нечітких лінгвістичних правил.**

Для формулювання бази правил систем нечіткого виводу [13] необхідно визначити вхідні й вихідні лінгвістичні змінні (рис. 5). Як вхідну лінгвістичну змінну пропонується використовувати висоту польоту БПЛА або формально – «висота польоту». Як вихідну лінгвістичну змінну будемо використовувати кут повороту рулів керування висотою на крилах БПЛА або формально – «кут повороту».

Таким чином, у нашому прикладі система нечіткого виводу буде складатись з таких нечітких правил:

ПРАВИЛО\_1: ЯКЩО «висота мала», ТО «збільшити тягу двигуна»

ПРАВИЛО\_2: ЯКЩО «висота не дуже мала», ТО «збільшити тягу двигуна на не дуже велике значення»

ПРАВИЛО\_3: ЯКЩО «висота задовільна», ТО «не змінювати тягу двигуна»

ПРАВИЛО\_4: ЯКЩО «висота не дуже велика», ТО «зменшити тягу двигуна на не дуже велике значення»

ПРАВИЛО\_5: ЯКЩО «висота велика», ТО «зменшити тягу двигуна на велике значення».

Якщо узагальнити цей приклад, де крім висоти врахувати ще кут нахилу камери і швидкість БПЛА, то вийде інший набір правил, який відобразиться у системі MatLab, як показано на рис. 5.

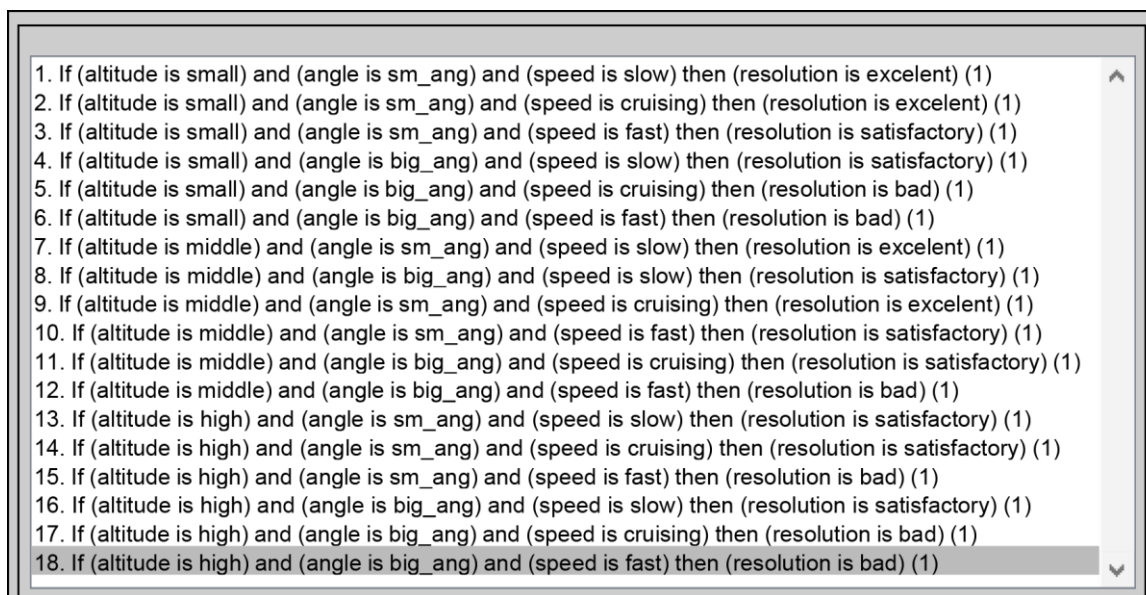


РИС. 5. Набір правил нечіткого виводу в MATLAB 2020b для трьох змінних

**Фазифікація вхідних змінних.**

Як набір значень першої лінгвістичної змінної будемо використовувати множину {«мала», «не дуже мала», «задовільна», «не дуже велика», «велика»} з лінійними функціями належності на рис. 6. Як другу лінгвістичну змінну будемо використовувати множину {«великий кут нахилу камери», «невеликий кут нахилу камери», «нуль»} з кусково-лінійними функціями належності, що показані на рис. 6. Кут повороту вимірюється в градусах, а висота – в метрах.

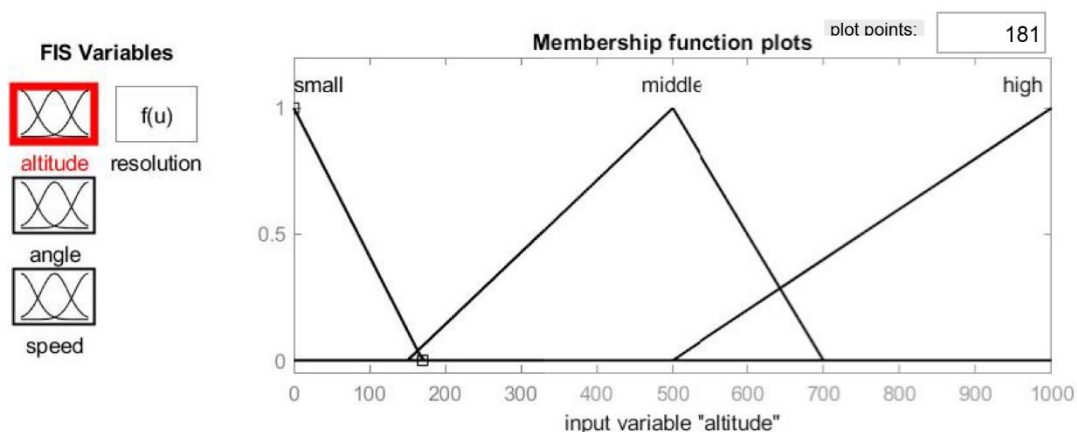


РИС. 6. Приклад функції належності для висоти польоту БПЛА

На рис. 7 показано результат оцінювання якості зображення (resolution) аерофотозйомки за допомогою поданої нечіткої моделі з трьома параметрами польоту БПЛА: висота (altitude), кут нахилу камери (angle) і швидкість польоту БПЛА (speed).

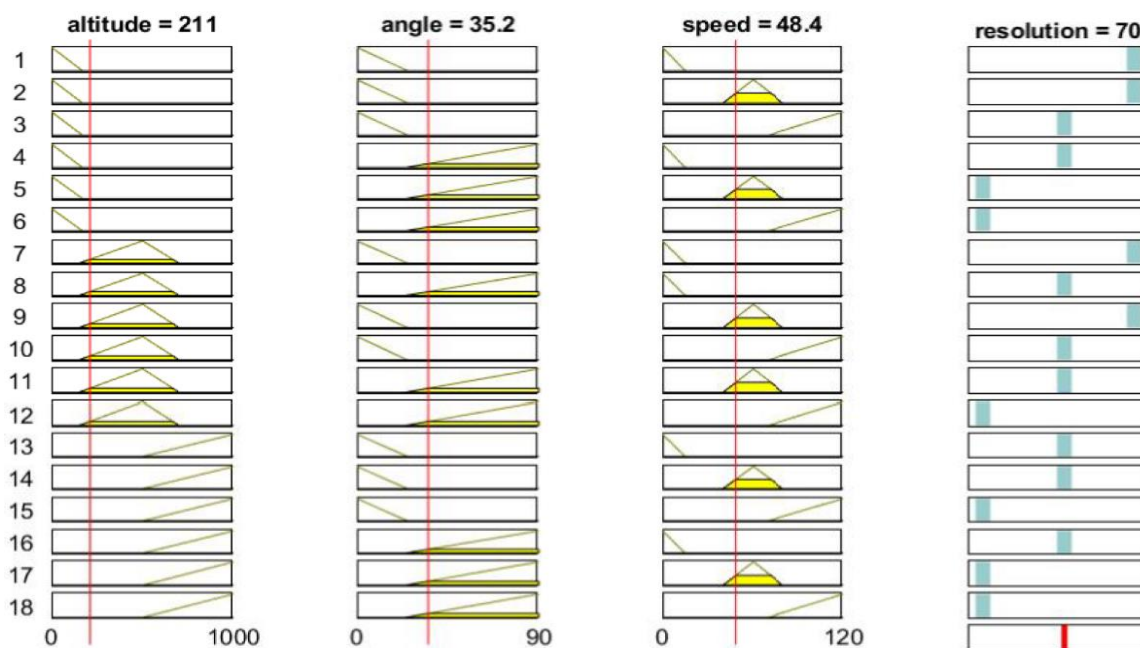


РИС. 7. Розрахунок якості зображення (resolution) за трьома нечіткими змінними: висота польоту БПЛА (altitude), кут нахилу камери (angle), швидкість польоту (speed)

Як відомо [13], нечіткі алгоритми і моделі дозволяють швидше отримувати результати порівняно з традиційними статистичними методами оцінки параметрів та методами визначення якості зображень.

Зрозуміло, що параметри давачів можуть мати суттєве відхилення від номінальних значень, яким не можна знехтувати. В такому випадку доцільно перейти до використання нечітких множин другого типу, що враховують такі відхилення значень. Тобто функція якості зображення має невизначеність по вертикальній осі, описується нечіткими множинами другого типу (Fuzzy Set, type-2) [13, 20] та нечітке членство (належність) спотворень від нахилу камери та висоти польоту. Значення швидкості та кута нахилу відображені в інтервал  $[-1, 1]$  (рис. 8).

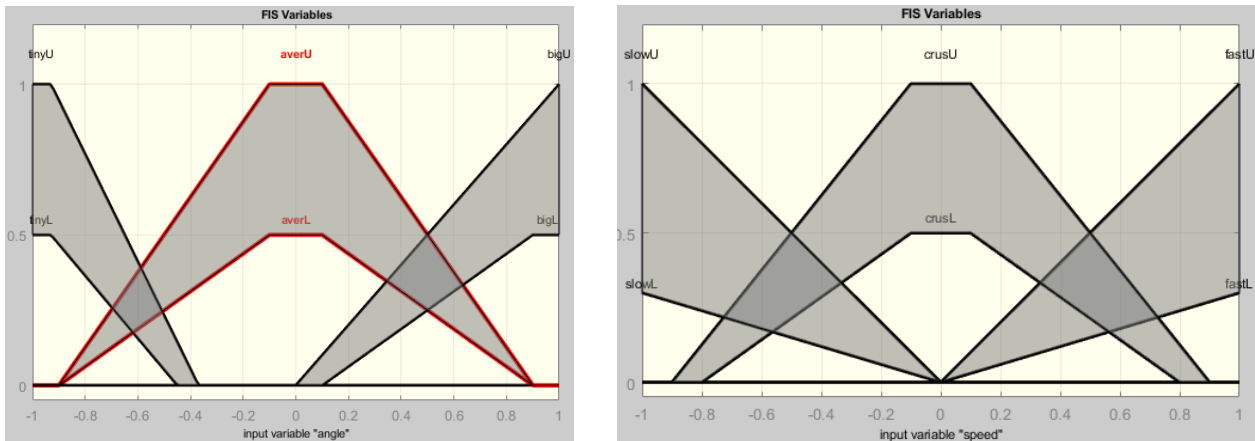


РИС. 8. Нечіткі, тип-2 функції належності для швидкості та кута нахилу камери

Дані, що отримують від розробленої моделі, є прикладом інформаційної гранули, які можна використовувати для прогнозування досяжної якості зображення при русі БПЛА за маршрутом та вибору відповідного обладнання та комплектування БПЛА або його вибору.

Отже, розроблено модель прогнозування якості даних аерофотозйомки на базі нечіткої логіки, що дозволяє корегувати висоту і швидкість окремого БПЛА та кут нахилу відеокамери для отримання найкращої якості зображень, а також визначати техніко-економічні вимоги для задачі оптимального оснащення групи БПЛА.

#### Розробка уніфікованої системи вибору БПЛА

БПЛА представляють собою складні технічні системи. Складність при формуванні методології оцінки їх ефективності при виконанні поставлених завдань породжена такими факторами [12]:

- необхідністю врахування великої кількості показників (вимог) при оцінюванні та виборі раціонального варіанту БПЛА з усієї множини наявних;
- якісним характером частини показників (вимог), що враховуються при оцінюванні БПЛА;
- істотним взаємозв'язком та взаємозалежністю цих показників (вимог), що мають суперечливий характер (наприклад, менший БПЛА є більш складним для приладового та візуального виявлення супротивником – але може нести менше корисного навантаження і має менший радіус дії).

Ці перераховані особливості практично унеможливають застосування традиційних математичних методів (методів математичної статистики та теорії ймовірностей) при виявленні моделі, яка буде найбільш ефективно відповідати поставленому переліку вимог.

Тому існує нагальна необхідність у розробці уніфікованої системи оцінювання характеристик БПЛА, в якій користувач буде самостійно обирати важливі для нього критерії вибору БПЛА (вказуючи їх пріоритети, наприклад, у числовому чи процентному відношенні). Для її реалізації необхідно:

- всі доступні для застосування БПЛА формалізувати по сукупності їх параметрів та функцій, які мають бути зведені в єдину інформаційну базу;
- сформувані на основі математичного апарату теорії нечітких множин та теорії статистичного аналізу уніфіковану систему оцінок БПЛА;
- провести розробку математичного апарату, що дозволить по цих формальних оцінках БПЛА та з використанням засобів автоматизації вирішити поставлену задачу.

Складність процесу прийняття рішень, відсутність необхідного математичного апарату призводить до того, що при оцінюванні треба обробляти та використовувати якісну експертну інформацію, сформовану на базі теорії нечітких множин. Математична статистика та теорія ймовірностей використовують експериментальні дані, які мають строго визначені точність та достовірність. Теорія нечітких множин працює з якісними характеристиками, які також називають експертною інформацією [22].



Під ефективністю БПЛА розуміють ступінь його придатності до виконання поставлених перед ним вимог у конкретних умовах роботи. Ефективність БПЛА – це узагальнена характеристика, яка може бути виражена функцією від великої кількості різних окремих характеристик (технічних, часових, вартісних тощо) і представлена у вигляді багатовимірного вектора. До компонент вектора ефективності встановлюються різноманітні вимоги, деякі з яких можуть суперечити одна одній [22].

#### Математичний апарат нечіткої логіки, придатний для вибору складу колективу БПЛА

Нехай  $X$  – універсальна множина, тобто повна множина, яка охоплює усю проблемну область вибору БПЛА для виконання задачі. Нечітка множина  $A \subset X$  – це набір упорядкованих пар  $\{(x, \mu^A(x))\}$ , де  $x \in X$  і  $\mu^A : X \rightarrow [0,1]$  – функція належності, яка являє собою деяку суб'єктивну міру відповідності елемента нечіткій множині,  $\mu^A(x)$  може приймати значення від нуля, який означає абсолютну неналежність, до одиниці, яка, навпаки, означає абсолютну належність елемента  $x$  до нечіткої множини  $A$ . Якщо нечітка множина  $A$  визначена на скінченній універсальній множині  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ , то її можна подати так:

$$A = \mu^A(x_1)/x_1 + \mu^A(x_2)/x_2 + \dots + \mu^A(x_n)/x_n = \sum_{i=1}^n \mu^A(x_i)/x_i, \quad (1)$$

де  $\mu^A(x_i)/x_i$  – пара «функція належності/елемент», що називається синглтоном, а «+» – визначає сукупність пар. На нечітких множинах визначаються нечіткі числа – це нечітка множина  $A$ , визначена на множині дійсних чисел, якщо її функція належності нормальна та опукла, тобто:

$$\sup_{x \in \mathbb{R}} \mu^A(x) = 1, x \leq y \leq z \Rightarrow \mu^A(y) \geq \min(\mu^A(x), \mu^A(z)).$$

Приклади нечітких чисел: «близько 5», «трохи більше 7». Але арифметичні операції над нечіткими числами в загальному випадку досить складні та неефективні, тому їх переважно представляють у LR-формі, що відповідає опису лівої та правої частин функції. Тоді нечітке число  $A$  має вигляд:

$$\mu^A(x) = \begin{cases} L\left(\frac{m-x}{\alpha}\right), \alpha > 0, \forall x \leq m, \\ R\left(\frac{m-x}{\beta}\right), \beta > 0, \forall x \leq m, \end{cases}$$

де  $L$  і  $R$  – функції, що мають такі властивості:  $L(-x) = R(x)$ ,  $L(0) = 1$ ,  $R$  монотонно спадає на проміжку  $[0, +\infty]$ . Тут  $m$  – середнє значення нечіткого числа  $A$ ,  $\alpha$  – відхилення зліва,  $\beta$  – відхилення справа. Використання нечітких чисел та множин дає змогу застосовувати нечітку логіку.

Нечітким логічним виразом називають формулу, в склад якої входять нечіткі предикати – відображення  $P^F : X^n \rightarrow [0,1]$ , де  $n$  – будь-яке натуральне число, що належить відрізьку  $[0,1]$ . Число, яке предикат ставить у відповідність конкретному набору  $x_i$ , називають рівнем істинності даного виразу. Над складними нечіткими логічними виразами проводяться допустимі дії – кон'юнкція, диз'юнкція та інверсія. Нечіткою називається логіка, де рівень істинності виразу обчислюється за допомогою операцій над нечіткими множинами та числами. Це виконується встановленням порогу потрібного рівня істинності  $\gamma_0 \in [0,1]$ , причому в загальному випадку рівень істинності також виявиться не числом з відрізьку  $[0,1]$ , а нечітким числом.

### Спрощене розв'язування задачі вибору БПЛА без застосування нечіткої логіки

Розрахунок комплексного показника оцінки відповідності БПЛА поставленій задачі можна здійснювати без використання нечіткої логіки, за допомогою безрозмірних відносних показників [5]. Нормування показника  $P_{ij}$  – розрахунок його відносного значення  $q_{ij}$  виконується з використанням показників базового БПЛА даного типу  $P_{ij}$ , як використання ідеального БПЛА, що об'єднує у собі найкращі досягнення по всіх, без виключення, показниках, які аналізуються для відповідної групи БПЛА (наприклад, ідеальний розвідувальний БПЛА).

У випадку простих критеріїв цей показник відповідності вимогам визначається за виразом:

$$N_i = \sum_{i=1}^n \lg(q_{ij}),$$

де  $n$  – кількість показників.

Для складних задач, де можуть застосовуватись складніші критерії, комплексний показник відповідності БПЛА поставленим вимогам визначається так:

$$N_i = \sum_{i=1}^n (1 - q_{ij})^2.$$

Чим менша абсолютна величина комплексного показника відповідності вимогам, тим вищий власне рівень відповідності для даного БПЛА.

Але, як вже було сказано вище, цей метод не може дати точних результатів через те, що не враховує існуючі взаємозв'язки між показниками. Крім того, ідеальний БПЛА – абстракція, бо кожна реальна задача має свій набір вимог до ідеального для її виконання БПЛА (чи їх набору) того чи іншого класу, причому ці вимоги часто суперечать одна одній. Тому за допомогою цього методу оцінка рівня відповідності БПЛА поставленим вимогам може бути лише наближеною – точного результату він надати не в змозі.

#### Виділення найважливіших показників БПЛА

Для оцінки ефективності БПЛА, що підлягає розгляду, слід виділити найбільш важливі показники, що мають системний характер і визначають відповідність БПЛА поставленим перед ним завданням. Назвемо найбільш універсальні серед цих показників:

- тип БПЛА військової призначеності ( $K_1$ );
- масштаб завдань ( $M_1$ );
- місце базування ( $K_2$ );
- принцип створення підйомної сили ( $K_3$ );
- максимальна висота польоту ( $M_2$ );
- максимальна швидкість польоту ( $M_3$ );
- максимальний час польоту ( $M_4$ );
- тип цільового спорядження ( $K_4$ );
- тип засобів бойового навантаження ( $K_5$ ).

Але існують й інші показники, причому вони можуть змінюватись у залежності від типу та класу БПЛА, а також від особливостей поставленої задачі. Якщо ж розглядати відповідність БПЛА поставленим перед ним вимогам лише за цими показниками, то її можна представити у вигляді вектора (1).

Зрозуміло, що набір вимог коливається в залежності від типу БПЛА – наприклад, для розвідувальних або ретрансляційних БПЛА не має сенсу розглядати тип бойового навантаження. Тобто кожен клас БПЛА має свій вектор показників (функцій). Значення цих окремих показників для конкретного БПЛА та вимоги, висунуті до цього показника, найкраще демонструють відповідність даного БПЛА поставленим вимогам. Для визначення відповідності БПЛА вимогам для кожного групового показника відкладаються досягнуті показники даної групи, та їх відповідність потрібному рівню цих показників. Сумарні значення усіх показників групи характеризують мету і досягнуте значення за кожним груповим показником. Наприкінці розраховується інтегральне оціночне значення (у відсотках співпадіння). В результаті даних обчислень ми отримуємо значення, що характеризує ступінь наближення БПЛА до висунутих до нього вимог за узагальненим показником. З отриманих результатів можна оцінювати, чи відповідає даний БПЛА поставленим перед ним вимогам у достатній мірі.

### Вибір БПЛА для розв’язування поставленої задачі

Найбільш ефективним буде використання цього методу при його реалізації у вигляді програмного продукту для автоматизації вищеописаних обчислень для вибору БПЛА, найбільш застосовного для виконання поставленої задачі, на основі попередньо сформованих уніфікованих наборів показників усіх наявних БПЛА, причому користувач системи (командир) сам буде обирати як потрібні йому показники (функції), так і вагові коефіцієнти кожного показника з обраного вектора функцій. Як додатковий показник можна також додати зручність керування БПЛА. Після цього виконується пошук з урахуванням встановлених вимог по усьому списку БПЛА даного класу (декількох класів) у відповідності до формули, що використовує вищенаведений математичний апарат нечіткої логіки:

$$z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \Delta q_i \alpha_{ij} x_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=k+1}^m \Delta q_i \alpha_{ij} \mu(x_j), \quad (2)$$

де  $x_j$  – поточне значення  $j$ -ї вимоги,  $\alpha_{ij}$  – ступінь впливу вимоги на загальний результат (її коефіцієнт, встановлений користувачем),  $\Delta q_i$  – область допустимих відхилень відповідності пристрою вимогам. У загальному випадку оцінювання проводиться як за кількісними параметрами (перші  $k$  вимог із загального набору  $m$ ), так і за якісними (останні  $m - k$ ), для оцінки яких і застосовується нечітка логіка.

Цей пошук дає змогу визначити БПЛА, що відповідає персональним вимогам поточної задачі. Також у відповідності до кількості отриманих результатів обирається  $\Delta$  – зона можливих рішень, що встановить допустимий рівень відхилення отриманих результатів від заданих вимог. Розмір цієї зони (рівень відхилення) також може обиратись користувачем системи. Можливо також використання декількох градацій вибірки – проведення вибірки з вже сформованої вибірки за другорядними параметрами для зменшення кількості результатів та обрання кращих з них.

### Приклад оцінки БПЛА за запропонованою методикою

Розглянемо застосування запропонованої методики на прикладі для підзадачі з множиною характеристик  $C_2$ . При постановці задачі командир додав до класифікаційних вимог дві вимоги: прихованість польоту БПЛА ( $M_5$ , пріоритет по шкалі від 0 до 1 – 0,5), зручність керування БПЛА ( $M_6$ , 0,6). Усі інші характеристики для цієї задачі були визнані неістотними. Допустиме відхилення від найкращого результату для всіх параметрів визначено як  $\Delta q_i = 0,5$ , тобто командир готовий розглядати і результати, що не є близькими до оптимальних.

Перевіримо відповідність, наприклад, БПЛА «Спектатор» [23] поставленій задачі. Прихованість польоту та зручність керування БПЛА «Спектатор», оцінювались за 100-бальною шкалою експертом. Прихованість польоту серед усіх відомих експерту БПЛА визначена як 0.6 (або 60 балів із 100 можливих). Зручність керування БПЛА «Спектатор» визначена як 0.85 (або 85 балів із 100 можливих). Визначення інших параметрів цього БПЛА та обґрунтування цього визначення виходить за рамки даної роботи. Загальний результат склав:

$$z = \Delta q_1 \times \alpha_1 \times K_1 + \Delta q_2 \times \alpha_2 \times K_2 + \Delta q_3 \times \alpha_3 \times K_3 + \Delta q_4 \times \alpha_4 \times K_4 + \\ + \Delta q_5 \times \alpha_5 \times K_5 + \Delta q_6 \times \alpha_6 \times M_1 + \Delta q_6 \times \alpha_6 \times M_2 + \Delta q_7 \times \alpha_7 \times M_3 + \\ + \Delta q_8 \times \alpha_8 \times M_4 + \Delta q_9 \times \alpha_9 \times M_4 + \Delta q_{10} \times \alpha_{10} \times M_5 + \Delta q_{11} \times \alpha_{11} \times M_6 = 0,9253.$$

Як бачимо, при максимумі, що дорівнює одиниці, БПЛА «Спектатор» показав хороший результат і є придатним для виконання поставленого завдання.

**Результати.** Для цього запропоновано модель прогнозу якості отриманих аерофотознімків на базі даних про швидкість, висоту БПЛА та кут нахилу відеокамери. В основу моделі покладено напрацювання теорії нечітких множин першого і другого типів. Наведено приклад реалізації моделі в системі комп'ютерної математики MatLab 2020b.

На основі аналізу низки робіт з класифікації БПЛА та запропонованої моделі якості зображення побудовано методику комплектування обладнанням для групи БПЛА та вибору їх типів, а також запропонована змістовна постановка задачі комбінаторної оптимізації на базі класичної задачі рюкзака.

**Висновки.** Зростання кількості БПЛА різного призначення та розширення сфер їх застосування у складі гетерогенних груп ставить питання розробки нових критеріїв ефективності їх використання, оптимізації комплектування БПЛА, мінімізації часу підготовки до польоту та ін. Перелічені проблеми експлуатації груп БПЛА можуть бути формалізовані за допомогою підходів нечіткої логіки та зведені до відомих задач комбінаторної оптимізації.

Одним з основних застосувань БПЛА або їх груп є аерофотозйомка. Гранульовані обчислення – одна з нових концепцій об'єднання слабкоструктурованої інформації отриманої з різнотипних БПЛА в інтелектуальні бази даних та подальшої її обробки штучного інтелекту та технологіями Big Data.

Запропоновано нову математичну модель (інформаційну гранулу) на базі нечітких даних про висоту і швидкість польоту, кут нахилу камери, яка дозволяє отримати прогноз якості зображення, що може бути отримана БПЛА при русі за маршрутом. Розроблено нову методику автоматизованого вибору комплектації для груп БПЛА на базі нечіткої логіки, що дозволяє отримати в подальшому оптимальний варіант його оснастки, декілька рівноцінних за широким набором параметрів варіантів комплектації та виконати їх порівняння за набором об'єктивних критеріїв.

Таким чином, штучний інтелект або керівник зможе обирати БПЛА чи їх набір, який потрібен саме для виконання поточного завдання, не витрачаючи кожного разу час на пошук, перевірку параметрів та характеристик БПЛА. Подібним чином можна визначити, які БПЛА є оптимальним вибором для виконання сукупності задач, що можуть виникнути в майбутньому, при виборі цих БПЛА для закупівлі.

#### Список літератури

1. Корольов В.Ю. Маршрутизація ланки крилатих ракет багаторазового використання. *Управляющие системы и машины*. 2019. **2**. С. 16–24. <https://doi.org/10.15407/usim.2019.02.016>
2. Корольов В.Ю., Ходзінський О.М. Тополого-комбінаторна модель побудови мереж для транспортних засобів. *Компьютерная математика*. 2018. **1**. С. 61–67. <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/161850>

3. Корольов В.Ю., Огурцов М.І., Ходзінський О.М. Про задачу побудови маршрутів руху для групи рухомих дистанційно керованих систем. *Обчислювальний інтелект. Праці міжнар. наук.-практ. конф.*, 16–18.05.2017. Київ: ВПЦ «Київський університет». 2017. С. 247–248.
4. Корольов В.Ю., Поліновський В.В., Огурцов М.І. Моделювання мереж зв'язку рухомих дистанційно керованих систем на базі HLA. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2017. **1** (245). С. 160–165. [http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Vchnu\\_tekh\\_2017\\_1\\_33.pdf](http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Vchnu_tekh_2017_1_33.pdf)
5. Корольов В.Ю., Огурцов М.І. Транспортно-комунікаційна задача для груп безпілотних апаратів. *Математичні машини і системи*. 2017. **1**. С. 82–89. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/117508>
6. Гуляницький Л.Ф., Корольов В.Ю., Огурцов М.І., Ходзінський О.М. Проблема маршрутизації груп БПЛА в задачах пошуку і моніторингу. *Комп'ютерна математика*. 2018. **2**. С. 38–47. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/161884>
7. Корольов В.Ю., Огурцов М.І., Ходзінський О.М. Математичне моделювання маршрутів рухомих дистанційно керованих систем та їх груп при обстеженні території. *Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту. Матеріали міжнар. наук. конф.* Херсон: Видавництво ПП Вишемирський В.С. 2017. С. 199–201.
8. Корченко А.Г., Ільяш О.С. Обобщенная классификация беспилотных летательных аппаратов. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил*. Харків, 2012. **4**. С. 27–36.
9. Ponda S.S., Johnson L.B., Geramifard A., How J.P. Cooperative mission planning for multi-UAV teams. *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. Dordrecht: Springer. 2015. P. 1447–1490. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-9707-1\\_16](https://doi.org/10.1007/978-90-481-9707-1_16)
10. Огурцов М.І. Огляд задач визначення складу колективу БПЛА, необхідних для виконання поставленого завдання. *Міжнар. наук. симпозіум «Інтелектуальні рішення». Обчислювальний інтелект: праці Міжнародної науково-практичної конференції*. 15-20.04.2019. Ужгород: ДВНЗ «Ужгородський національний університет». 2019. С. 117–118.
11. Гуляницький Л.Ф., Огурцов М.І. Визначення оптимального складу групи БПЛА для виконання поставленої задачі на основі теорії нечітких множин. *Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання. Матеріали статей Міжнародної науково-практичної конференції*. Івано-Франківськ, 18 – 22.05.2020. Івано-Франківськ: Голіней О.М. 2020. С. 36–39.
12. Ходзінський О.М., Огурцов М.І. Розроблення уніфікованої системи оцінок цифрових пристроїв. *Вісник університету “Україна”. Серія “Інформатика, обчислювальна техніка та кібернетика”*. 2010. **8**. С. 145–149.
13. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FuzzyTECH. Петербург: БХВ-Петербург. 2005. 736 с.
14. Кононов В.Б., Кушнерук Ю.И., Коваль А.В. Метод решения задачи замены состава вооружения группировки войск. *Системы озброєння і військова техніка*. 2012. **2** (30) С. 162–166.
15. FM 3-04.155 Army Unmanned Aircraft System Operations. Headquarters, Department of Army, Washington, 2009. 152 p.
16. Koch W.L. Shadow Troop Handbook. A doctrinal approach to the employment of the RQ7-B Shadow Tactical Unmanned Aircraft System in the Armed Reconnaissance Squadron. Combat Aviation Brigade, 1st Infantry Division. 2011. P. 57.
17. Pedrycz W., Chen Sh.-M. Granular Computing and Intelligent Systems. Design with Information Granules of Higher Order and Higher Type. Springer. 2011. P. 306.
18. Pedrycz W., Chen Sh.-M. Information Granularity, Big Data, and Computational Intelligence. Springer. 2015. P. 444. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-08254-7>
19. Yao J.-T. Novel Development in Granular Computing: Applications for Advanced Human Reasoning and Soft Computation. Information Science Reference. New York, 2010. P. 570. <https://doi.org/10.4018/978-1-60566-324-1>
20. Bell R., Falcon R., Pedrycz W., Kasprzyk J. Granular Computing: At the Junction of Rough Sets and Fuzzy Sets. Springer. 2008. 352 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-76973-6>
21. Koul A., Ganju S., Kasam M. Practical Deep Learning for Cloud, Mobile, and Edge. O'Reilly. 2020. P. 620.
22. Борисов А.Н., Крумберг О.А., Федоров И.П. Принятие решения на основе нечетких моделей: примеры использования. Рига: Знание. 1990. 184 с.
23. БПАК SPECTATOR. <https://merydian.kiev.ua/services/bezpilotnuy-avia-kompleks/> (звернення 12.11.2021)

Одержано 06.03.2021

**Корольов Вячеслав Юрійович,**

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник  
Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ,  
<https://orcid.org/0000-0003-1143-5846>

**Огурцов Максим Ігорович,**

науковий співробітник Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ,  
<https://orcid.org/0000-0002-6167-5111>

**Ходзінський Олександр Миколайович,**

кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник  
Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ.  
[okhodz@gmail.com](mailto:okhodz@gmail.com)

UDC 519.876

Vyacheslav Korolyov, Maksim Ogurtsov, Alexander Khodzinsky \*

## Statement of the Problem of Complete Set of UAV Group on the Basis of Models of Granular Calculations and Fuzzy Logic

*V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine, Kyiv*

\* Correspondence: [okhodz@gmail.com](mailto:okhodz@gmail.com)

**Introduction.** The increase in the number of heterogeneous groups of UAVs that jointly perform aerial photography missions generates a large amount of poorly structured information: videos, photos, telemetry records, navigation data. To build intelligent databases from unstructured information sources from UAV groups, granular computational approaches are proposed. These approaches are the basis for the application of Big Data technologies and artificial intelligence to increase situational awareness or commercial value of knowledge gained from the data flow from UAV groups.

**The purpose of the article.** Develop new models for assessing the quality of video data from UAVs, approaches to equipping heterogeneous groups of UAVs and indicators for assessing its tactical and technical characteristics as a team.

**Results.** The success of UAV group mission planning is based on the forecast of quantitative and qualitative indicators of the received video data. For this purpose, a model for forecasting the quality of the obtained aerial photographs based on the data on the speed, height of the UAV and the angle of the video camera is proposed. The model is based on the development of the theory of fuzzy sets of the first and second types. An example of the implementation of the model in the system of computer mathematics MatLab 2020b is given.

Based on the analysis of a number of works on UAV classification and the proposed model of image quality, the method of equipment for the UAV group and the choice of UAV types are built, as well as the content of the combinatorial optimization problem based on the classic backpack problem. An example of calculations of tactical and technical characteristics for the Ukrainian UAV "Spectator" of Meridian Ltd. is given.

**Conclusions.** A new model for assessing the quality of aerial photography images based on fuzzy logic has been developed. The method of staffing UAV groups is proposed.

**Keywords:** Fuzzy logic, granular calculations, UAV equipment, heterogeneous groups, computer simulation.