

І. М. Ключніков

Національний аерокосмічний університет “Харківський авіаційний інститут”, Харків, Україна

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ СТРУКТУРИ ТА СКЛАДУ МУЛЬТИАГЕНТНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ МАЛИХ МОДУЛЬНИХ РЕАКТОРІВ ПОБУДОВАНОЇ НА ОСНОВІ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Анотація. Аварія на атомній електростанції (АЕС) в м. Фукусіма показала, що використання систем моніторингу на основі безпілотних літальних апаратів (БПЛА) дозволило здійснювати оцінку наслідків аварії та проводити післяаварійний моніторинг інфраструктури АЕС та навколишньої території. Однак, розгортання такої системи моніторингу здійснювалось вже після аварії, коли не було інших можливостей для отримання інформації. Крім того процес створення та розгортання таких систем, які є унікальними, та призначені для моніторингу конкретного об'єкту. Поширення застосування БПЛА на різноманітні сфери покаже, що вони можуть використовуватись як гнучкі сервіси для виконання різних завдань в автономному режимі, що передбачає впровадження засобів їх інтелектуалізації. Одним з напрямів розвитку атомної енергетики є малі модульні реактори (ММР) і використання БПЛА у складі систем моніторингу інфраструктури ММР дозволить вирішувати широке коло завдань. **Предметом статті** є процес формування систем моніторингу на основі БПЛА. **Мета статті** – запропонувати підхід з вдосконалення процесу синтезу інтелектуальних систем моніторингу об'єктів атомної енергетики. **Завдання статті:** запропонувати метод визначення структури та складу мультиагентних систем моніторингу на основі БПЛА (МА-БПЛА-СМ) для виконання різноманітних завдань з урахуванням вимог та умов навколишнього середовища, для чого розробити концептуальну модель холонічної МА-БПЛА-СМ та базу знань у вигляді онтології, для виведення необхідних знань під час синтезу МА-СМ; надати приклад використання запропонованого методу для формування структури МА-БПЛА-СМ при виконанні завдань моніторингу ММР (МА-БПЛА-ММР-СМ), а саме здійснення моніторингу у складі системи фізичного захисту ММР. Отримані наступні **результати роботи.** Розроблена і описана концептуальна модель холонічної МА-БПЛА-ММР-СМ. Розроблено та описано метод визначення структури та складу МА-БПЛА-ММР-СМ. При цьому враховано необхідність формування підсистеми виконання завдань у вигляді холонів БПЛА та холонів забезпечення тривалого функціонування МА-БПЛА-ММР-СМ. Розроблено варіант онтологічної бази знань та показано приклад її використання для отримання переліку БПЛА, обладнання, необхідного для виконання завдань у визначених умовах з заданими вимогами. Розглянуто можливі варіанти здійснення моніторингу фізичної безпеки інфраструктури ММР та запропонована модель функціонування МА-БПЛА-ММР-СМ з періодичним покриттям зони обмеженого доступу, яка дозволяє визначати необхідну чисельність БПЛА та станцій обслуговування. **Напрямок подальших досліджень** полягає у розробці методу вибору та імплементації моделей, необхідних для визначення потрібної чисельності БПЛА в МА-БПЛА-ММР-СМ для забезпечення заданих показників надійності виконання завдань.

Ключові слова: система моніторингу; холонічна мультиагентна система; онтологія; безпілотний літальний апарат; станція обслуговування; малий модульний реактор; фізичний захист.

Вступ

Постановка проблеми. Застосування БПЛА в системах моніторингу дозволяє значно розширити можливості таких систем та здійснювати виконання завдань в умовах, небезпечних для людини. Наразі, системи моніторингу об'єктів критичної інфраструктури, зазвичай розгортаються в умовах часових обмежень та в унікальних специфічних умовах [1, 2].

Аварія на атомній електростанції у Фукусімі показала, що використання безпілотних літального апаратів (БПЛА) дозволило розгорнути систему моніторингу для визначення наслідків аварії [3, 4].

ММР зараз є одним з найбільш перспективних трендів в галузі електроенергетики. Особливості побудови ММР та широке коло завдань моніторингу, які необхідно виконувати в процесі їх експлуатації, для виконання яких доцільно застосовувати БПЛА, обумовлюють використання БПЛА як сервісів, що можуть виконувати різні типи завдань, спрямованих на підвищення рівня безпеки, до яких відносяться [5]:

1. Інспекція та моніторинг: БПЛА, оснащені камерами, тепловізорами та іншими сенсорами, можна використовувати для виконання планових інспекцій і моніторингу ММР та територій ММР. Вони можуть забезпечити детальне спостереження за компонентами

та системами ММР та ділянками ММР, виявити будь-які аномалії чи несправності та допомогти виявити потенційні проблеми до їх загострення.

2. Розгортання Ad Hoc мереж: БПЛА може нести обладнання для збору даних передачі від ММР, вимірювальних станцій до диспетчерської/центру.

3. Безпека: БПЛА можуть використовуватися для охорони периметра та спостереження за об'єктами ММР як частина системи фізичного захисту. Вони можуть спостерігати за територією над і навколо зони розташування реакторів і виявляти будь-яку підозрілу активність, зловмисників або потенційні загрози.

4. Реагування на надзвичайні ситуації: у разі надзвичайної ситуації можна розгорнути БПЛА для швидкої оцінки ситуації та забезпечення обізнаності про ситуацію, наприклад, БПЛА можна використовувати для огляду та картографування місцевості на території ММР та навколо цієї області для оцінки наслідків аварії.

Розміри площадок розміщення складових ММР досить велика, а завдання БПЛА різноманітні, тому необхідно використовувати флоти БПЛА та створювати інфраструктуру для розміщення та обслуговування парку БПЛА. Ця інфраструктура має забезпечити тривалу експлуатацію БПЛА в автономних умовах і виконувати завдання:

- автономне планування польотів (маршрути, розклади, кількість БПЛА ред.);
- підзарядка/заміна акумулятора;
- зміна корисного навантаження;
- збір (та обробка) та передача даних до диспетчерської/кризового центру.

Крім того при створенні систем моніторингу необхідно враховувати те, що одиночний БПЛА, володіє відносно малими можливостями для виконання поставленого завдання (невеликий час польоту, обмежений бортовим енергоресурсом; невелике число функцій, що виконуються; невисока ймовірність виконання завдання в екстремальних ситуаціях і т.п.). Тому підвищення ефективності застосування систем моніторингу, побудованих на основі БПЛА має забезпечуватися за рахунок групового застосування їх складових.

Основними перевагами групового застосування БПЛА як роботизованих об'єктів у складі систем моніторингу є:

- розширений набір завдань, що виконуються;
- більша ймовірність успішного виконання завдань, яка досягається за рахунок можливості перерозподілу часткових завдань між БПЛА групи в разі відмов деяких з них.

Також, під час функціонування систем моніторингу може виникати необхідність у зміні її структури, складу, переліку завдань тощо. За таких умов застосування стандартних підходів до побудови систем моніторингу може привести до розгортання фактично нової системи. Для унеможливлення таких ситуацій необхідно передбачати можливість адаптації структури систем моніторингу під нові вимоги, умови виконання завдань та масштабування у ході виконання завдань.

Побудова адаптивної системи моніторингу має базуватись на застосуванні технологій, що забезпечують:

- спільне (групове) виконання завдань;
- адаптацію до нових вимог та умов;
- можливість нарощення (масштабування).

Варіативність завдань та умов їх виконання обумовлюють використання гнучких рішень під час створення систем моніторингу, до яких відносяться мультиагентні системи [6]. В інформаційній моделі мультиагентних систем використовуються онтології, які дозволяють описувати склад, стан та взаємодію між складовими мультиагентної системи. У роботі використовується розроблений варіант онтології у якості бази знань для МА-БПЛА-ММР-СМ, що містить можливі завдання, опис умов їх виконання, складові МА-БПЛА-ММР-СМ та їх обладнання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання синтезу систем моніторингу, використання мультиагентних технологій розглядаються в багатьох роботах. В [7] автори пропонують загальний алгоритм формування системи моніторингу для виконання різних завдань з урахуванням вимог. Загальний огляд використання мультиагентних технологій в різних галузях представлений в [8]. Використання мультиагентів для виконання завдань в різних галузях розглядається в [9,10]. В роботі [11] представляє огляд сучасного стану напрацювань в галузі розробки систем за основі знань у вигляді онтологій.

Але в даних роботах розглядаються загальні підходи до побудови систем без детального опису процедур формування їх структури та чисельності. Формалізація процесу визначення структури та складу мультиагентної системи зводиться до визначення порядку та способів вибору складових системи моніторингу (БПЛА, станцій обслуговування), які відповідають завданню та умовам його виконання і забезпечують виконання завдання з показниками якості не менше заданих, з урахуванням вектору різноманітних факторів.

Метою роботи є вдосконалення процесу синтезу інтелектуальних систем моніторингу об'єктів атомної енергетики та основі використання методу визначення структури та складу мультиагентних систем моніторингу та баз знань у вигляді онтологій.

Виклад основного матеріалу

В основу підходу до побудови інтелектуальних систем моніторингу покладені принципи групового управління й наступні положення: кожен об'єкт системи моніторингу самостійно формує управління і визначає свої дії в поточній ситуації; вибір дій членами групи здійснюється тільки на основі інформації про загальну мету групи, ситуації в навколишньому середовищі на поточний момент часу, поточні стани і дії інших членів групи; в якості оптимальної дії члена групи розуміється дія, яка вносить максимальний внесок в досягнення спільної мети; допускається прийняття компромісних рішень.

Характеристиками інтелектуальних «агентів», під яким розуміються БПЛА та інші складові систем моніторингу, які приймають участь у виконанні завдань, є здатність до колективної цілеспрямованої поведінки в інтересах розв'язання одного завдання; самостійного вирішення локальних завдань; активних дій з метою досягнення загальних і локальних цілей; переміщення та пошуку інформації та об'єктів, які необхідні для колективного рішення загального завдання; автоматичної адаптації до невизначених умов в середовищі, що змінюється.

Ці можливості кардинально відрізняють мультиагентні системи від існуючих «жорстко» організованих систем управління БПЛА. При мультиагентному підході БПЛА виконують функції «агентів», які за допомогою спеціального програмного забезпечення та датчиків збирають дані, оцінюють ситуацію, приймають рішення на дії та взаємодіють з іншими «агентами».

Різнорманітність завдань, вимог до їх виконання, умов виконання, наявних ресурсів обумовлюють побудову МА-БПЛА-ММР-СМ у вигляді холонічних мультиагентних систем, що базуються на концепції холізму [12]. В рамках цієї концепції цілісність системи створюється в результаті динамічної взаємодії автономних компонент – холонів, кожен з яких в свою чергу може бути системою (підсистемою або окремим об'єктом) і складатися з інших холонів. При появі всередині системи нових завдань холони можуть здійснювати постійний аналіз своїх потреб і можливостей, конкурувати між собою або кооперуватися для досягнення поставлених цілей.

Структуру концептуальної моделі холонічної МА-БПЛА-ММР-СМ наведено на рис. 1.

Інтелектуальну МА-БПЛА-ММР-СМ пропонується реалізувати у вигляді багаторівневої трикомпонентної холонічної мультиагентної системи, яка складається з трьох рівнів-холонів, кожен з яких в свою чергу може складатися з декількох інших холонів [13]:

- холон керування, який обробляє потік завдань, формує заявку на її виконання та передає її до холону виконання. Також він контролює наявність вільних ресурсів, та у разі їх відсутності ставить завдання в чергу;

- холон виконання завдань, яких обробляє отриману від холону керування заявку і формує робочий холон, який необхідний для її виконання з урахуванням вимог та умов. В холоні виконання завдань може оброблятися декілька заявок, тому він може складатися з декількох робочих холонів. Активні холони, що виконують замовлення складаються з БПЛА-агентів. У разі відсутності ресурсів для виконання заявки холон виконання інформує про це холон управління;

- холон забезпечення, формує окремі холони підтримки для обслуговування холонів виконання у разі, якщо це необхідно. Рішення про необхідність створення холону підтримки формує холон виконання завдань. Складові холони підтримки можуть бути представлені системами заряджання (заміни) джерел живлення БПЛА-агентів холону виконання завдань. У разі відсутності ресурсів для обслуговування робочих холонів холон обслуговування інформує про це холон виконання.

Порядок формування робочих холонів та холонів підтримки буде розглянуто нижче. Обмін інформацією у системі моніторингу може здійснюватись як між холонами одного рівня, а також через загальну базу знань. Застосування запропонованого підходу до побудови системи моніторингу дозволяє одночасно виконувати декілька різних завдань, застосовуючи для цього різні автономні холони без необхідності виконання складних процедур структурного синтезу. Особливість формування структури та складу МА-БПЛА-ММР-СМ полягає в тому, що для задоволення вимог місії необхідно визначати базову (опорну кількість) БПЛА в складі холону, а також склад холону забезпечення, які можуть змінюватись. Наприклад, при розширенні периметру охорони необхідно додати до холону БПЛА потрібну кількість БПЛА і, у разі необхідності, змінити склад холону забезпечення, без створення нової місії. Пропонується наступний метод визначення структури та складу МА-БПЛА-ММР-СМ, узагальнений алгоритм якого представлено на рис. 2. Даний алгоритм описує послідовність дій формування опорних холонів.

Блок 1. Надходження нової місії та аналіз вимог і поточної обстановки.

Блок 2. Вибір БПЛА, які здатні виконувати завдання місії, та визначення їх кількості, що задовольнить вимоги.

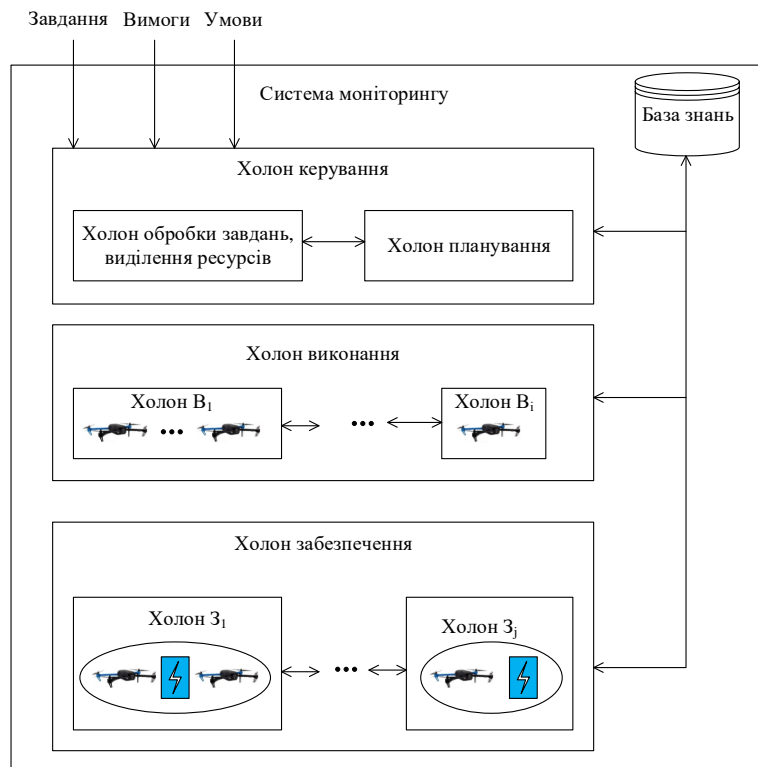


Рис. 1. Концептуальна модель холонічної МА-БПЛА-ММР-СМ

Блок 3. Порівняння часу, необхідного для виконання місії, та максимальної тривалості польоту БПЛА. Якщо умова виконується здійснюється формування складу холонів для виконання місії (блок 4).

У випадку перевищення часу, необхідного для виконання місії, над максимальною тривалістю польоту обираються станції, які здатні обслуговувати вибрані БПЛА, та визначається їх кількість (блок 5), які формують холон обслуговування, що додається складу холонів для виконання місії.

Блок 4. Формування складу холонів для виконання.

Ситуаційне створення структури складних систем для конкретних завдань може здійснюватись з урахуванням різноманітних параметрів у конкретній об'єктній області. Перспективною прямою формалізацією таких знань є розробка онтологій.

Онтологія — це формалізоване представлення знань про одну предметну область (навколишнє середовище, світ), додаток для автоматизованої обробки. Він вибирає мову для опису предмета задачі синтезу та включає машинну інтерпретацію основної формули для розуміння та розуміння між ними.

Структура опису ресурсу (RDF-resource definition framework) дозволяє писати машинно інтерпретовані оператори у формі трійок суб'єкт-предикат-об'єкт, які називаються трійками RDF. Для опису можна використовувати різні синтаксиси, серед яких - RDF/XML, Turtle, N-Triples, JSON-LD, RDFa та HTML5 Microdata.

Такі RDF-трійки піддаються машинній інтерпретації та, за суворими правилами, можуть використовуватись для отримання нових тверджень на основі тих, що сформульовані автоматизованими міркуваннями.

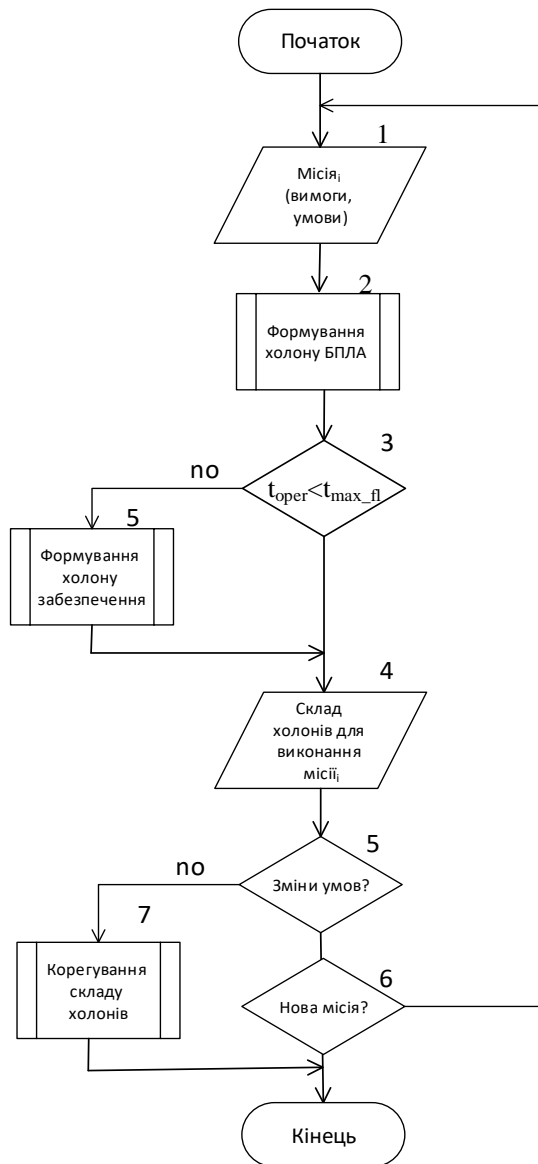


Рис. 2. Узагальнений алгоритм методу визначення структури та складу МА-БПЛА-ММР-СМ

Але складні домени вимагають ще більше репрезентативних можливостей, таких як обмеження кардинальності властивостей, обмеження домену та діапазону, а також перелічувані класи, що призвело до появи мови веб-онтології (OWL - ontology web language), спеціально розробленої для створення веб-онтологій із багатим набором моделювання. конструкторів і усуває обмеження RDF.

Кожна онтологія OWL складається з трійок RDF, які визначають поняття (класи), ролі (властивості та зв'язки) та екземпляри [14].

Існують онтології верхнього рівня, які визначають загальний фундаментальний опис області застосування, онтології предметної області та онтології рівня прикладного завдання. Чим нижче рівень, тим повніший опис містить онтологія.

Онтологічна модель МА-БПЛА-ММР-СМ для виконання завдань забезпечення фізичної безпеки описує структуру та взаємодію складових елементів системи при виконанні завдань у різних умовах. В онтології використовується наступна ієрархія класів:

- Mission type:
 - Security;
- Performing unit:
 - Simple UAV;
 - Custom UAV;
- Support unit:
 - Automatic battery maintenance station (ABMS);
- Payload:
 - Camera;
 - FLIR;
- Environment conditions:
 - Day;
 - Night.

Цей перелік класів і підкласів може бути розширений залежно від особливостей системи моніторингу.

Опис властивостей об'єкта, визначених в онтології, представлено в табл. 1.

Таблиця 1 – Опис властивостей об'єктів, визначених в онтології

Домен	Властивість	Діапазон
UAV	perform	Mission type
ABMS	maintenance	Simple UAV; Custom UAV
Simple UAV	has	Camera; FLIR
Camera; FLIR;	deployed	Custom UAV
Security	use	Camera; FLIR
Camera	used	Day
FLIR	used	Night

Для створення онтологій використовувалося програмне забезпечення Protégé. Онтограф розробленої онтології рівня прикладного завдання для МА-БПЛА-ММР-СМ представлений на рис. 3. Для уточнення онтології до її наступних класів було надано індивідууми, з конкретними характеристиками:

- Simple UAV:
 - Simple UAV 1;
 - Simple UAV 2;
 - Simple UAV 3;
- Custom UAV:
 - Custom UAV 1;
 - Custom UAV 2;
- ABMS:
 - ABMS 1;
 - ABMS 2;
 - ABMS 2;
- Payload
 - Camera
 - Camera1;
 - Camera2;
 - FLIR:
 - FLIR1;
 - FLIR2.

OWL-коди доданих індивідуумів для класу Simple UAV, представлені на рис. 4.

Розглянемо приклад використання онтології для вибору обладнання, БПЛА та підсистеми забезпечення, у разі необхідності, необхідних для виконання завдання охорони периметру тривалістю не менше 2 годин, вночі за вітру, що має швидкість 12 м/с.

Для визначення компонентів системи моніторингу до онтології використовується SPARQL запит, вигляд якого наведено на рис. 5.

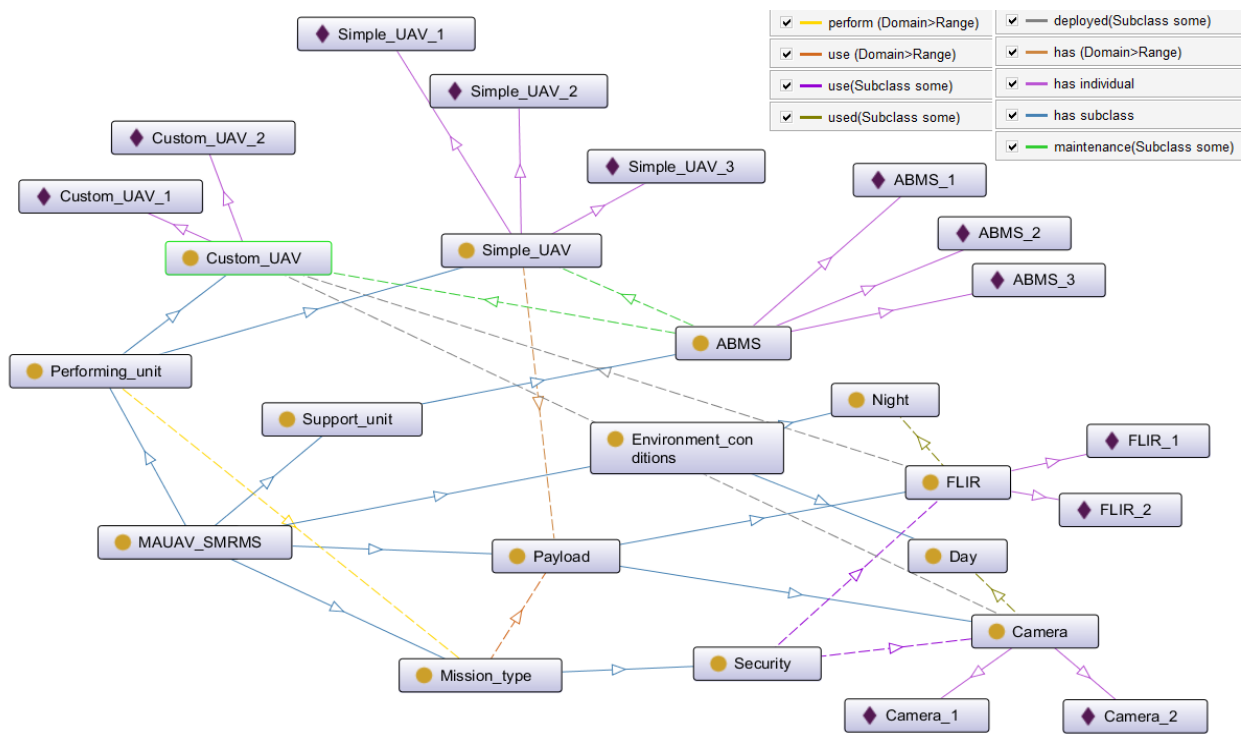


Рис. 3. Онтограф онтології рівня прикладного завдання для МА-БПЛА-MMP-СМ

```

<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV_1 -->
<owl:NamedIndividual rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV_1">
  <rdf:type rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV"/>
  <ims:flightEndurance rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#float">0.5</ims:flightEndurance>
  <ims:maxWind rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#int">10</ims:maxWind>
  <ims:payload1 rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">Camera1</ims:payload1>
</owl:NamedIndividual>
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV_2 -->
<owl:NamedIndividual rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV_2">
  <rdf:type rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV"/>
  <ims:flightEndurance rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#float">0.75</ims:flightEndurance>
  <ims:maxWind rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#int">12</ims:maxWind>
  <ims:payload1 rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">FLIR1</ims:payload1>
</owl:NamedIndividual>
<!-- http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV_3 -->
<owl:NamedIndividual rdf:about="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV_3">
  <rdf:type rdf:resource="http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#Simple_UAV"/>
  <ims:flightEndurance rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#float">1.0</ims:flightEndurance>
  <ims:maxWind rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#int">15</ims:maxWind>
  <ims:payload2 rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">Camera2</ims:payload2>
</owl:NamedIndividual>
    
```

Рис. 4. OWL-коди доданих екземплярів для класу Simple UAV

```

PREFIX rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>
PREFIX owl: <http://www.w3.org/2002/07/owl#>
PREFIX rdfs: <http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#>
PREFIX xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#>
PREFIX ims: <http://www.semanticweb.org/user/ontologies/2023/7/ims#>
SELECT ?payload ?UAV ?ABMS
WHERE{
  ?payload rdf:type :Payload.
  ?UAV :has ?payload
  FILTER EXISTS {?payload :used 'Night'}
  FILTER EXISTS ((?UAV :maxWind > =12))
  ?ABMS maintenance ?UAV
  FILTER EXISTS ((?UAV :flightEndurance < 2))
    
```

Рис. 5. SPARQL запит до онтології

За результатами запиту надається перелік корисного навантаження, яке використовуються при виконанні завдання в нічних умовах, БПЛА, які мають це корисне навантаження та можуть виконувати польоти при швидкості вітру більше 12 м/с.

В онтології є лише один екземпляр класу Simple UAV – «Simple UAV 2», що може здійснювати польоти при швидкості вітру 12м/с, і який обладнаний камерою FLIR1, що дозволяє виконувати завдання вночі. Максимальна тривалість польоту «Simple UAV 2» складає 0,75 годин, тоді як необхідно виконувати завдання 2 години, що обумовлює використання підсистеми забезпечення, а саме

«ABMS 2», яка призначена для обслуговування БПЛА «Simple UAV 2».

Наступні кроки полягають у визначенні необхідної кількості БПЛА та станцій обслуговування.

В рекомендаціях з організації фізичного захисту ММР закладено необхідність реалізації концепції безперервного захисту за рахунок створення суцільного поля спостереження за зоною обмеженого доступу, або периметру захищеної зони ММР.

Кількість БПЛА, яка необхідна для цього визначається з урахуванням розмірів зони перегляду

камери БПЛА, яка залежить від характеристик оптичного навантаження та вимог до розрізняльної здатності (рис. 6).

Якщо розглядати застосування БПЛА як додатковий елемент системи фізичного захисту, то такий підхід є дуже витратним, крім того використання БПЛА як основної системи може бути неможливим в умовах природних явищ, що унеможливають здійснення польотів, наприклад при швидкості вітру більше ніж 10-15 м/с, або в умовах, що приводять до обledenіння елементів конструкції БПЛА.

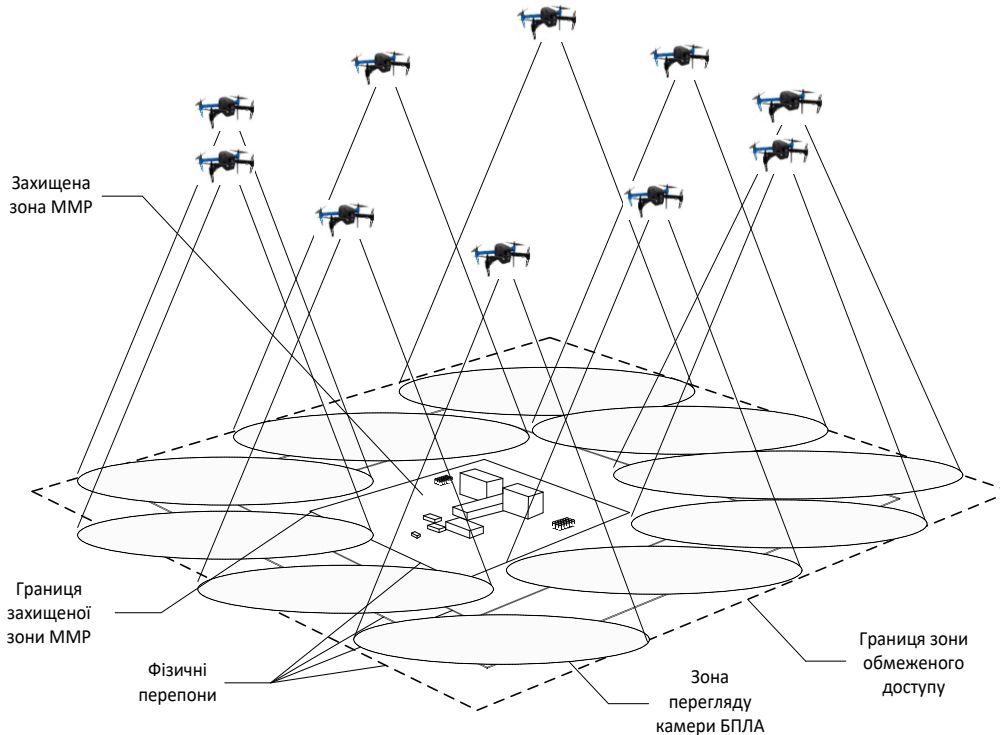


Рис. 6. Модель повного покриття зони обмеженого доступу засобами моніторингу БПЛА

В даній роботі пропонується модель функціонування МА-БПЛА-ММР-СМ у якості допоміжного засобу виконання завдань охорони периметру, яка передбачає періодичний моніторинг захисної зони.

В основу побудови системи фізичного захисту ММР покладено три складові [15]: виявлення; затримка; реагування. При цьому затримка використовується також для підвищення імовірності виявлення, тому при розробці комплексу заходів з фізичного захисту навколо захисної зони ММР розміщують декілька перепон різного типу, наприклад: сітка «рабиця», як перший (зовнішній) рівень; огорожа з колючого дроту, як другий рівень; малозамітна перепона, як третій рівень; бетонний паркан, як останній (внутрішній) рівень. Комплекс перепон характеризується стійкістю до проникнення T_d , яка визначається сумарним часом, необхідним для їх долання:

$$T_d = \sum_{i=1}^{n_o} t_{o_c_i}, \quad (1)$$

де $t_{o_c_i}$ - середній час долання i -ї перепони; n_o - кількість перепон.

Для забезпечення умов виявлення порушника необхідно здійснювати моніторинг периметру з

інтервалом T_m меншим ніж стійкість комплексу перепон, тобто має виконуватись умова:

$$T_d / T_m > 1. \quad (2)$$

Інтервал моніторингу залежить від розмірів периметру захищеної зони ММР, кількості та льотно-технічних характеристик БПЛА, які рухаються по маршруту (вважається, що БПЛА розташовані по всьому маршруту рівномірно), і визначається як:

$$T_m = P_z / (m_{UAV} V_{UAV}), \quad (3)$$

де P_z - периметр захищеної зони ММР; V_{UAV} - швидкість БПЛА; m_{UAV} - кількість БПЛА на маршруті.

Таким чином, для забезпечення умов виявлення порушника (2) необхідно щоб кількість БПЛА, що знаходяться на маршруті, відповідала умові:

$$m_{UAV} > P_z / (T_d V_{UAV}). \quad (4)$$

Зазвичай тривалість виконання завдань моніторингу є значно більшою, ніж максимальна тривалість польоту БПЛА, тому виникає необхідність у періодичній заміні, або заряджанні бортових джерел живлення БПЛА. Для забезпечення безперервності процесу моніторингу у такому випадку необхідно

використання додаткових БПЛА, які будуть продовжувати виконувати завдання замість БПЛА, які обслуговуються. Функціонування БПЛА при виконанні завдань з фізичного захисту за такою схемою представлено на рис. 7.

Зазвичай в складі системи моніторингу використовуються група БПЛА, з однаковими характеристиками, тому потребувати обслуговування вони будуть всі одночасно, і необхідно залучати додаткову групу такої ж чисельності.

Час виконання завдання з моніторингу одним БПЛА визначається за формулою:

$$t_m = t_{fl} - 2S_{UAV} / V_{UAV} - t_{conf}, \quad (5)$$

де t_{fl} - середній час польоту БПЛА; S_{UAV} - відстань яку долає БПЛА від точки на маршруті до станції обслуговування (вважається, що всі точки маршруту рівновіддалені від станції); t_{conf} - час, необхідний для підключення БПЛА після обслуговування до системи моніторингу. Чисельність груп БПЛА, що необхідна для виконання завдань з фізичної безпеки, складі МА-БПЛА-ММР-СМ визначається за формулою:

$$k_{UAV} = \left\lceil 1 + \left(2S_{UAV} / V_{UAV} + t_{conf} + t_{repl_bat} \right) / t_m \right\rceil, \quad (6)$$

де t_{repl_bat} - час необхідний для заміни бортового джерела живлення БПЛА.

Загальна кількість БПЛА, що має залучатися до холоду виконання завдань фізичного захисту в складі МА-БПЛА-ММР-СМ визначається за формулою

$$m_{\Sigma} = k_{UAV} \cdot m_{UAV}. \quad (7)$$

Значення $k > 1$ вказує на необхідність створення в складі МА-БПЛА-ММР-СМ холоду забезпечення. Тип станції визначається при виконанні SPARQL запит до онтології, а кількість станції залежить від кількості каналів обслуговування БПЛА та є таким:

$$m_{ABMS} = \lceil m_{UAV} / n_{ch} \rceil \quad (8)$$

де n_{ch} - кількість каналів обслуговування БПЛА на одній станції обраного типу.

Наведений приклад показує послідовну реалізацію методу формування структури та складу МА-БПЛА-ММР-СМ для виконання визначеного завдання та умов. Для врахування вимог до надійності при відмовах БПЛА необхідно резервувати додаткову кількість БПЛА з загальної чисельності флоту, які у разі відмов основних БПЛА зі складу холоду будуть залучатися до його поповнення. Для визначення їх чисельності використовуються додаткові моделі [16].

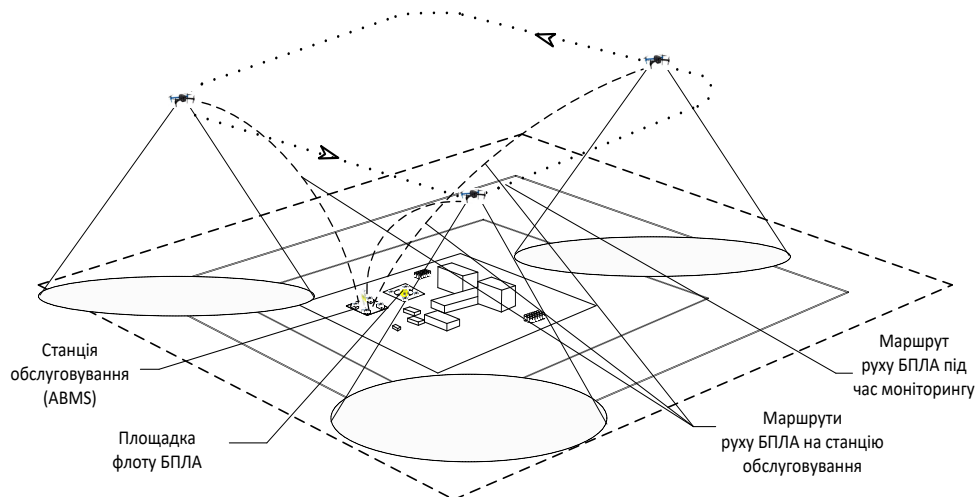


Рис. 7. Модель періодичного моніторингу зони обмеженого доступу засобами БПЛА

Висновки

В роботі розглянуто процес формування систем моніторингу на основі БПЛА, для реалізації якого запропоновано метод визначення структури та складу МА-БПЛА-ММР-СМ, який дозволяє підвищити ефективність процесу синтезу інтелектуальних систем моніторингу об'єктів атомної енергетики для виконання різноманітних завдань з урахуванням вимог та умов навколишнього середовища. Розроблена і описана концептуальна модель холодної МА-БПЛА-ММР-СМ та варіант онтологічної бази знань.

Розроблено та описано метод визначення структури та складу МА-БПЛА-ММР-СМ, який базується на концептуальній моделі холодної МА-БПЛА-ММР-СМ та використовує онтологічну базу знань виведення необхідних знань під час синтезу МА-БПЛА-ММР-СМ. При цьому враховується необхід-

ність формування підсистеми виконання завдань у вигляді холонів БПЛА та холонів забезпечення тривалого функціонування МА-БПЛА-ММР-СМ.

Розглянуто можливі варіанти здійснення моніторингу фізичної безпеки інфраструктури ММР та запропонована модель функціонування МА-БПЛА-ММР-СМ з періодичним покриттям зони обмеженого доступу, яка дозволяє визначати необхідну чисельність БПЛА та станцій обслуговування.

Надано приклад використання запропонованого методу для формування структури та складу МА-БПЛА-ММР-СМ при виконанні завдань моніторингу у складі системи фізичного захисту ММР.

Напрямок подальших досліджень полягає у розробці методу вибору та імплементації моделей, необхідних для визначення потрібної чисельності БПЛА в МА-БПЛА-ММР-СМ для забезпечення заданих показників надійності виконання завдань.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. P. G. Martin, O. D. Payton, J. S. Fardoulis, D. A. Richards, Y. Yamashiki, T. B. Scott. Low altitude unmanned aerial vehicle for characterising remediation effectiveness following the FDNPP accident. *J. Env. Radioactivity*, 2016, vol. 151, pp. 58–63.
2. H. Fesenko, I. Kliushnikov, V. Kharchenko, S. Rudakov, E. Odarushchenko. "Routing an Unmanned Aerial Vehicle during NPP Monitoring in the Presence of an Automatic Battery Replacement Aerial System". In Proc. of the IEEE 11th Int. Conf. on DESSERT 2020. Kyiv, Ukraine, May 14-18, 2020, pp. 34–39. <https://doi.org/10.1109/DESSERT50317.2020.9125080>.
3. Fukushima looks to drones. *Nuclear Engineering International*. URL: <https://www.neimagazine.com/features/>
4. Now Available: New Drone Techn. for Radiological Monitoring in Emergency Situations. IAEA. URL: <https://www.iaea.org>
5. M. Gaspar. Technology Neutral: Safety and Licensing of SMRs. IAEA. URL: <https://www.iaea.org/ru/newscenter/news/>
6. V.M. Chernenkiy, Y.E. Gapanyuk, V.I. Terekhov, G.I. Revunkov, Y.S. Fedorenko, J. C. Gonzalez Gusev The Concept of Teaching Course on Intelligent Information Systems. In Handbook of Research on Engineering Education in a Global Context // ed. by E.V. Smirnova, R.P. Clark. IGI Global, 2019, pp. 346-357543 DOI: 10.4018/978-1-5225-3395-5.ch029.
7. I. Kliushnikov, H. Fesenko, V. Kharchenko, O. Iliashenko, O. Morozova. "UAV fleet based accident monitoring systems with automatic battery replacement systems: Algorithms for justifying composition and use planning". *International Journal of Safety and Security Engineering*, 2021, vol. 11, no. 4, pp. 319-328. <https://doi.org/10.18280/ijss.110404>.
8. V. Julian and V. Botti. Multi-Agent Systems. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, no. 7, p. 1402, <https://doi.org/10.3390/app9071402>. URL: <http://dx.doi.org/10.3390/app9071402>
9. K. Mehmet Tugrul, Drone Technologies and Applications. In *Drones - Various Applications* // ed. by D. Cvetkovi, IntechOpen, 2023, pp.1-24. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1001987>.
10. M. Herrera, A. K. Parlikad, J. Izquierdo, M. Perez Hernandez. Multi-Agent Systems and Complex Networks: Review and Applications in Systems Engineering. *Processes*, 2020, no. 8(3), <https://doi.org/10.3390/pr8030312>
11. M. M. Sulaeman, M. Harsono. Supply Chain Ontology: Model Overview and Synthesis. *Jurnal Mantik*, vol. 5(2), 2012, pp. 790-799. <https://doi.org/10.35335/mantik.Vol5.2021.1401.pp790-799>.
12. S. Rodriguez, V. Hilaire, N. Gaud, S. Galland, A. Koukam. *Holonic Multi-Agent Systems, Self-organising Software*. Natural Computing Series, Berlin: Springer, 2011, pp. 238–263.
13. D. Li, S.S. Ge, W. He, G. Ma, L. Xie. Multilayer formation control of multi-agent systems', *Automatica*, 2019 vol. 109, pp.1-15. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2019.108558>
14. Web Ontology Language. W3C Semantic Web. URL: <https://www.w3.org/OWL/>
15. A. Evans, C. Byrum, D. Stanford, E. Sandt, T. Goolsby. Physical Protection Recommendations for Small Modular Reactor Facilities. SANDIA REPORT, SAND2021-15712, 2021, 56 p.
16. I. Kliushnikov, V. Kharchenko, H. Fesenko, E. Zaitseva. Multi-UAV Routing for Critical Infrastructure Monitoring Considering Failures of UAVs: Reliability Models, Rerouting Algorithms, Industrial Case. In Proc. of Int. Conf. on Inf. and Digital Technologies, IDT'2021, Zilina, Slovakia, 2021, pp. 303–310. <https://doi.org/10.1109/IDT52577.2021.9497624>

Received (Надійшла) 16.10.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.11.2023

Method for determining the structures and composition of multi-agent UAV-based monitoring systems for small modular reactors

Ihor Kliushnikov

Abstract. The accident at the nuclear power plant (NPP) in Fukushima showed that the use of monitoring systems based on unmanned aerial vehicles (UAVs) made it possible to assess the consequences of the accident and conduct post-accident monitoring of the NPP infrastructure and the surrounding area. However, the deployment of such a monitoring system was carried out after the accident, when there were no other opportunities to obtain information. In addition, the process of creating and deploying such systems, which are unique, are designed to monitor a specific site. The spread of the use of UAVs in various fields shows that they can be used as flexible services to perform various tasks in an autonomous mode, which requires the introduction of means for their intellectualization. One of the areas of development of nuclear energy is small modular reactors (SMRs) and the use of UAVs as part of SMR infrastructure monitoring systems will allow solving a wide range of problems. The subject of the article is the process of forming monitoring systems based on UAVs. The purpose of the article is to propose an approach to improving the process of synthesis of intelligent monitoring systems for nuclear power facilities. Objective of the article: to propose a method for determining the structure and composition of multi-agent UAV-based monitoring systems (MA-UAV-MS) to perform various tasks taking into account the requirements and environmental conditions, for which to develop a conceptual model of the holonic MA-UAV-MS and a knowledge base in the form ontologies to derive the necessary knowledge during the synthesis of MA-UAV-MS; give an example of using the proposed method for forming the MA-UAV-SM structure when performing SMR monitoring tasks (MA-UAV-SMR-MS), namely, monitoring as part of the SMR physical protection system. The following results of the work are obtained. A conceptual model of the holonic MA-UAV-SMR-MS has been developed and described. A method for determining the structure and composition of the MA-UAV-SMR-v has been developed and described. This takes into account the need to form a subsystem for performing tasks in the form of UAV holons and holons to ensure the long-term functioning of the MA-UAV-SMR-MS. A version of the ontological knowledge base is developed and an example of its use is shown to obtain a list of UAVs and equipment necessary to perform tasks in certain conditions with specified requirements. Possible options for monitoring the physical security of the SMR infrastructure are considered and a model for the operation of MA-UAV-SMR-MS with periodic coverage of the restricted access zone is proposed, which allows us to determine the required number of UAVs and service stations. The further research is to develop a method for selecting and implementing the models necessary to determine the required number of UAVs in the MA-UAV-SMR-MS to ensure the specified reliability indicators for performing tasks.

Keywords: monitoring system; holonic multi-agent system; ontology; unmanned aerial vehicle; service station; small modular reactor; physical protection.