

Міністерство оборони України
Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба
Міністерство освіти та науки України
Черкаський державний технологічний університет

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БЕРЕЖНИЙ АНДРІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 004.896+623.746.2

ДИСЕРТАЦІЯ

МЕТОДИ ТА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО
ПЛАНУВАННЯ МАРШРУТІВ ПОЛЬОТІВ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ
АПАРАТІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПОШУКУ ОБ'ЄКТІВ

05.13.06 – інформаційні технології

Подається на здобуття ступеня наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

А.О. Бережний

Науковий керівник:
доктор технічних наук
старший науковий співробітник
Тристан А.В.

Харків – 2020

АНОТАЦІЯ

Бережний А. О. Методи та інформаційна технологія автоматизованого планування маршрутів польотів безпілотних літальних апаратів для підвищення ефективності пошуку об'єктів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології. – Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, 2020, Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, 2020.

Швидкий розвиток безпілотних літальних апаратів в останні роки змінив організацію моніторингу стаціонарних та динамічних об'єктів. Це пов'язано з наступним: безпілотники (БПЛА) значно дешевші, ніж пілотовані розвідувальні літаки; БПЛА простіше в обслуговуванні та керуванні ними; БПЛА можуть працювати в нічний час, в умовах поганої видимості, в ситуаціях, що загрожують життю пілота. Завдання пошуку динамічних об'єктів на місцях не нові. Однак для лісостепової зони є особливості, пов'язані з тим, що цей тип місцевості містить значні площі лісу. Пошук об'єктів спостереження в таких районах ускладнений. Процес вибору оптимальних маршрутів польоту становить особливі труднощі. У цьому випадку мова йде не лише про виконання суто цивільних місій, а й про вирішення військових завдань.

Останнім часом трансформуються форми та методи збройної боротьби (Сирія, Ірак, Лівія, Східна Україна). На перший план виходить бойове використання високомобільних малих груп, які можуть виконувати терористичні завдання. Сучасний тероризм - це складне суспільно-політичне явище як форма політичної боротьби, як форма поведінки індивідів та організованих груп. Вони, порушуючи громадський порядок, дестабілізують процес суспільного життя, сприяють створенню та розвитку конфліктних ситуацій. Для протидії терористичним атакам таких груп потрібна достовірна та

своєчасна інформація. Це можна швидко організувати, провівши активну розвідку (моніторинг). Планування маршруту повітряної розвідки з використанням БПЛА в лісостеповій зоні вимагає виявлення та врахування спеціальних зразків у динамічних діях об'єктів. Сам план розвідки повинен передбачати просування противника в дії.

Прогноз можливих динамічних дій об'єктів дасть результат, якщо відома інформація про їх початкове розташування (час, координати, стан). У цьому випадку результати повітряної розвідки з використанням БПЛА дадуть інформацію про напрямок руху, можливу ціль, про часові динамічні об'єкти, які залишають ціль. Ця інформація дозволить своєчасно підготувати заходи щодо протидії можливим терористичним атакам.

Проблема моніторингу стаціонарних та динамічних об'єктів полягає в тому, що існує конфлікт між розміром області пошуку та розміром об'єктів.

Вирішення цієї суперечності можливе через автономну експлуатацію БПЛА, зміну маршруту його польоту (завдання польоту) за результатами автоматичного розпізнавання об'єкта. Сучасні БПЛА включають автопілот та потужний бортовий комплекс, який може виконувати ці завдання за умови, що він оснащений відповідними інформаційними технологіями. Таким чином, виникає відповідне завдання з розробки інформаційних технологій автоматизованого виявлення та ідентифікації нерухомих об'єктів безпілотними літальними апаратами.

У вступі наведені відомості щодо актуальності теми дослідження, зв'язку роботи з науковими програмами, планами й темами, мети, задач, об'єкту, предмету та методів досліджень. Також викладені наукові результати, відомості щодо їх новизни й практичної значущості та впровадження, особистого внеску здобувача, публікацій і апробацій.

У першому розділі "Аналіз завдань планування моніторингу стаціонарних та рухомих об'єктів безпілотними літальними апаратами" проводиться аналіз сучасного стану та можливостей безпілотної авіації, здійснюється класифікація завдань моніторингу стану об'єктів та виокремлюються завдання планування

пошуку об'єктів. Приводиться перелік існуючих моделей та методів планування, способів побудови маршрутів, обґрунтовується необхідність застосування сучасних інформаційних технологій для рішення завдань автоматизованого планування, моделей формалізації завдань планування руху безпілотних літальних апаратів.

У другому розділі "Обґрунтування схеми проведення дисертаційного дослідження та методики вирішення наукового завдання" вводяться показники та критерії оцінювання ефективності розроблених та удосконалених методів планування маршрутів польоту безпілотних літальних апаратів, проводиться обґрунтування обраних методів проведення дослідження для вирішення наукового завдання. Наводиться характеристика обчислювальних моделей, розроблених для отримання результатів моделювання. Формується та наводиться схема дослідження, вводяться допущення та обмеження щодо роботи. Основним результатом, отриманим в даному розділі, є сукупність показників та критеріїв оцінювання ефективності планування маршрутів польотів безпілотних літальних апаратів для пошуку динамічних та стаціонарних об'єктів та схема проведення дослідження, що використовується в подальших розділах для досягнення мети роботи.

У третьому розділі "Розробка методів автоматизованого планування маршрутів польоту безпілотних літальних апаратів" розробляються (удосконалюються) наукові методи, які містять зміст нових наукових результатів. В умовах невизначеності інформація про можливі дії динамічних об'єктів та ймовірнісні оцінки отримання позитивних результатів виявлення цих об'єктів із застосуванням БПЛА близькі до нуля. Існуючі методи обґрунтування маршрутів і виявлення динамічних об'єктів за допомогою БПЛА у лісостеповій місцевості не відповідають методам прогнозу їх дій. Тому в умовах апріорної невизначеності дій динамічного об'єкту пошук не забезпечує їх своєчасне виявлення і розпізнавання. Для усунення даної невідповідності в роботі удосконалений метод автоматизованого планування маршруту польоту БПЛА для пошуку динамічного об'єкту. Метод враховує невизначеність в діях

протилежної сторони, формує варіанти прогнозу руху, оцінює вразливість динамічного об'єкту на кожному з можливих маршрутів цього руху. Це дозволяє знизити невизначеність інформації про дані маршрути і сформувати раціональний маршрут моніторингу об'єктів спостереження.

В четвертому розділі “Інформаційна технологія автоматизованого планування дій безпілотних літальних апаратів” розробляється інформаційна технологія автоматизованого планування дій безпілотних літальних апаратів під час виконання ними місії, що ґрунтується на об'єктно-орієнтованому методі проектування. Вона використовує знанняорієнтовані методи розпізнавання образів (знімків) та їх інтелектуальний аналіз, що дозволяє підвищити оперативність та обґрунтованість рішень.

В п'ятому розділі “Розробка рекомендацій щодо побудови системи підтримки прийняття рішення та оцінка ефективності розроблених методів” на підґрунті розроблених методів планування маршрутів польотів БПЛА розроблені рекомендації щодо впровадження їх до системи підтримки прийняття рішення. Обґрунтовується структура даної системи, комплекс задач, які повинні входити до даної системи. Оцінюється ефективність розроблених методів, виконані розрахунки чисельного експерименту, доведена перевага методів над існуючими.

Таким чином, оцінена ефективність методу автоматизованого планування маршрутів польотів БПЛА для пошуку динамічних об'єктів, що дозволило підвищити ефективність виявлення таких типів об'єктів на 65-70% порівняно з існуючими способами “сліпого” пошуку (за результатами чисельного експерименту). Оцінена ефективність методу автоматизованого планування маршрутів БПЛА для пошуку стаціонарних об'єктів за показником ваги виявлених (підтверджених) об'єктів, що дозволило підвищити ефективність пошуку на 25-32% (за результатами моделювання).

Основні результати дослідження.

1. Удосконалений метод автоматизованого планування маршруту польоту безпілотного літального апарату (БПЛА) для пошуку динамічного

об'єкту, який на відміну від існуючих враховує невизначеність в діях протилежної сторони, формує варіанти прогнозу руху, оцінює динамічні характеристики об'єкту на кожному з варіантів можливих маршруті його руху, що дозволяє знизити невизначеність інформації про дані маршрути і сформувати раціональний маршрут моніторингу об'єктів спостереження;

2. Удосконалений метод автоматизованого планування маршруту польоту БПЛА для пошуку стаціонарних об'єктів, що на відміну від існуючих враховує зв'язаність структури стаціонарних об'єктів на різних топологічних рівнях та дозволяє оцінити важливість даного типу об'єктів в загальній структурі;

3. Отримала подальший розвиток інформаційна технологія автоматизованого планування дій БПЛА, яка, на відміну від існуючих враховує результати розпізнавання об'єктів, що дозволяє в реальному часі змінювати маршрут польоту при виконанні місії БПЛА.

Отримані результати можуть бути безпосередньо використані для планування маршрутів польоту БПЛА з метою пошуку динамічних та стаціонарних об'єктів в перспективних системах підтримки прийняття рішення та автоматизованих систем управління авіацією.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, планування маршруту, задача комівояжера, система підтримки прийняття рішення, автоматизована система управління, стаціонарні об'єкти, динамічні об'єкти.

ABSTRACT

Berezhnyi A.O. Methods and information technology for automated route planning of unmanned aerial vehicles to increase the efficiency of object searches - qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

The Thesis for PhD of Engineering Sciences degree in the specialty 05.13.06 Information technologies. – Kharkiv National Air Forces University named after Ivan Kozhedub, Kharkiv, 2020, Cherkasy state technological university, Cherkasy, 2020.

The rapid development of unmanned aircraft in recent years has changed the organization of monitoring stationary and dynamic objects. This is due to the following: unmanned aerial vehicles (UAV) are much cheaper than manned reconnaissance aircraft; UAVs are easier to maintain and manage; UAVs can operate at night, in conditions of poor visibility, in situations that threaten the life of the pilot. The tasks of finding dynamic objects on the ground are not new. However, there are features for the forest-steppe zone. It contains significant areas of forest. The search for objects of observation in such areas is complicated. The process of selecting the optimal flight routes is particular difficulty. In this case, it is not only about completing purely civilian missions, but also about solving military tasks.

Recently, the forms and methods of armed struggle are being transformed (Syria, Iraq, Libya, East Ukraine). The combat use of highly mobile, small groups, that can carry out terrorist tasks, comes to the fore. Modern terrorism is a complex socio-political phenomenon as a form of political struggle, as a form of behavior of individuals and organized groups. They, disrupting public order, destabilize the process of public life, contribute to the creation and development of conflict situations. Reliable and timely information is needed to counter the terrorist attacks of such groups. It can be quickly obtained by conducting active reconnaissance (monitoring). Planning aerial reconnaissance route using UAV in the forest-steppe

area requires the identification and consideration of special patterns in dynamic objects actions. The intelligence plan itself should provide for advancing the enemy in action.

A forecast of possible dynamic objects actions will give a result if information on their initial location (time, coordinates, state) is known. In this case, the results of aerial reconnaissance using UAV will provide information on the direction of movement, a possible target, the time dynamic objects leaves the target. This information will allow for the timely preparation of measures to counter possible terrorist attacks.

The problem with monitoring stationary and dynamic objects is that there is a conflict between the size of the search area and the size of the objects.

The solution of this contradiction is possible through the autonomous operation of the UAV, changing the route of its flight (flight task) by the results of automatic object recognition. Modern UAVs include an autopilot and a powerful on-board complex that can perform these tasks provided it is equipped with the appropriate information technologies. Thus, the relevant task of developing information technology for the automated detection and identification of stationary objects by unmanned aerial vehicles arises.

The introduction provides information on the relevance of the research topic, the relationship of work with scientific programs, plans and topics, goals, objectives, object, subject and research methods. Scientific results, information on their novelty and practical significance and implementation, personal contribution of the applicant, publications and tests are also presented.

The first section "Analysis of planning tasks for monitoring stationary and mobile objects by unmanned aerial vehicles" analyzes the current state and capabilities of unmanned aerial vehicles, classifies the tasks of monitoring the condition of objects and identifies tasks for planning the search for objects. The list of existing models and methods of planning, ways of construction of routes is given, the necessity of application of modern information technologies for the decision of problems of the automated planning, models of formalization of tasks

of planning of movement of unmanned aerial vehicles is proved.

The second section "Substantiation of the scheme of dissertation research and methods of solving scientific problems" introduces indicators and criteria for evaluating the effectiveness of developed and improved methods of planning routes of unmanned aerial vehicles, substantiation of selected research methods for solving scientific problems. The characteristic of the computational models developed for reception of results of modeling is resulted. A research scheme is formed and presented, assumptions and restrictions on work are introduced. The main result obtained in this section is a set of indicators and criteria for evaluating the effectiveness of route planning of unmanned aerial vehicles to search for dynamic and stationary objects and the scheme of research used in subsequent sections to achieve the goal.

In the third section "Development of methods for automated planning of flight routes of unmanned aerial vehicles" scientific methods are developed (improved), which contain the content of new scientific results. Under uncertainty, information about the possible actions of dynamic objects and probabilistic estimates of positive results of detection of these objects using UAVs are close to zero. Existing methods of substantiation of routes and detection of dynamic objects with the help of UAVs in the forest-steppe area do not correspond to the methods of forecasting their actions. Therefore, in the conditions of a priori uncertainty of actions of a dynamic object, the search does not provide their timely detection and recognition. To eliminate this discrepancy, the method of automated UAV flight route planning to search for a dynamic object has been improved. The method takes into account the uncertainty in the actions of the opposite party, forms options for traffic forecasting, assesses the vulnerability of a dynamic object on each of the possible routes of this movement. This reduces the uncertainty of information about these routes and creates a rational route for monitoring the observed objects.

The fourth section, "Information technology for automated action planning of unmanned aerial vehicles", develops information technology for automated

action planning of unmanned aerial vehicles during their mission, based on the object-oriented design method. It uses knowledge-oriented methods of pattern recognition (images) and their intellectual analysis, which increases the efficiency and validity of decisions.

In the fifth section “Development of recommendations for building a decision support system and evaluation of the effectiveness of the developed methods” based on the developed methods of UAV flight route planning, recommendations for their implementation in the decision support system are developed. The structure of this system, a set of tasks that must be included in this system is substantiated. The efficiency of the developed methods is estimated, the calculations of the numerical experiment are performed, the advantage of the methods over the existing ones is proved.

Thus, the efficiency of the method of automated UAV flight route planning for the search of dynamic objects was estimated, which allowed to increase the efficiency of detection of such types of objects by 65-70% compared to existing methods of "blind" search (numerical experiment). The effectiveness of the method of automated UAV route planning for the search of stationary objects by the weight of the detected (confirmed) objects, which allowed to increase the search efficiency by 25-32% (according to the simulation results).

The main results obtained in the dissertation are:

1. An improved method for automated UAV flight route planning for searching for a dynamic object, which, unlike the existing ones, takes into account the uncertainty in the actions of the opposite side, generates motion prediction options, estimates the vulnerability of a dynamic object on each possible route of their movement, which reduces the uncertainty of information about these routes and form a rational monitoring route for monitoring objects.

2. An improved method for automated UAV flight route planning for searching for stationary objects, which, unlike the existing ones, takes into account the connected structure of stationary objects at different topological levels and allows you to assess the importance of this type of object in the general structure.

3. The information technology of automated UAV action planning, which, unlike the existing ones, takes into account the results of object recognition, has been further developed, which allows real-time change of the flight route when performing an UAV mission.

The results can be used directly to plan UAV flight routes to search for dynamic and stationary objects in advanced decision support systems and automated aviation control systems.

Keywords: decision support system, dynamic and stationary objects, information technology, routing, unmanned aerial vehicle.

Список публікацій за темою дисертації:

I. Основні публікації.

1. Бережний А.О., Крижанівський І.М., Барабаш О.В. Метод автоматизованого планування маршрутів безпілотних літальних апаратів з урахуванням виявлення стаціонарних об'єктів. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. Київ, 2019. Вип. 4(65). С. 90–98. DOI:10.31673/2412-4338.2019.049098.

2. Bereznyi A., Trystan A., Lavrov O. Information technology of automatic detection and identification of stationary objects with unmanned aerial vehicles. *Сучасні інформаційні системи*. Харків, 2020. Вип. 4(1). С. 5–10. DOI:10.20998/2522-9052.2020.

3. Бережний А.О., Калачова В.В., Рожков М.І. Моделювання руху динамічних об'єктів в системі підтримки прийняття рішень планування маршрутів безпілотних літальних апаратів. *Системи обробки інформації*. Харків, 2019. Вип. 4(159). С. 44–49. DOI:10.30748/soi.2019.159.05.

4. Бережний А. О., Крижанівський І. М.. Комплекс задач системи підтримки прийняття рішення на планування маршрутів польотів безпілотних літальних апаратів. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*. Полтава, 2020. Вип. 1(59). С. 3–6. DOI:10.26906/SUNZ.2020.1.003.

5. Бережний А. О., Сорока М.Ю., Сало Н.А. Методи рішення завдань планування поведінки агентів в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. Харків, 2019. Вип. 4(62). С. 18–24. DOI:10.30748/zhups.2019.62.02.

6. Тристан А. В., Бережний А. О. Метод автоматизованого планування маршруту польоту безпілотного літального апарату для пошуку динамічного об'єкту. *Вісник інженерної академії України*. Київ, 2019. Вип. 4 (34). С. 67–72.

II. Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації.

1. Генев Б.А., Бережний А.О. Проблемні питання та можливі напрямки підвищення ефективності організації міжвидової взаємодії під час виконання завдань за призначенням. *Новітні технології – для захисту повітряного простору* : зб. тез доп. XIII міжнар. наук. конф., м. Харків, 12-13 квіт. 2017 р. Харків, 2017. С. 27.

2. Тристан А.В., Бережний А.О., Аркушенко П.Л. Сценарний аналіз в пошуку доцільних варіантів організації та здійснення взаємодії. *Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах* : зб. тез доп. XVIII наук.-тех. конф., м. Чернігів, 6-7 вер. 2018 р. Чернігів, 2018. С. 283.

3. Тристан А.В., Бережний А.О. Метод сценарного прогнозування та моделювання при обґрунтуванні доцільних варіантів проведення операції. *Актуальні питання забезпечення службово-бойової діяльності військових формувань та правоохоронних органів* : зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Харків, 31 жовт. 2018 р. Харків, 2018. С. 164.

4. Тристан А.В., Бережний А.О., Крижанівський І.М. Математичні моделі та методи планування повітряної розвідки рухомих й стаціонарних об'єктів з застосуванням безпілотних літальних апаратів. *Проблеми інформатизації* : тези доп. 7-ї міжнар. наук.-техн. конф., м. Черкаси, м. Харків, м. Баку, м. Бельсько-Бяла [у 3 т.], 13-15 лист. 2019. Черкаси – Харків – Баку – Бельсько-Бяла, 2019. Т. 3. С.41.

III. Публікації, які додатково відображають наукові результати дисертації.

1. Інформаційно-аналітична система тестування та оцінювання студентів факультету ІТС в системі дистанційного навчання : звіт про НДР (проміжний) / Харків. нац. ун-т Повітряних Сил; кер. І.В. Ільїна ; викон.: Ю.О. Семеренко [та ін.]. Шифр теми “Матриця”. № 1116. Харків, 2019. 211 с.

2. Тристан А.В., Бережний А.О., Гурін О.М. Теоретико-графовий метод аналізу стійкості структури складних організаційно-технічних систем. *Честь і закон*. 2018. Вип. 3 (66). С.40–44.

ЗМІСТ

	С.
Перелік умовних позначень	17
Вступ.....	18
1 Аналіз завдань планування моніторингу стаціонарних та рухомих об'єктів безпілотними літальними апаратами	25
1.1 Аналіз сучасного стану та можливостей безпілотних літальних апаратів щодо моніторингу рухомих та стаціонарних об'єктів ...	25
1.2 Аналіз завдань моніторингу можливих об'єктів пошуку безпілотними літальними апаратами	30
1.3 Аналіз існуючих методів пошуку та планування маршрутів, застосування систем підтримки прийняття рішення для їх формування	36
1.4 Аналіз існуючих досліджень та постановка наукового завдання ...	42
Висновки до першого розділу	49
2 Обґрунтування схеми проведення дисертаційного дослідження та методики вирішення наукового завдання	50
2.1 Розробка показників та критеріїв оцінювання ефективності планування маршрутів польоту безпілотного літального апарату для пошуку об'єктів спостереження	50
2.1.1 Показники та критерій оцінювання ефективності планування маршрутів польоту безпілотного літального апарату для пошуку динамічного об'єкту	50
2.1.2 Показники та критерій оцінювання ефективності планування маршрутів польоту безпілотного літального апарату для пошуку статичних об'єктів	56
2.2 Визначення та обґрунтування напрямку дослідження, методичних підходів до автоматизованого формування маршрутів польоту безпілотних літальних апаратів	59

2.3 Обґрунтування програмних модулів, використаних у дослідженні	64
Висновки до другого розділу	68
3 Розробка методів автоматизованого планування маршрутів польоту безпілотних літальних апаратів	70
3.1 Метод автоматизованого планування маршруту польоту безпілотного літального апарату для пошуку динамічного об'єкту	71
3.1.1 Обґрунтування структури методу автоматизованого планування маршруту польоту безпілотного літального апарату для пошуку динамічного об'єкту	71
3.1.2 Зміст методу автоматизованого планування маршруту польоту безпілотного літального апарату для пошуку динамічного об'єкту	73
3.1.3 Схема застосування методу автоматизованого планування маршруту польоту безпілотного літального апарату для пошуку динамічного об'єкту	79
3.2 Метод автоматизованого планування маршруту польоту безпілотного літального апарату для пошуку стаціонарних об'єктів	83
3.2.1 Обґрунтування структури методу автоматизованого планування маршруту польоту безпілотного літального апарату для пошуку стаціонарних об'єктів.....	83
3.2.2 Зміст методу автоматизованого планування маршруту польоту безпілотного літального апарату для пошуку стаціонарних об'єктів	85
3.2.3 Схема застосування методу автоматизованого планування маршруту польоту безпілотного літального апарату для пошуку стаціонарних об'єктів	103
Висновки до третього розділу	105
4 Інформаційна технологія автоматизованого планування дій безпілотних літальних апаратів	106

4.1 Обґрунтування складу та призначення інформаційної технології автоматизованого планування дій безпілотних літальних апаратів	106
4.2 Інформаційна технологія автоматизованого виявлення та класифікації об'єктів безпілотними літальними апаратами	115
4.3 Інформаційна технологія планування маршрутів польотів безпілотних літальних апаратів	119
Висновки до четвертого розділу	122
5 Розробка рекомендацій щодо побудови системи підтримки прийняття рішення та оцінка ефективності розроблених методів.....	123
5.1 Рекомендації щодо побудови системи підтримки прийняття рішення для управління безпілотними літальними апаратами	123
5.2 Оцінювання ефективності методу планування маршрутів польоту безпілотних літальних апаратів для пошуку динамічних об'єктів	132
5.3 Оцінювання ефективності методу планування маршрутів польоту безпілотних літальних апаратів для пошуку стаціонарних об'єктів.....	146
Висновки до п'ятого розділу	154
Висновки.....	155
Список використаних джерел.....	157
Додаток А Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дослідження	171
Додаток Б Основні типи безпілотних літальних апаратів та їх тактико-технічні характеристики	174
Додаток В Використання спеціальних програмних засобів в ході проведення чисельного експерименту	187
Додаток Г Акти реалізація результатів дослідження.....	190

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

БД	– база даних;
БЗ	– база знань;
БпАК	– безпілотний авіаційних комплекс;
БПЛА	– безпілотний літальний апарат;
БРЛС	– бортова радіолокаційна система;
ГІС	– геоінформаційна система;
ЗНМ	– згорткова нечітка мережа;
ІАД	– інтелектуальний аналіз даних;
ІП	– інтерфейсні програми;
ІТ	– інформаційна технологія;
ІЧ	– інфрачервоний;
ЛЛС	– лазерна локаційна система;
ЛПР	– людина, яка приймає рішення;
НПУ	– наземний пункт управління;
ПДП	– пункт дистанційного пілотування;
ПрС	– проблемна ситуація;
РТР	– радіотехнічна розвідка;
САУ	– система автоматичного управління;
САУ	– система автоматичного управління;
СВ	– ситуаційний вектор;
СКО	– середньоквадратичне відхилення;
СППР	– система підтримки прийняття рішення;
ТТХ	– тактико-технічні характеристики;
УПР	– управління повітряним рухом;
BLOS	– beyond line of sight;
LOS	– line of sight.

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Науково-технічний прогрес, особливо в галузі інформаційних технологій (ІТ), забезпечує швидкий розвиток техніки і розширення її функціональних можливостей. Однак переважна більшість сучасних технічних систем залишаються орієнтованими на людину, як ключову ланку управління ними. Виключення або зведення до мінімуму негативного впливу людського фактору у таких системах, наприклад, безпілотних літальних [1], [2], [3], дозволяють вирішувати різні завдання. Безпілотні літальні апарати (БПЛА) характеризуються низькою вартістю, простотою і доступністю технології виробництва. Льотно-технічні характеристики БПЛА дозволяють використовувати їх для вирішення широкого спектру завдань з пошуку стаціонарних та динамічних об'єктів і моніторингу їх стану. БПЛА виконують моніторинг і контроль об'єктів критичної інфраструктури, пожеж, сільськогосподарських угідь та лісних масивів, контроль морської акваторії, залізничних, автомобільних, газових та нафтових магістралей, отримання планів місцевості та кадастрових фотопланів [4], [5], [6]. Крім того, для забезпечення національної безпеки держави БПЛА можуть бути задіяні для ведення повітряної, хімічної, радіаційної розвідки, цілевказівки, пошуку злочинців та терористичних груп, припинення контрабанди [7].

Дані завдання вимагають ретельного планування маршрутів польотів БПЛА з урахуванням різноманітних факторів впливу на них, формування управляючих рішень з високою оперативністю та обґрунтованістю. Це може бути досягнуто шляхом створенням інтелектуальної системи підтримки прийняття рішення (СППР) [8].

Обґрунтування вибору теми дослідження. Сучасні СППР являють собою потужні інтелектуальні інформаційні платформи, що в автоматизованому режимі здатні оперативно вирішувати слабоформалізуемі

завдання. Основою систем такого типу є моделі, методи та алгоритми обробки інформації.

Задача планування маршрутів польотів БПЛА для моніторингу стаціонарних і динамічних об'єктів має свої особливості. Вони, як правило, зумовлені достатньо великою площею пошуку, малими геометричними розмірами об'єктів пошуку та доволі широкою номенклатурою їх класів. Тому необхідна розробка моделей автономного функціонування БПЛА, оперативної зміни мети місії БПЛА в польоті та оптимальних за певними критеріями маршрутів польоту БПЛА. Сучасні БПЛА мають у своєму складі автопілот та потужний бортовий комплекс оснащені відповідними інформаційними технологіями. Незважаючи на значну увагу до розвитку безпілотної (роботизованої) авіації як вітчизняними, так і закордонними дослідниками та науковцями [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], розробка методів автоматизованого планування маршрутів польотів БПЛА є перспективними.

Таким чином, виникає актуальне *науково-технічне завдання* розробки методів та інформаційної технології автоматизованого планування маршрутів польотів БПЛА для підвищення ефективності пошуку об'єктів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертаційної роботи тісно пов'язана із Зведеним річним планом наукової та науково-технічної діяльності Збройних Сил України на 2018-2020 рік, перспективними та річними планами науково-дослідних робіт Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. Базовою для підготовки та подання дисертаційної роботи є науково-дослідна робота шифр "Матриця" [16], яка виконувалась у Харківському національному університеті Повітряних Сил імені Івана Кожедуба та в якій основні наукові результати дисертаційної роботи використані в повному обсязі.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності пошуку динамічних та стаціонарних об'єктів безпілотними літальними апаратами.

Для досягнення мети дослідження необхідно вирішити взаємопов'язану сукупність завдань дослідження:

- 1) провести аналіз та формалізацію існуючих методів пошуку і планування маршрутів польоту БПЛА та виконати аналіз методів автоматизації планування маршрутів з обґрунтуванням показників та критеріїв оцінки ефективності пошуку динамічних та стаціонарних об'єктів;
- 2) удосконалити методи автоматизованого планування маршрутів польоту БПЛА для пошуку динамічних об'єктів;
- 3) удосконалити методи автоматизованого планування маршрутів для пошуку (підтвердження) стаціонарних об'єктів;
- 4) розробити інформаційну технологію автоматизованого планування маршрутів польотів безпілотних літальних апаратів;
- 5) виконати моделювання та оцінити ефективність розроблених методів.

Об'єкт дослідження – процеси пошуку динамічних та стаціонарних об'єктів безпілотними літальними апаратами.

Предмет дослідження – методи та інформаційна технологія автоматизованого планування маршрутів польотів безпілотних літальних апаратів.

Методи дослідження.

Наукові дослідження, виконані в дисертаційній роботі, ґрунтуються на використанні відомих методів наукового пошуку:

системного аналізу [17], [18], [19] – для пошуку проблемних питань планування застосування БПЛА для пошуку як динамічних, так і стаціонарних об'єктів;

методів теорії пошуку та переслідування об'єктів [20], [21], [22] – для визначення моделей пошуку, аналізу існуючих алгоритмів пошуку та переслідування, їх математичних постановок;

методів моделювання [23], [24] – для формування моделей руху динамічних об’єктів в складній місцевості, формування моделей польоту БПЛА;

методів аналізу складних організаційно-технічних систем, алгебри топологій [25], [26], [27], [28] – для удосконалення методу пошуку стаціонарних об’єктів на основі прогнозної стійкості складних систем;

теорії графів [29], [30], [31] – для формалізації завдань пошуку динамічних об’єктів та формалізації структури статичних об’єктів, застосування відомих алгоритмів оптимізації на графах;

теорії прийняття рішень [32], [33], [34] – для формування раціональних управлінських рішень, обґрунтування маршрутів польоту БПЛА для пошуку динамічних та стаціонарних об’єктів в системі підтримки прийняття рішень;

моделей і методів штучного інтелекту [35], [36] – для обґрунтування структури системи підтримки прийняття рішення щодо планування маршрутів польотів БПЛА для пошуку динамічних та стаціонарних об’єктів;

методів об’єктно-орієнтованого проектування та структурного синтезу інформаційних систем [37], [38], [39] – для проектування відповідної інформаційної технології у складі СППР;

методів теорії ймовірності [40] – для побудови математичних моделей руху.

При проведенні дисертаційного дослідження автор опирався на фундаментальні роботи в галузі теорії пошуку: Абчука В. А. [41], Кима Д. П. [20], Черноуська Ф.М. [22], Stone L. [42], [43], Dobbie J. [44], [45], Коорпан В. [46], [47], [48] та в галузі розробки моделей і методів інтелектуальних СППР: Міркина Б.Г. [49], Снитюка В.Е. [50], Мелехова А.М. [51], Герасимова Б.М. [52], Редька В.Г. [53].

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Удосконалений метод автоматизованого планування маршруту польоту БПЛА для пошуку динамічного об’єкту, який, на відміну від

існуючих, враховує невизначеність в діях протилежної сторони, формує варіанти прогнозу руху, оцінює динамічні характеристики об'єкту на кожному з варіантів можливих маршрутів його руху, що дозволяє знизити невизначеність інформації про дані маршрути і сформувати раціональний маршрут моніторингу об'єктів спостереження;

2. Удосконалений метод автоматизованого планування маршруту польоту БПЛА для пошуку стаціонарних об'єктів, що, на відміну від існуючих, враховує зв'язаність структури стаціонарних об'єктів на різних топологічних рівнях та дозволяє оцінити важливість даного типу об'єктів в загальній структурі;

3. Отримала подальший розвиток інформаційна технологія автоматизованого планування дій БПЛА, яка, на відміну від існуючих, враховує результати розпізнавання об'єктів, що дозволяє в реальному часі змінювати маршрут польоту при виконанні місії БПЛА.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Реалізація удосконаленого методу автоматизованого планування маршруту польоту БПЛА для пошуку динамічного об'єкту в системі підтримки прийняття рішення дозволила підвищити ймовірність виявлення об'єктів в лісостеповій місцевості на 65-70%.

2. Реалізація методу автоматизованого планування маршруту польоту БПЛА для пошуку стаціонарних об'єктів в системі підтримки прийняття рішення дозволяє отримати прогноз розташування стаціонарних об'єктів за критерієм стійкості складної системи, що підвищує ефективність виявлення об'єктів на 25-32%.

3. Реалізація інформаційної технології автоматизованого планування маршрутів польоту БПЛА дозволяє оперативно змінювати маршрут в процесі виконання місії за розпізнаними зображеннями, сформувати архітектуру перспективної інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень для планування дій БПЛА.

Результати роботи реалізовані під час навчань, тренувань та при

виконанні спеціальних завдань, що підтверджується актами (Акт командира військової частини А4608 від 16.10.2019 №350/76-54/389 пс, Акт командира військової частини А4465 від 05.09.2019).

Особистий внесок здобувача. Усі результати, що виносяться до захисту, отримані здобувачем особисто. В наукових працях, опублікованих у співавторстві, здобувачу належить:

у статті [55] – розроблені структура, зміст та оцінка ефективності удосконаленого методу автоматизованого планування маршруту польоту БПЛА для пошуку динамічного об'єкту;

у статті [56] – розроблений зміст удосконаленого методу автоматизованого планування маршруту польоту БПЛА для пошуку стаціонарних об'єктів;

у роботі [57] – розроблена структура інформаційної технології автоматизованого планування маршрутів польоту БПЛА, що є складовою технології виявлення та ідентифікації стаціонарних об'єктів безпілотними літальними апаратами;

у статті [58] – розроблені моделі руху динамічних об'єктів в різній місцевості, що дозволило сформулювати метод планування маршруту БПЛА для пошуку динамічних об'єктів;

у статті [59] – розкриті вимоги до комплексу завдань планування СППР;

у статті [60] – розкриті підходи до планування на основі застосування мультиагентного підходу.

Апробація результатів дисертації була проведена на:

– XIII науковій конференції Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба “Новітні технології для захисту повітряного простору” 12-13 квітня 2017, м. Харків [61];

– науково-технічній конференції “Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах” Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової

техніки 6-7 вересня 2018, м. Чернігів [62];

– науково-практичній конференції Національної академії Національної Гвардії України 31 жовтня 2018, м. Харків [63];

– сьомій міжнародній науково-технічній конференції Проблеми інформатизації 13-15 листопада 2019, м. Черкаси – Харків – Баку – Бельско-Бяла [64].

Публікації. Основні наукові результати за темою дисертаційної роботи опубліковано у 6 наукових статтях, в наукових фахових виданнях, що індексуються міжнародними бібліометричними та наукометричними базами даних: Scientific Indexed Service, Index Copernicus, Academic Resource Index, Google Scholar, Open Academic Journals Index, General Impact Factor), 1 звіті про НДР, 4 тезах доповідей на конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації складає 190 сторінок, у тому числі 10 сторінок анотації; 134 сторінок основного тексту; 4 рисунки і 2 таблиці на 6 окремих сторінках, 48 рисунків та 12 таблиць по тексту; список бібліографічних посилань з 126 найменувань на 13 сторінках; 4 додатки на 22 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ЗАВДАНЬ ПЛАНУВАННЯ МОНІТОРИНГУ СТАЦІОНАРНИХ ТА РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ БЕЗПІЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ

В даному розділі на основі аналізу сучасного стану та можливостей безпілотної авіації проводиться класифікація завдань моніторингу стану об'єктів та виокремлюється завдання планування пошуку об'єктів. Приводиться перелік існуючих моделей та методів планування, способів побудови маршрутів, обґрунтовується необхідність застосуванням сучасних інформаційних технологій для рішення завдань автоматизованого планування, моделей формалізації завдань планування руху безпілотної літальних апаратів.

Основними результатами, отриманими у розділі є: постановка завдання моніторингу рухомих та стаціонарних об'єктів, формалізація завдань планування пошуку об'єктів, постановка наукового завдання. Результати дослідження, викладені у розділі, відображені у публікаціях автора [60], [64].

1.1 Аналіз сучасного стану та можливостей безпілотної літальних апаратів щодо моніторингу рухомих та стаціонарних об'єктів

Безпілотні авіаційні комплекси (БпАК) усе більше витісняють традиційну авіацію в рішенні завдань моніторингу місцевості та об'єктів, надаючи споживачам оперативну інформацію в реальному часі для прийняття своєчасних управлінських рішень [65]. Це обумовлено тим, що безпілотна авіація значно дешевше в експлуатації та обслуговуванні, не вимагає значної інфраструктури та навчання льотчиків, не обмежується в застосуванні їх втому та ризиком для життя.

Аналіз існуючої вітчизняної і закордонної літератури щодо планування, компоновки, застосування БПЛА [77], [78], [79], [80] свідчить, що до теперішнього часу відсутній єдиний загальноприйнятий підхід до розробки і застосування безпілотної авіаційної техніки у військовій і цивільній галузі. Це породжує різноманіття термінології, понять і класифікацій безпілотних літальних апаратів і комплексів різного призначення. Для розробки та успішного використання безпілотних засобів авіаційної техніки необхідні єдина термінологія та їх класифікація, що відображають склад, призначення та галузь застосування БПЛА [81], [82].

Типовий склад БПЛА [82] представлений на рисунку 1.1. Основним компонентом комплексу бортового обладнання БПЛА є система автоматичного управління (САУ).

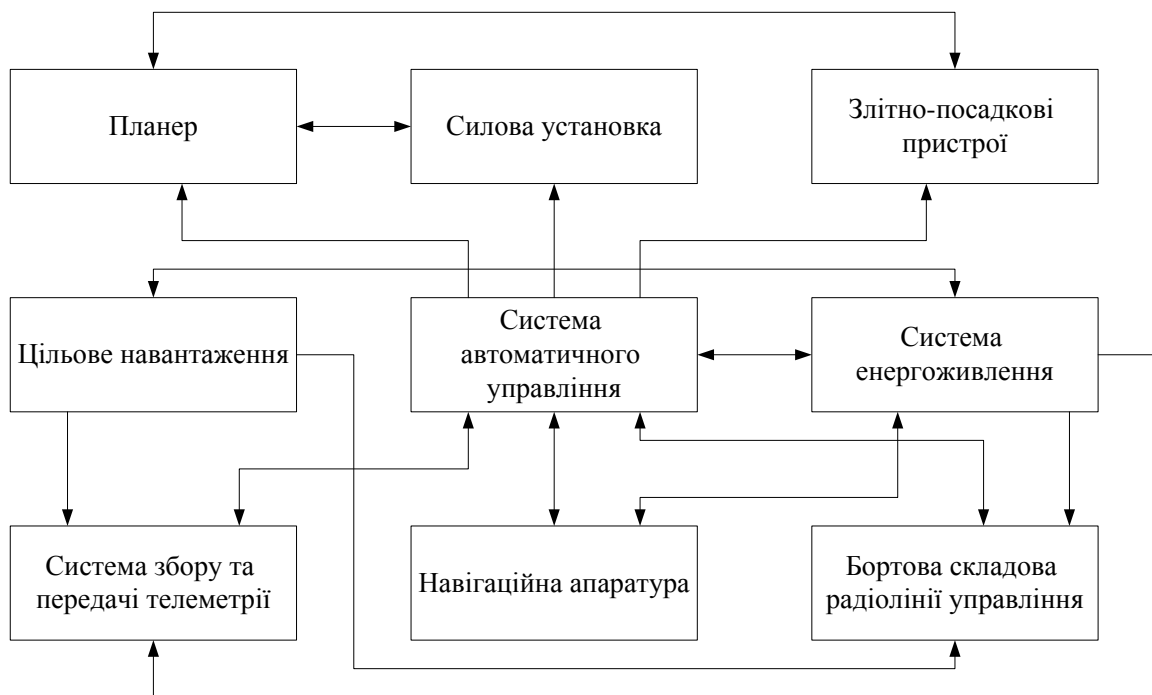


Рисунок 1.1 – Типовий склад безпілотної літальної апаратури

БПЛА звичайно функціонують у складі БпАК. До складу БпАК залежно від класифікації та технічних особливостей БПЛА можуть входити:

а) засоби зв'язку з органом управління повітряним рухом (УПР) та обладнання спостереження (зв'язку “керівник польотами – зовнішній пілот (оператор)” по лінії передачі даних, система радіомовного автоматичного залежного спостереження, прийомо-відповідач вторинного оглядового радіолокатора тощо);

б) навігаційне обладнання;

в) обладнання, що забезпечує зліт та посадку БПЛА (залежно від способу зльоту та посадки);

г) обчислювач управління польотом, система управління польотом та автопілот;

д) обладнання контролю технічного стану комплексу;

е) система припинення польоту, яка дає змогу в аварійній ситуації контрольованим чином безпечно завершити політ;

ж) обладнання, що забезпечує повернення БПЛА в район зльоту у разі виходу з ладу лінії керування та контролю;

з) спеціальне обладнання для завдань за призначенням.

БПЛА (крім автономних) пілотуються з пункту дистанційного пілотування (ПДП) з використанням лінії керування та контролю. Протягом польоту керування БПЛА здійснюється з одного або з декількох ПДП (але не одночасно). ПДП є портативним пристроєм або багатопультовою (однопультовою) станцією, може знаходитися в приміщеннях або поза приміщеннями, бути стаціонарним або мобільним (встановленим на транспортному засобі / кораблі / повітряному судні або переносним).

Лінія керування та контролю є симплексною або дуплексною, її використовують в умовах прямої радіовидимості (line of sight – LOS) або за межами радіовидимості (beyond line of sight – BLOS):

1) LOS – передавач та приймач знаходяться в межах зони дії взаємної лінії радіозв'язку і взаємодіють безпосередньо або через наземну мережу за умови, що дистанційний передавач знаходиться в межах LOS з БПЛА;

2) BLOS – будь-яка конфігурація, в якій передавач та приймач не знаходяться в межах LOS. Поняття BLOS охоплює будь-які системи (наземні, повітряні, супутникові), у рамках яких ПДП взаємодіє з одним або декількома ПДП.

Аналіз літературних джерел з питань проектування та застосування БПЛА [66], [67], [68], [69], [70], [71], [82] дозволив виділити та класифікувати основні завдання, що покладаються на безпілотну авіацію (рисунок 1.2).

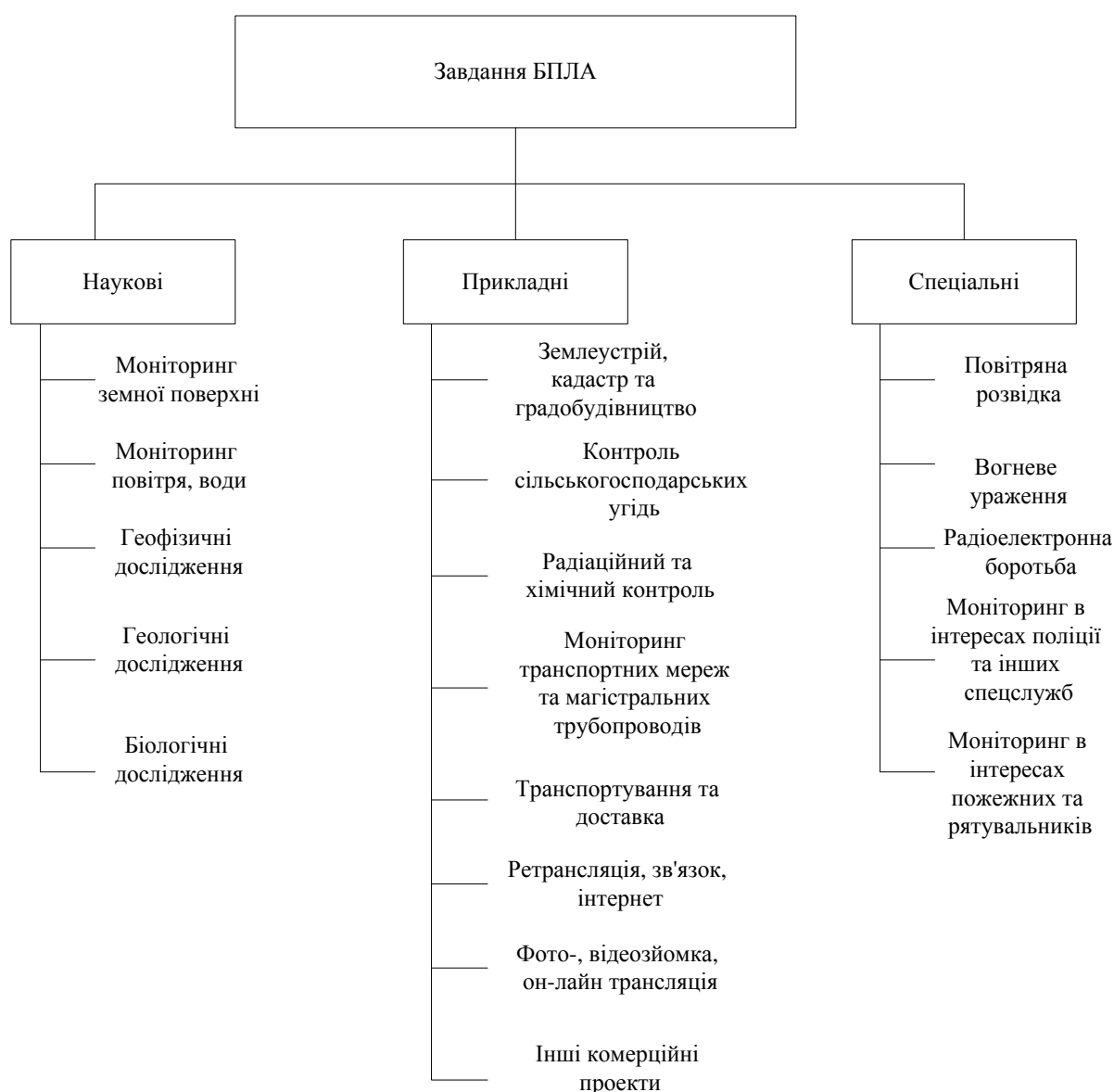


Рисунок 1.2 – Основні завдання безпілотного літального апарату

Отже, завдання моніторингу стаціонарних і рухомих (динамічних) об'єктів є пріоритетними на всій множині завдань.

До основних завдань БПЛА в цивільній сфері слід віднести [82]:

- 1) моніторинг (контроль) підстилаючої поверхні, атмосфери, об'єктів інфраструктури та інших об'єктів;
- 2) ретрансляцію радіосигналів;
- 3) доставку і скидання вантажів.

Перспективними завданнями застосування БПЛА є [77], [79], [81] є:

- а) контроль стану нафто- і газопроводів, ліній електропередач;
- б) моніторинг техногенних і природних катастроф, забезпечення пошуково-рятувальних операцій;
- в) контроль порушення кордонів об'єктів, пошук порушників, контрабандистів;
- г) пошук і виявлення судів, що терплять лихо, судів-порушників, контроль кордонів та правил рибного промислу;
- д) спостереження за станом земель і визначення характеристик ґрунтів, розпилення добрив та ядохімікатів;
- е) моніторинг повітряного і водного середовищ, льодової обстановки;
- ж) контроль гідрометеообстановки, екологічний моніторинг;
- з) пошук корисних копалин, підповерхневе зондування Землі.

З наведеного переліку завдань цивільних БПЛА можна зробити висновок, що в основному вони є окремими випадками більш широкого класу завдань, розв'язуваних БПЛА спеціального призначення.

БПЛА виконують спеціальні завдання з ведення повітряної розвідки, спостереження і рекогносцировки, тактичної авіаційної підтримки тощо [7]. Майже в реальному часі вони виконують завдання у безпосередній близькості до своїх військ або на віддаленні, на флангах, в тилу або в неприлеглих до поля бою районах, наприклад, в антитерористичних операціях. Працюючи в команді, БПЛА та пілотовані літальні апарати забезпечують високу ефективність моніторингу об'єктів і точність виконання завдань.

Інші ключові можливості БПЛА включають в себе моніторинг за маршрутом, площинну і зональну повітряну розвідку, оцінку завданих ушкоджень об'єктам інфраструктури і ретрансляцію каналів зв'язку.

Планування застосування БПЛА як інтегрованого елемента системи моніторингу може бути складним завданням, але має важливе значення в різних прикладних аспектах.

У Додатку Б до дисертаційної роботи наведено основні типи та тактико-технічні характеристики (ТТХ) БПЛА як вітчизняного, так і закордонного виробництва, що виконують весь спектр вказаних завдань.

1.2 Аналіз завдань моніторингу можливих об'єктів пошуку безпілотними літальними апаратами

А) Завдання моніторингу агропідприємств.

Проміжне положення між наземною та аерокосмічною зйомкою з метою локального моніторингу територій, на яких проводиться сільськогосподарська діяльність за критерієм “ефективність – вартість” займає зйомка з БПЛА. Основними напрямками застосування БПЛА у цій сфері є: інвентаризація і моніторинг стану посівів, контроль персоналу і техніки, внесення добрив, пестицидів і інсектицидів, картографування [84], [85], [86].

За кордоном накопичений значний досвід використання БПЛА для оцінки стану посіву і прогнозування врожайності. Дистанційне зондування широко застосовується в прецизійному землеробстві, метою якого є збільшення врожаю і зниження екологічних ризиків [87]. Для різних сільськогосподарських культур можна отримати оцінку статистичного зв'язку між різними вегетаційними індексами (за даними RGB-, мульти- і гіперспектральної зйомки з БПЛА) і фізіологічними характеристиками посівів (як приклад – рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Фотознімок дослідного стаціонарного поля пшениці озимої [88], ділянки: G – ґрунтова дорога, 0 – ділянка без добрив (контроль), 1 – внесено рекомендовану норму добрив

Б) Завдання моніторингу та контролю нафто- й газотрубопроводів.

На сьогоднішній день найбільш ефективним і економічно вигідним методом моніторингу нафто- і газотрубопроводів є застосування БПЛА. При повітряному моніторингу нафто- й газотрубопроводів БПЛА в реальному часі одержують якісні зображення. За їх допомогою легко виявляються нафтові розливи, акти несанкціонованої діяльності (смітники, врізки, проведення робіт в охоронних зонах – рисунок 1.4).

Фотознімки, отримані з борта БПЛА, дозволяють аналізувати та оцінювати технічний стан трубопроводів і навколотрубного простору, а згодом є основою для створення цифрових карт місцевості.

Основними завданнями розв'язуваними за допомогою БПЛА в межах завдання моніторингу нафто- та газотрубопроводів, є:

- а) регулярний моніторинг трубопроводів, у тому числі обстеження ділянок переходу через водні перешкоди і залізничні переходи;
- б) обстеження навколотрубного простору;

- в) оперативне виявлення розливів нафти;
- г) підтримка надійності роботи напірних трубопроводів;
- д) виявлення несанкціонованого добору нафти з трубопровідних магістралей;
- е) виявлення сторонніх осіб в зонах, що охороняються;
- ж) контроль за проведенням робіт на об'єктах;
- з) оцінка технічного стану трубопроводів, виявлення пошкоджень;
- і) моніторинг аварійних і позаштатних ситуацій, а також координація дій наземних груп.



Рисунок 1.4 – Приклад фотознімку трубопроводу в інфрачервоному (ІЧ) діапазоні для визначення фактів незаконного врізання

В) Завдання моніторингу антропогенної дії на навколишнє середовище.

При дослідженнях, пов'язаних з біосистемами, виникає необхідність вибору репрезентативних ділянок, що дозволяють оцінити стан геосистем. Збільшення господарської діяльності приводить до трансформації природного середовища, що веде до збільшення мозаїчності і контрастності різних порушених і умовно непорушених геосистем. При зниженні

антропогенного навантаження ініціюється відбудовний процес, що розтягується на багато років і нерідко охоплює значні території.

Однак на границі між різними геосистемами (наприклад, лісовими і степовими) у так званих екотонах, що мають специфічну структуру і є місцем формування специфічних ектональних співтовариств, стає складним завдання визначення корінного стану геосистем. Тому виникає необхідність оцінки ареалів поширення рослинних асоціацій. Для цих цілей останнім часом застосовуються різні дані дистанційного зондування земної поверхні за допомогою супутникової зйомки Землі.

Найбільш зручним інструментом для цих цілей є застосування БПЛА (рисунок 1.5).



Рисунок 1.5 – Розташування геосистем з різним рівнем антропогенного впливу, де 1 – умовно непошкоджений сосновий ліс; 2 – вирубка на місці пожежі; 3 – лісовідновлювальні насадження

Окремо слід виділити природоохоронне завдання контролю вирубки лісу, оскільки воно пов'язано з пошуком як стаціонарних об'єктів (ділянок незаконної вирубки лісу – рисунок 1.6) та динамічних об'єктів – мобільних груп вирубки.



Рисунок 1.6 – Ділянки незаконної вирубки лісу як стаціонарні об’єкти

Г) Пошук мобільних груп (терористичних, правопорушників).

На рисунку 1.7 наведено фото динамічного об’єкту – групи людей, що імітують терористичну групу та переміщуються на відкритому просторі між лісними ділянками місцевості.



Рисунок 1.7 – Динамічний об’єкт – група людей, що імітують рух терористів на відкритій ділянці місцевості

На рисунку 1.8 представлено спеціальні (військові) статичні об'єкти, які також є об'єктами пошуку.



Рисунок 1.8 – Статичний об'єкт – укріплення

Таким чином, можна зробити висновок, що для розробки методів планування маршрутів БПЛА при виконанні завдань моніторингу необхідно використовувати таку класифікацію типів об'єктів, розташованих у наземних (надводних) і повітряних областях земного простору, що корелює з запропонованою в джерелі [83]:

а) перший тип – точкові об'єкти (зразки наземної (надводної) техніки, люди, невеликі групи людей);

б) другий тип – лінійні об'єкти (колони техніки, автомобільні і залізничні, нафто- і газотрубопроводи, лінії електропередач);

в) третій тип – плоскі об'єкти (великі групи точкових об'єктів, агрополя, лісові масиви, населенні пункти, зони повеней і землетрусів);

г) четвертий тип – просторові об'єкти (області хімічного і радіоактивного зараження повітряного басейну).

Для моніторингу об'єктів перших трьох типів у даний час широко використовується оптико-електронна цільова апаратура БПЛА (телевізійна, тепловізійна, цифрова фотоапаратура).

Перспективними видами цільової апаратури моніторингу є бортові радіолокаційні (БРЛС) і лазерні локаційні системи (ЛЛС).

Для проведення радіотехнічної розвідки (РТР) об'єктів 1-го типу використовується спеціальна цільова апаратура. Об'єкти 4-го типу контролюються спеціальними датчиками встановленими на борту БПЛА.

Отже, розглянуті типові завдання БПЛА з моніторингу як стаціонарних, так і динамічних об'єктів та виділено чотири класи об'єктів пошуку. Задачі пошуку достатньо складні та потребують розробки відповідних моделей, методів та інформаційних технологій у складі системи підтримки прийняття рішення, аналізу яких і присвячений наступний підрозділ роботи.

1.3 Аналіз існуючих методів пошуку та планування маршрутів, застосування систем підтримки прийняття рішення для їх формування

Планування маршрутів БПЛА для ефективного досягнення цілей операції є досить складною прикладною задачею. При її розв'язанні в рамках теорії керування БПЛА необхідно використовувати апарат класичної і сучасної математики з обов'язковим застосуванням сучасних інформаційних технологій. Остання теза пояснюється тим, що для отримання в розв'язуваній задачі практично значимих результатів необхідно використовувати досить складні математичні моделі руху БПЛА, що враховують умови їх застосування. Як показала практика, при їх використанні досить мало ймовірним є можливість отримання законів управління БПЛА в аналітичному (формульному) виді. Формування таких законів, до яких

необхідно прагнути, виправдане тим, що їх вірогідність може бути перевірена шляхом моделювання до виконання польоту.

Задачі планування маршруту польоту традиційно зводяться до різного роду оптимізаційних постановок. Особлива увага авторів при цьому зводиться до процедури розв'язання таких постановок і відповідного програмного забезпечення. Обчислювальні проблеми, що виникають при розв'язанні задач лінійного програмування з булевими змінними, добре відомі [72]. У літературі [41], [48], [73] маються орієнтовані винятково на математичну сторону дослідження ефективності різних алгоритмів розв'язання таких задач і обчислювальних процедур, які їх реалізують. Перераховані питання розглядалися у відриві від специфіки конкретних завдань, що властиві БПЛА. У практичних ситуаціях алгоритми, обчислювальні процедури і їх програмна реалізація представляють собою єдиний комплекс. У такий спосіб питання раціонального комплексування уже відомих алгоритмів з оригінальними обчислювальними процедурами, що відображають специфіку конкретних задач маршрутизації, пророблені недостатньо.

Останнім часом, судячи з літератури [74], [75], [76], математична формалізація задачі маршрутизації польоту як задачі лінійного булевого програмування розглядається найбільш перспективною. Деякою мірою цьому сприяє можливість одержання при такому способі формалізації задачі її точного рішення. При цьому в публікаціях, присвячених задачам оптимального планування маршруту польоту, фактично не досліджувалася ситуація, коли така задача має множину рішень.

Існує деякий перелік типових маршрутів руху БПЛА для моніторингу як динамічних, так і стаціонарних об'єктів, що мають переваги та недоліки в своєму застосуванні.

Основними тактичними прийомами суцільного перегляду місцевості є “прочісування”, “зміщений віраж”. Різновидом прочісування місцевості є галси (рівнобіжні, що сходяться і розходяться), коробочка (що сходиться,

розбіжна), за допомогою яких місцевість заданого району піддається суцільному переглядові в ході виконання горизонтального польоту БПЛА (рисунок 1.9).

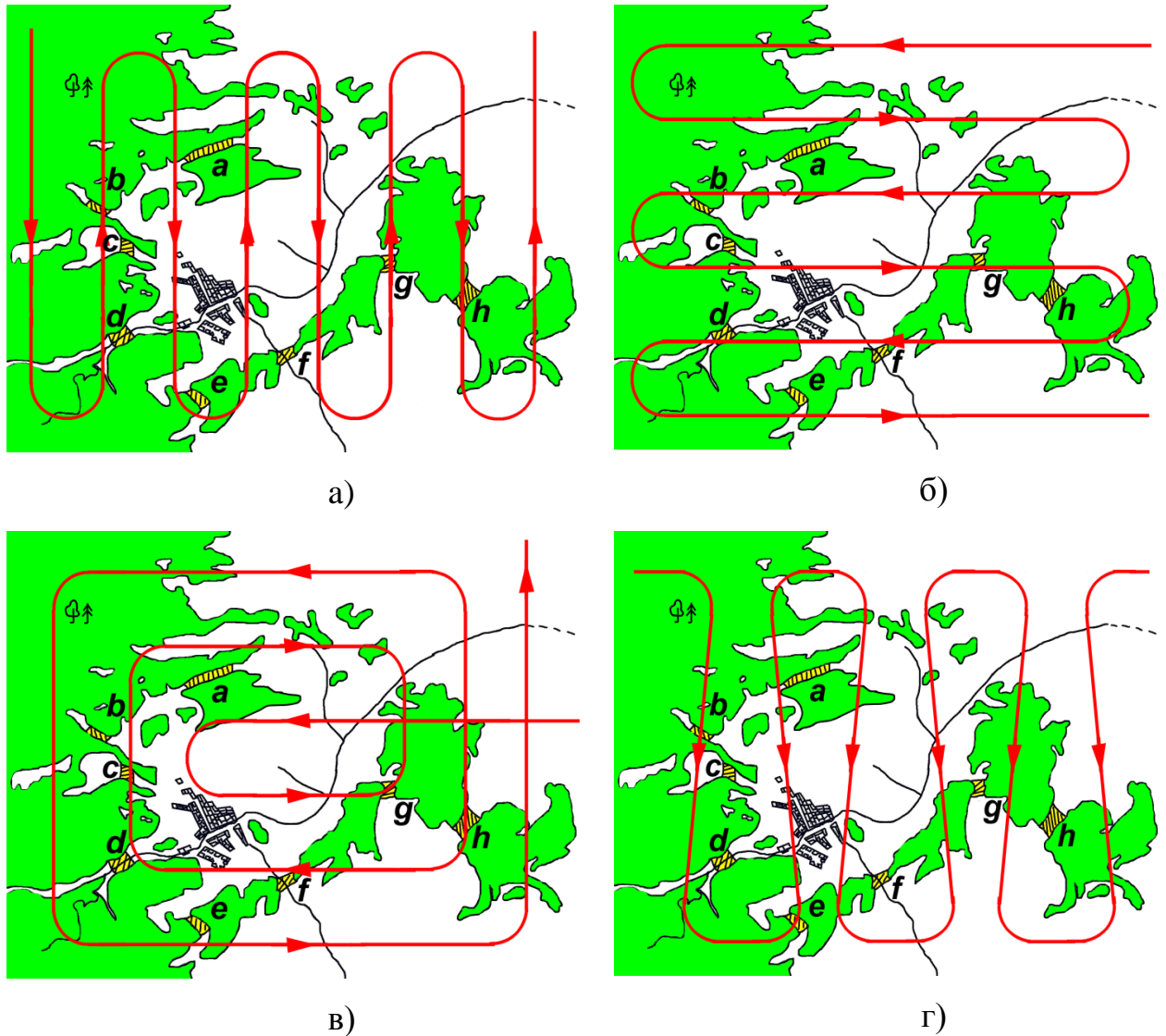


Рисунок 1.9 – Способи пошуку та планування маршрутів

а), б) “Паралельні галси”, в) “Розбіжна коробочка”, г) “Галси, які сходяться”

Головною перевагою галсів є простота виконання, однак значним недоліком є витрата часу та ресурсу польоту БПЛА без гарантованого успіху. Крім того, при виконанні завдань моніторингу за наявності групи противника “механічний рух” БПЛА за очевидною траєкторією дозволить без труднощів спрогнозувати наступну точку його маршруту та вийти з зони пошуку.

“Зміщений віраж” є також різновидом прочісування місцевості, у ході якого виконується кілька віражів.

Якщо передбачається, що динамічний об’єкт залишає місце первинного виявлення з постійною швидкістю, і його курси рівномірно розподілені від 0^0 до 360^0 , то способом пошуку можуть бути обрані: “розбіжна коробочка”, “рівнобіжні галси”, “гребінка”. Ці способи характерні для пошуку об’єкта на відкритих ділянках суші (степ, пустеля) або водного середовища. Спосіб “розбіжна коробочка” полягає в обстеженні району від вихідної точки зі зміною курсу польоту на 90^0 .

При рівномірному розподілі об’єкта пошуку на площі (у районі) принципово можливо організувати пошук, розташовуючи галси закономірно (закономірний пошук) або випадково (випадковий пошук одиночним БПЛА).

Спосіб “рівнобіжні галси” застосовується при пошуку нерухомих (малорухомих) об’єктів, що мають незначну швидкість переміщення, до яких відносять групи людей, тварини. Даний спосіб заснований на перегляді місцевості при польоті “рівнобіжними галсами”, які знаходяться один від іншого на відстані, яка забезпечує суцільний перегляд площі з урахуванням швидкості руху динамічного об’єкту, БПЛА і дальності виявлення об’єкту.

Спосіб “гребінка” [22] здійснюється з метою перегляду великої площі місцевості за мінімальний час і при наявності об’єктів один від одного, що забезпечує суцільний перегляд площі з урахуванням швидкості руху динамічного об’єкту, БПЛА і дальності виявлення об’єкту.

Якщо передбачається, що динамічний об’єкт іде з місця виявлення з постійною швидкістю, і його курси руху і подальше місцезнаходження прогнозуються, то способи пошуку будуть використані інші – “за напрямком”, “за заданим маршрутом”. Однак дані способи розраховані на прогноз рівномірного руху динамічного об’єкту протягом деякого часу, що можливо з застосуванням методів прогнозу, ІТ та СППР.

Перспективні завдання застосування БПЛА, планування їх маршрутів допускають синтез мети їх функціонування в польоті, прийняття

оптимальних оперативних рішень з урахуванням факторів, що відображають стан БПЛА і зовнішнього середовища, виконання цих рішень з високою точністю. Ці функції перспективних БПЛА можуть бути реалізовані за допомогою нового класу інтелектуальних СППР [83].

Під інтелектуальною СППР розуміється об'єднана інформаційним процесом сукупність технічних засобів і програмного забезпечення, що працює у взаємозв'язку з людиною (колективом людей) або автономно, здатна на основі використання поточної інформації і накопичених знань при наявності мотивації синтезувати мету, виробляти рішення про дію і знаходити раціональні способи її досягнення.

Таким чином, істотне розширення експлуатаційних характеристик перспективних БПЛА вимагає необхідності розробки систем управління нового покоління, що мають у своєму складі СППР, яка дозволяє функціонувати в умовах невизначеності.

Загальна відмінна риса задач управління БПЛА поза залежністю від їх типу і призначення полягає в необхідності урахування різних проявів невизначеності, основними джерелами якої є такі фактори [80]:

- а) нечіткість цілей функціонування і задач управління в польоті;
- б) нестационарність параметрів БПЛА і його системи управління;
- в) апіорна невизначеність обстановки та умов виконання польотного завдання;
- г) наявність випадкових впливів зовнішнього середовища;
- д) перекручування вхідної інформації, яка надходить оператору в каналах дистанційної передачі даних.

Слід зазначити, що системи управління більшості БПЛА перших поколінь, побудовані на основі класичних підходів, мають обмежені функціональні можливості, орієнтовані на автоматичні або напівавтоматичні режими роботи в детермінованих умовах [83].

Автономність і експлуатаційна ефективність перспективних БПЛА багато в чому залежать від наявності розвинених засобів їх передполітної

підготовки, розробка яких включає необхідність рішення наступних завдань, що частково вирішується в даній дисертаційній роботі:

а) створення інтелектуальних систем автоматизації процесів підготовки польотних завдань (планування маршрутів польотів БПЛА для пошуку динамічних і стаціонарних об'єктів із застосуванням СППР);

б) створення інтелектуальних систем комплексної діагностики БПЛА в процесі виконання місії.

Зі зростанням складності системи, рівень якої можна оцінити обсягом циркулюючої інформації [89], [90], необхідно використовувати, створювати і розвивати інтелектуальні системи і компоненти керування. При створенні систем інтелектуального управління [83] слід дотримуватися таких основних принципів:

а) принцип інформаційного обміну;

б) принцип відкритості системи інтелектуального управління для самонавчання і самоорганізації;

в) принцип прогнозування змін у зовнішній середовищі і системі.

На основі цих принципів у роботі [80] виділяються чотири класи динамічних систем інтелектуального управління:

1) системи ідентифікаційного управління;

2) системи адаптивного управління (системи із самонастроюванням);

3) системи інтелектуального управління без цілеполягання;

4) системи інтелектуального управління з цілеполяганням.

Поява функції цілеполягання істотно відрізняє останній клас систем від систем інтелектуального управління без цілеполягання. В інтелектуальних системах розглядаються три рівні управління (рисунок 1.10) [83].

1) верхній рівень управління, що забезпечує цілеполягання;

2) середній рівень управління, що здійснює пошук способу досягнення поставленої на верхньому рівні цілі;

3) нижній рівень управління, що реалізує обраний на середньому рівні спосіб досягнення поставленої мети.

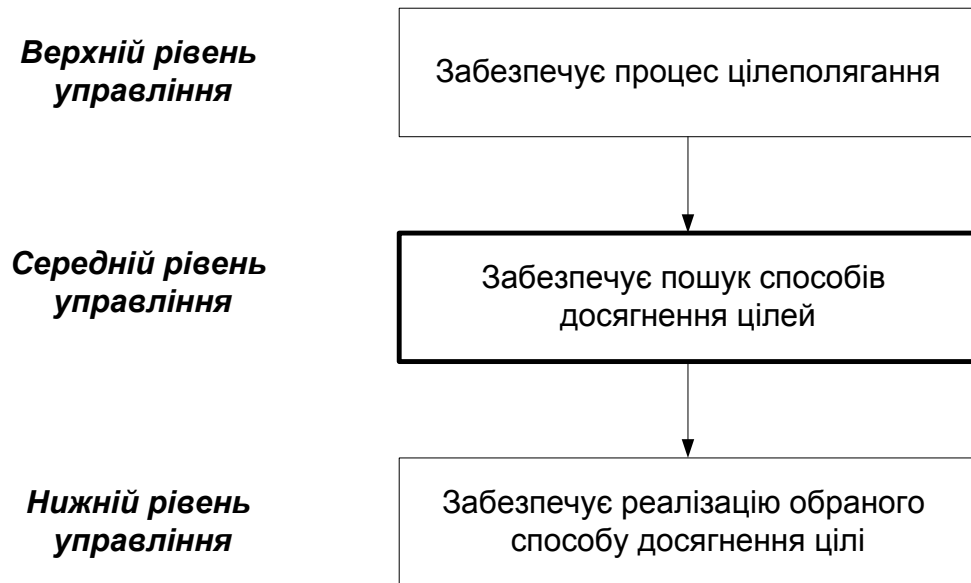


Рисунок 1.10 – Три рівні управління в інтелектуальній системі

Методи та інформаційна технологія, що розробляється (удосконалюються) в дисертаційній роботі, відповідають другому (середньому) рівню управління інтелектуальної системи.

1.4 Аналіз існуючих досліджень та постановка наукового завдання

Говорячи про постановку задачі планування маршруту польоту БПЛА слід зазначити, що в публікаціях (у першу чергу закордонних) в переважній більшості вживають такі терміни як “планування маршруту” або “формування маршруту”. Як правило, у цих роботах розглянуті задачі кінематики або динаміки руху БПЛА в процесі здійснення ними різних маневрів на порівняно коротких ділянках польоту. Такі постановки фактично відносяться не до розв’язання задачі вибору маршруту польоту, а до задачі формування траєкторії польоту, що є самостійною проблемою. Статей, в яких обговорюється процедура складання оптимального в тому або іншому змісті маршруту протягом усього польоту БПЛА, виявляється істотно менше.

На сьогоднішній день опублікована значна кількість робіт, що присвячені різним аспектам створення і цільового застосування БПЛА.

Досить високий ступінь опрацювання цього напрямку досліджень відбиває ряд фундаментальних робіт, що носять узагальнюючий і концептуальний характер. У них у тому числі розглянуті питання організації цільового функціонування БПЛА, включаючи планування маршруту польоту і суміжні з цим питанням проблеми. До такого роду роботам можна віднести роботу Рендала У. Біарда, Тімоти У. Маклейна [91], монографії Моїсеєва В.С. [82], [92], монографію [93], фундаментальну працю [94].

Аналіз опублікованих матеріалів показує, що класичною для задачі планування маршруту польоту БПЛА є її формалізація як задачі комівояжера [21], [41]. Побудова маршруту польоту зводиться до формування послідовності обльоту точок, розташування яких на земній поверхні вважається априорі заданим. При цьому в якості мінімізованого критерію виступає довжина маршруту. В той же час слід зауважити, що порядок обґрунтування вибору точок залежно від цілі (місії) БПЛА в даних працях не приводиться.

У традиційних постановках розв'язання шукається у вигляді замкнутого маршруту польоту, що зв'язує всі задані точки. Причому через кожну точку БПЛА пролітає тільки один раз, тобто маршрут не має петель. Таким чином, з математичної точки зору мова йде про трактування задачі маршрутизації польоту як класичної замкнутої задачі комівояжера. У зазначених роботах не враховується можливий вплив метеоумов на БПЛА при його русі за маршрутом, або передбачається, що швидкість вітру в зоні польоту мала. З урахуванням останнього, при постійній повітряній швидкості польоту мінімізація довжини маршруту виявляється тотожній мінімізації часу польоту за маршрутом. Як відзначається в [82], мінімізація часу польоту за маршрутом при постійній повітряній швидкості апарата фактично означає зниження витрати обмежених енергоресурсів БПЛА, а крім того, забезпечує

підвищення оперативності виконання місії польоту. Відзначимо, що матриця комівояжера при цьому виявляється симетричною.

У роботах [75], [95] автори відмовилися від зведення задач маршрутизації до різновидів задачі комівояжера на користь використання більш потужного загального формалізму лінійного булевого програмування.

Перспективність такого підходу обумовлена можливістю врахування більшої кількості факторів, суттєвих з погляду цільової ефективності БПЛА, а також обмежень, природа яких зв'язана як з характеристиками і можливостями самого БПЛА, так і особливостями цільових задач, для розв'язання яких призначений БПЛА. Зокрема, у роботі [96] оптимальний маршрут знаходиться з урахуванням обмеження на допустиму тривалість польоту БПЛА. У роботі [97] такий підхід дозволяє врахувати нерівноцінність точок, що включаються в маршрут.

Задачі, в яких враховуються додаткові обмеження і нерівноцінність точок не можуть бути зведені до класичної постановки комівояжера. Тому їх пропонується математично формалізувати як задачі лінійного програмування з булевими змінними [32], [33], [34]. Цей варіант математичної формалізації має визначені переваги і має цікаві перспективи для розгляду широкого спектра постановок, в яких, наприклад, можна враховувати різні додаткові обмеження, що часто зустрічаються при постановці задач маршрутизації польоту БПЛА.

Аналіз періодичних вітчизняних і закордонних літературних джерел дозволив зробити висновок, що задачі управління і планування застосування БПЛА умовно поділяються на три групи (рисунок 1.11).

Найбільш значуща група – це автоматичне розпізнавання образів на зображеннях, отриманих з БПЛА і їх обробка. Друга група дослідницьких робіт спрямована на керування колективами апаратів з використанням інтелектуальних інформаційних технологій. Третя група робіт спрямована на дослідження закономірностей пошуку динамічних і стаціонарних об'єктів.



Рисунок 1.11 – Склад методів управління та планування застосування безпілотних літальних апаратів за результатами аналізу періодичних джерел

У роботі [98] для автоматичного виявлення динамічних об'єктів на знімках застосовується адаптивний метод віднімання фони знімку. У роботі [99] запропонована і розроблена інформаційна технологія організації погоджених дій БПЛА при пошуку наземних мобільних об'єктів, що ґрунтується на аналізі ситуації. У роботі використані методи математичного моделювання, теорії ймовірностей, математичної статистики, комп'ютерного зору. У роботі [100] запропонована нова модель руху БПЛА за назвою DMM (динамічна модель руху). Але запропонована модель цифрового мультиметра забезпечує ефективні вікна пошуку на основі максимальної інтенсивності пікселей для сегментування тільки конкретних областей для переміщення динамічного об'єкта, а не пошук всієї області кадру за допомогою методу SUED (сегментація з використанням крайової дилатації).

У роботі [101] представлений звіт про результати дослідження, проведеного з оцінки продуктивності AR Drone для комп'ютерного зору. В роботі [13] вирішувалася проблема ефективної обробки зображень з більшою роздільною здатністю за допомогою CNN (convolutional neural network, згортова нейронна мережа) для інтелектуального БПЛА у реальному часі програми для камер. У роботі [102] розглядалася проблема розширення ймовірнісної рамки пошуку для врахування властивостей гнучких БПЛА, що стало базовою роботою для розробки методів в дисертаційній роботі.

У роботі [103] розглядається координація групи безпілотних літальних апаратів, що розгорнуті для пошуку динамічного об'єкта в безперервному просторі за допомогою алгоритму максимальної суми. У роботі [11] представлений підхід до розподілу завдань БПЛА, що беруть участь у місії пошуку і дії. Описано три алгоритми колективного пошуку неоднорідної команди БПЛА на просторово розширеному полі.

Стаття [104] стосується алгоритму виявлення і відстеження рухливих транспортних засобів за допомогою БПЛА з використанням обробки фонові сцени і фільтрації Кальмана. Важливими є результати роботи [105], де описаний порядок упровадження децентралізованої структури прийняття рішень з декількома агентами для рішення проблеми пошуку з обмеженням за часом.

У роботі [106] введена уніфікована структура для опису маршрутизації й оптимізації траєкторії польоту БПЛА. Незважаючи на значний інтерес до матеріалу даної статті, у ній наведені загальні постановки і формалізація задачі маршрутизації й огляд існуючих методів. Застосовано метод таксономії до існуючих методів маршрутизації і зроблений висновок про наявність значних пробілів у розв'язанні прикладних універсальних задач вибору оптимального маршруту польоту БПЛА. Робота [107] присвячена розробці нових і удосконаленню існуючих алгоритмів і методів застосування групи БПЛА, що займаються збором інформації про задану територію й оперативну обстановку, що динамічно змінюється. Запропоновано модифікований алгоритм послідовного вибору. Модифікований варіант відрізняється тим, що він мінімізує проходження по реперних точках двох або більше різних типів БПЛА. У статті [108] запропонований три різні стратегії пошуку об'єктів, а саме, стратегія випадкового пошуку, стратегія пошуку на основі доріжок і стратегія пошуку на основі мережі, проведений аналіз їх ефективності за допомогою моделювання Монте-Карло.

У статті [109] розглядається проблема оптимальної маршрутизації для безпілотних літальних апаратів. У статті представлена математична модель

для рішення визначеної задачі й експеримент, що використовується для перевірки функціональності моделі. Модель розроблена за допомогою методів математичного програмування.

У статті [110] розглядається проблема розробки цільових функцій для автономного пошуку і відстеження цілей спостереження безпілотними літальними апаратами. У роботі [111] представлений новий підхід до планування маршрутів загальних пошукових і спостережних місій координованими безпілотними літальними апаратами.

У роботі [112] запропонований удосконалений ієрархічний ймовірнісний алгоритм пошуку цілей, заснований на співробітництві БПЛА на різних висотах. Зокрема, запропонований спосіб скорочення часу пошуку і відстаней пошуку за рахунок покращення передачі інформації між висотними і маловисотними БПЛА.

За результатами короткого літературного огляду можна зробити висновок, що завдання планування застосування БПЛА для пошуку динамічних та стаціонарних об'єктів в умовах лісостепової місцевості, де є присутнім значні розрізнені лісисті області, придатні для маскуванню і складання оптимального маршруту руху для даних умов, не розглянута. Базовими роботами для розробки методів в дисертаційній роботі стали джерела [80], [82], [98], [100], [106], [107], [108], [109].

Таким чином, за результатом комплексного аналізу, проведеного в першому розділі, сформулюємо наукове завдання (рисунок 1.12).

Отже, для підвищення ефективності пошуку динамічних та стаціонарних об'єктів БПЛА необхідно розробити (удосконалити) методи та інформаційну технологію автоматизованого планування маршрутів польоту в системі підтримки прийняття рішення.

Узагальнена постановка задачі планування маршруту польоту БПЛА формулюється в такий спосіб. Знайти оптимальний у визначеному сенсі маршрут польоту БПЛА, що зв'язує всі, або частину точок з відомим місцем розташування, з урахуванням інформації про обмеження, накладених на

маршрут через специфіку цільової обстановки, а також обмежень, обумовлених технічними характеристиками БПЛА.



Рисунок 1.12 – Постановка наукового завдання

Розв'язання задачі маршрутизації польоту шукається у виді замкнутого, або розімкнутого маршруту, що зв'язує всі, або частина заданих маршрутних точок. Траса не повинна мати розривів – умова фізичної реалізуємості маршруту.

Висновки до першого розділу

1. Широке застосування БПЛА для рішення різноманітних завдань цивільного і спеціального призначення викликало значних інтерес дослідників до розробки методів планування маршрутів.

2. Значна увага приділяється побудові замкненого маршруту за відомими точками на основі розв'язання задачі комівояжера. У той самий час недостатньо висвітлені питання вибору та обґрунтування самих точок.

3. Розвиток ІТ дозволяє включити до складу БпАК систему підтримки прийняття рішень, що дозволить оператору приймати рішення про точки маршруту для ефективного пошуку динамічних і стаціонарних об'єктів.

4. Розроблені та удосконалені в дисертаційній роботі методи відповідають середньому рівню рішення завдань в інтелектуальній системі управління БПЛА – забезпечення пошуку способів досягнення цілей місії БПЛА.

РОЗДІЛ 2

ОБҐРУНТУВАННЯ СХЕМИ ПРОВЕДЕННЯ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МЕТОДИКИ ВИРІШЕННЯ НАУКОВОГО ЗАВДАННЯ

В другому розділі дисертаційного дослідження вводяться показники та критерії оцінювання ефективності розроблених (удосконалених) методів планування маршрутів польоту безпілотних літальних апаратів, проводиться обґрунтування обраних методів проведення дослідження для вирішення наукового завдання. Наводиться характеристика обчислювальних моделей, розроблених для отримання результатів моделювання. Формується та наводиться схема дослідження, вводяться допущення та обмеження щодо роботи. Основним результатом, отриманим в даному розділі є сукупність показників та критеріїв оцінювання ефективності планування маршрутів польотів безпілотних літальних апаратів для пошуку динамічних та стаціонарних об'єктів та схема проведення дослідження, що використовується в подальших розділах для досягнення мети роботи.

Результати досліджень опубліковані в роботах автора [58], [62].

2.1 Розробка показників та критеріїв оцінювання ефективності планування маршрутів польоту безпілотного літального апарату для пошуку об'єктів спостереження

2.1.1 Показники та критеріїв оцінювання ефективності планування маршрутів польоту безпілотного літального апарату для пошуку динамічного об'єкту

Оцінювання ефективності планування маршрутів польоту БПЛА для пошуку динамічного об'єкту базується на принципі раціональності дій двох протилежних сторін, у яких при виборі маршрутів руху досягаються

протилежні цілі. Динамічний об'єкт намагатиметься зменшити ймовірність його виявлення на маршруті руху до кінцевої цілі, а БПЛА (сторона моніторингу та розвідки) буде намагатися підвищити дану ймовірність.

Тому показники та критерії розділяються на дві взаємопов'язані групи:

- а) ефективність досягнення мети динамічним об'єктом;
- б) ефективність виконання місії БПЛА з пошуку динамічного об'єкту.

Основою обрані показники та критерії, розкриті в статті [113]. Метою динамічного об'єкту вважатимемо його вихід до деякого об'єкта (нафтопроводу, ділянки державного кордону, населеного пункту тощо) для здійснення певних дій, використовуючи захисні властивості місцевості. При цьому слід зауважити, що виявлення динамічного об'єкту можливе лише на відкритій ділянці місцевості (між маскувальними ділянками). Для лісостепу – це прогалини між лісовими масивами.

На кожен k -ий ($k = 1, 2, \dots, K$) об'єкт впливу веде J_k маршрутів. На кожному j_k -му маршруті руху динамічного об'єкту по напрямку до k -го об'єкту впливу визначаються всі відкриті ділянки місцевості $i_k = 1, 2, \dots, I_k$, на яких здійснюється виявлення.

Введемо показник ефективності маршруту руху динамічного об'єкту як ступінь виявлення даного об'єкту на маршруті U_{jk} :

$$U_{jk} = \sum_{i=1}^{I_k} r_{ijk} \times \frac{T_{d_{ijk}}}{\Delta t_{min}}, \quad (2.1)$$

де $T_{d_{ijk}}$ – оцінка часу спостереження за ділянкою при перетині його динамічним об'єктом (i -та ділянка на j -му маршруті до k -го об'єкту впливу);

Δt_{min} – оцінка мінімально необхідного часу спостереження за відкритою ділянкою місцевості для ідентифікації об'єкта з повітря;

r_{ijk} – булева функція, що дорівнює одиниці, якщо ділянка включається в аналіз можливого виявлення, нулю – в іншому випадку.

Якщо на маршрутах є ділянки з ненулевою вразливістю динамічного об'єкту (2.1), то з'являється можливість ранжування маршрутів за ступенем вразливості (ступенем виявлення динамічного об'єкту).

Вважаємо, що динамічний об'єкт буде намагатися обрати маршрут з найменшою накопиченою ймовірністю. Критерієм вибору раціонального маршруту руху динамічного об'єкту доцільно прийняти умову (2.2) – неперевикнення значення показника деякого заздалегідь обраного граничного значення U_{lim} :

$$U_{jk} \leq U_{lim} \quad (2.2)$$

Для всіх ділянок маршруту, який досліджується (для ділянок маскування і ділянок відкритої місцевості) розраховується математичне сподівання часу їх перетину динамічним об'єктом $m_{t_{ijk}}$ та дисперсія даної випадкової величини $D_{t_{ijk}}$. Нехай випадкова величина – обрана динамічним об'єктом швидкість руху на елементарній ділянці $[a,b]$ – розподілена за рівномірним законом розподілу

$$f(V) = \begin{cases} 0, & V \notin [a, b]; \\ \frac{1}{b-a}, & V \in [a, b]. \end{cases} \quad (2.3)$$

Тоді математичне сподівання значення швидкості (m_v) з дисперсією (D_v) та середньоквадратичним відхиленням (σ_v) як

$$m_v = \frac{a+b}{2}; D_v = \frac{(b-a)^2}{12}; \sigma_v = \frac{b-a}{2\sqrt{3}}. \quad (2.4)$$

Шляхом відповідного перетворення [40] отримаємо:

$$g(t) = f(\psi(t)) \cdot |\psi(t)| = f(V_{1(2)}(t)) \cdot V_{1(2)}(t) = \frac{1}{b-a} \cdot \frac{L_{1(2)}}{t^2}, \quad (2.5)$$

де $V_{1(2)}$ – швидкість по ділянці маскування (відкритій ділянці місцевості);

$L_{1(2)}$ – довжина ділянки маскування (відкритої ділянки місцевості) відповідно.

Отримаємо закон розподілу випадкової величини – часу виходу з ділянки маскування (з відкритої ділянки місцевості). За відомими формулами функції розподілу випадкової величини $g(t)$ можна отримати [40] вираз для математичного сподівання (2.6) часу руху по ділянці (m_t) та дисперсією (D_t) даної випадкової величини (2.7):

$$m_t = \int_{L/b}^{L/a} t \cdot g(t) dt = \frac{L}{b-a} \ln\left(\frac{b}{a}\right); \quad (2.6)$$

$$D_t = \int_{L/b}^{L/a} (t - m_t)^2 \cdot \frac{L}{t^2(b-a)} dt = \frac{L^2}{a \cdot b} - \frac{L^2}{(b-a)^2} \cdot \left(\ln \frac{b}{a}\right)^2. \quad (2.7)$$

Порівняльна оцінка результатів аналітичного розрахунку математичного сподівання (2.6) та дисперсії (2.7) з результатами імітаційного моделювання (за допомогою розроблених моделей) приведено в наступному підрозділі дисертаційної роботи.

Використовуючи властивість математичного сподівання та дисперсії суми незалежних випадкових величин, можна розрахувати математичне сподівання та дисперсії часу виходу динамічного об'єкту до k -го об'єкту на j_k -му маршруті (2.8).

$$m_{t_{njk}} = \sum_{i=1}^n m_{t_{ijk}}; \quad D_{t_{njk}} = \sum_{i=1}^n D_{t_{ijk}}. \quad (2.8)$$

З усіх J_k маршрутів виходу динамічного об'єкту потрібно відібрати один, який буде відповідати вимогам критеріальної оцінки (2.2) та мінімізувати даний показник.

Всього буде відібрано K маршрутів по кількості об'єктів впливу, на яких із застосуванням формули (2.9) знайдемо загальну кількість R відкритих ділянок місцевості, над якими потрібно проводити моніторинг за допомогою БПЛА:

$$R = \sum_{i=1}^{I_K} r_{ijk}. \quad (2.9)$$

Це – кількість відкритих ділянок на маршрутах руху динамічного об'єкту, що потрібно пролетіти БПЛА. На кожен таку ділянку БПЛА повинен виходити під час перебування на ньому динамічного об'єкту.

Сутність оцінки ефективності пошуку динамічного об'єкту полягає в отриманні і співставленні двох оцінок – ймовірнісної оцінки часу виходу динамічного об'єкту і детермінованої можливої оцінки часу перебування БПЛА над відкритою ділянкою маршруту руху динамічного об'єкту.

Перша оцінка – випадкова величина (час виходу динамічного об'єкту) описується нормальним законом розподілу імовірності з математичним сподіванням і дисперсією часу виходу динамічного об'єкту на середину відкритої ділянки можливого маршруту руху до об'єкту дії.

Друга оцінка – детермінована величина, що визначається часом можливого моніторингу БПЛА відкритої ділянки маршруту, якщо подія перебування в цей час на ділянці динамічного об'єкту буде описана отриманим законом розподілу імовірності з розрахованими параметрами

(математичне сподівання та дисперсія).

В основі способу одержання інформації про ефективність моніторингу динамічного об'єкту лежить функція щільності розподілу імовірності часу виходу динамічного об'єкту на середину відкритої ділянки, що використовується як вимірювальна характеристика для розрахунку величини ефекту, що залежить від ступеня збігу часу прильоту БПЛА і часу виходу динамічного об'єкту на ділянку.

Це і дозволяє одержати третю оцінку – оцінку ефективності ведення пошуку динамічного об'єкту, що розраховується як імовірність події потрапляння випадкової величини (часу приходу динамічного об'єкту) в інтервал, початок і кінець якого визначають тривалість перебування БПЛА над ділянкою при виконанні завдань моніторингу.

Відомо [40], що ймовірність потрапляння випадкової величини в інтервал часу $[b_1, b_2]$ знаходиться за формулою [2.10]:

$$P(b_1 < t < b_2) = \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \int_{b_1}^{b_2} e^{-\frac{(t-m_t)^2}{2\sigma_t^2}} dt. \quad (2.10)$$

Якщо розглядати кожен s -ий ($s=1,2,\dots,S$) можливий маршрут польоту БПЛА відкритих ділянок, то кожна подія прольоту БПЛА ділянки дасть приріст показника ефективності розвідки на кожному з них. Такий приріст ефективності можна позначити як $\Delta P_{k.m.n}$, де $n=1,2,\dots,N$ – номер об'єкта, на маршруті до якого знаходиться k -та ділянка.

Тоді за показник ефективності (E_s) маршруту польоту БПЛА для пошуку динамічного об'єкту можна використовувати оцінку зваженого математичного сподівання числа виявлень динамічного об'єкту на s -му маршруті польоту БПЛА:

$$E_s = \sum_{n=1}^N \left(u_n \times \sum_k \Delta P_{k.m.n} \right), \quad (2.11)$$

де u_n – важливість об'єкта дії, до якого веде маршрут руху динамічного об'єкту і на якому знаходиться даний об'єкт дії. Важливість обирається на інтервалі $[0,1]$ за приналежність ділянки моніторингу до конкретного маршруту руху динамічного об'єкту.

У цьому випадку для множини можливих маршрутів критерієм вибору кращого для виявлення об'єкту пошуку буде вимога максимізації показника (2.12):

$$E = \max_s E_s. \quad (2.12)$$

Таким чином, введені показники і критерії оцінки ефективності пошуку динамічних об'єктів з використанням БПЛА дозволяють отримати значення порівняльної ефективності для маршрутів польоту БПЛА з виконання завдань моніторингу та пошуку.

2.1.2 Показники та критерії оцінювання ефективності планування маршрутів польоту безпілотного літального апарату для пошуку статичних об'єктів

Метою пошуку статичних об'єктів може бути:

- 1) підтвердження відомих статичних об'єктів та їх характеристик (завдання моніторингу);
- 2) пошук нових (невідомих) статичних об'єктів, виходячи з гіпотези стійкості системи, яка досліджується (завдання виявлення).

В обох випадках точки маршруту будуть мати вагу w_i . При цьому використовується адитивний критерій, кожен доданок якого визначається ефектом від включення в маршрут відповідної точки.

Величина ефекту від включення конкретної точки до маршруту польоту вважається відомою. Іншими словами, математично критерій записується як лінійна форма, в якій вагові коефіцієнти для кожної точки відповідають ефекту від її моніторингу.

Кожній точці, яка може бути включена до маршруту польоту, призначений унікальний номер від 1 до n . Множину шуканих змінних визначимо як X . Елементами цієї множини є цілочисельні булеві змінні $x_{ij} \in \{0; 1\}$, ($i, j = \overline{1, n}, i \neq j$). Змінна x_{ij} має значення 1, якщо точка з номером j є в маршруті наступною за точкою з номером i , в іншому випадку $x_{ij} = 0$.

Шляхом заборони окремих сполучень індексів змінних з розгляду виключаються елементи маршруту, які є забороненими.

Критерій ефективності планування маршруту польоту безпілотного літального апарату для пошуку статичних об'єктів запишемо у вигляді:

$$W = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_j x_{ij} \rightarrow \max, \quad (2.13)$$

при обмеженнях:

– на максимальну тривалість польоту:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ij} x_{ij} \leq T_{\max}, \quad (2.14)$$

де T_{\max} – максимальний час польоту по маршруту з урахуванням ТТХ БПЛА;
 t_{ij} – мінімальний час перельоту між точками i та j з урахуванням

метеорологічних умов, що може бути розраховано за методикою, викладеною в роботі [97].

- на включення кожної точки маршруту не більше одного разу:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} \leq 1; \quad \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq 1; \quad (2.15)$$

- на включення точки старту до маршруту:

$$\sum_{j=1}^n x_{sj} = 1; \quad (2.16)$$

- на замкненість маршруту (відсутність підциклів на графі [29], [30]):

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} - \sum_{i=1}^n x_{ji} = 0. \quad (2.17)$$

Якщо доповнити (2.15) – (2.17) лінійними обмеженнями, що виключають появу в рішенні підциклів, то отримана в результаті постановка буде представляти собою задачу булевого лінійного програмування, розв'язання якої дозволить одержати шуканий оптимальний маршрут польоту БПЛА.

2.2 Визначення та обґрунтування напрямку дослідження, методичних підходів до автоматизованого формування маршрутів польоту безпілотних літальних апаратів

На даний час існує значна кількість методів розв'язання задачі автоматизованого планування маршрутів, таких як повний перебір [31], динамічне програмування [14], генетичні алгоритми [32], жадібні алгоритми, метод сходження [73] і багато інших [80], [82], [107].

Повний перебір [31] усіх можливих варіантів є самим простим розв'язанням даної задачі. Цей метод дозволяє розв'язати задачу пошуку оптимального маршруту найпростішим методом. Основою методу повного перебору є складання і розрахунок усіх можливих послідовностей обльоту об'єктів. Даний метод завжди дає оптимальне з (точки зору обраного критерію якості) розв'язання задачі, однак вимагає для виконання великої кількості часу й обчислювальних ресурсів. При цьому з ростом кількості об'єктів (для сучасних БПЛА при рішенні спеціальних завдань кількість таких об'єктів може складати від кількох десятків до сотні) час розв'язання задачі росте за експонентою, оскільки кількість можливих варіантів дорівнює $n!$, де n – кількість об'єктів.

Сильні сторони методу: простота реалізації, знайдене рішення завжди оптимальне. Слабкі сторони: значний час рішення задачі.

Жадібний алгоритм [73]. Існує кілька варіантів роботи жадібного алгоритму, але, загалом, їх принцип зводиться до такого. Знаходиться оптимальне рішення для кожної локальної задачі, але рішення глобальної задачі може в загальному випадку не бути оптимальним. Для задачі пошуку оптимального маршруту це вироджується в той факт, що наступним завжди вибирається об'єкт, найближчий до поточного положення БПЛА. Але в даному випадку маршрут, що виходить у результаті, не завжди є оптимальним.

Сильні сторони методу: простота реалізації, швидкість роботи, відомий заздалегідь час пошуку. Слабкі сторони: неоптимальне рішення глобальної задачі.

Генетичні алгоритми [32], [114] – метод оптимізації заснований на принципах, що спостерігаються в природі. Вони сполучають у собі високу швидкість роботи, малу імовірність зупинки в локальних мінімумах простору пошуку. Робота генетичних алгоритмів заснована на принципах природного добору і використовує множину понять і визначень, запозичених з генетики. Це такі поняття, як хромосома, ген, пристосованість, мутація, добір, схрещування та інші. На початку роботи алгоритму генерується початкова популяція – набір осіб, що характеризується хромосомами. Кожна хромосома представляє собою рядок. У цьому рядку закодована інформація про маршрут польоту БПЛА. Наприклад, якщо є 4 об'єкти, які необхідно облетіти, то можливо закодувати хромосому у вигляді двійкового рядка так, що кожен 2 біти будуть представляти собою номер об'єкта в двійковому коді. Від вибору кодування хромосоми найчастіше залежить ефективність застосування генетичного алгоритму. Наприклад, у даному випадку, у результаті роботи алгоритму одержується множина восьмибітних рядків. Більшість з них не годяться для рішення задачі. Це пояснюється тим, що деякі об'єкти будуть враховані кілька разів, а деякі можуть бути взагалі не бути враховані. Відповідно такий варіант кодування можна вважати не дуже вдалим.

Після створення початкової популяції (зазвичай випадковим образом) варто відібрати деяку кількість осіб як батьків для майбутніх поколінь. Існує кілька алгоритмів вибору, однак саме популярним є правило рулетки [114].

Розглянемо його докладніше. Для кожної з осіб в існуючій популяції виконується обчислення функції пристосованості (функція, що є критерієм оптимальності того або іншого маршруту). Після цього колесо рулетки розділяється на сектори. Кожний з них відповідає визначеній особі, а його розмір пропорційний значенню функції пристосованості цієї особи. Далі,

запускаючи рулетку необхідну кількість разів, відбираємо особи в популяцію батьків. Якщо згенероване випадкове число попадає в сектор, що відповідає визначеній особі, то вона попадає в популяцію батьків. При цьому таж сама особа може бути обрана до популяції батьків кілька разів. Таким чином, імовірність найбільш пристосованої особи брати участь в утворенні потомства вище, ніж у менш пристосованого.

Після того як популяція батьків створена, випадковим чином відбираємо двох (або більше залежно від конкретної реалізації алгоритму) і з деякою імовірністю робимо операцію схрещування. Ця операція полягає в тому, що хромосоми двох батьків розділяються на кілька частин у точках схрещування і обмінюються цими частинами. Таким чином, отримаємо двох осіб наступного покоління.

Операція добору двох батьків і схрещування повторюється доти, поки не набереться потрібна кількість осіб для наступного покоління.

Після закінчення операції схрещування зі знову створеної і попередньої популяції відбирається деяка кількість кращих осіб так, щоб підсумковий розмір популяції відібраних осіб відповідав вихідному розміру.

Далі виконується операція мутації. Вона полягає в тому, що з дуже маленькою імовірністю кожен біт особи може бути змінений на протилежний. Це необхідно для виключення таких ситуацій, коли, наприклад, у всій популяції перший біт кожної хромосоми дорівнює нулю, і, таким чином, неможливо одержати в результаті схрещування значення одиниці на його місці.

Після проведення всіх цих операцій закінчується одне покоління генетичного алгоритму і виконується перевірка на умову зупинки. Умовою зупинки може бути, наприклад, кількість виконаних поколінь або дуже маленька мінливість найкращого рішення в декількох популяціях. Якщо умова зупинки не дотримана, то всі операції генетичного алгоритму повторюються заново з поточною популяцією. В іншому випадку найкраще рішення з поточної популяції приймається як оптимальне.

Сильні сторони роботи генетичного алгоритму: практично повна незалежність від характеристик простору пошуку, мала залежність від характеру критерію оптимальності, знайдене рішення практично завжди є оптимальним. Слабкі сторони: складність реалізації, значна залежність від вибору варіанта кодування хромосоми.

Таким чином, існуючі в даний час підходи до розв'язання задачі планування маршруту польоту в першу чергу відносяться до процесу почергового обльоту і спостереження нерухомих об'єктів. Однак у даних методах недостатня увага приділена обмеженим динамічним можливостям БПЛА та важливості об'єктів моніторингу (пошуку), а їх урахування призводить до змін плану обльоту об'єктів. Відсутні методи прогнозу наявності стаціонарних об'єктів, виходячи з гіпотези стійкості системи.

Значні труднощі виникають при плануванні пошуку динамічних об'єктів.

По-перше, для попадання динамічного об'єкта у вікно спостереження бортової апаратури БПЛА необхідно прогнозувати його рух. Для цього у вихідних даних об'єкта потрібно враховувати не тільки вихідні координати місця розташування об'єкта, але і вектор швидкості його руху.

По-друге, більш істотне ускладнення полягає в тому, що у випадку порушення не первісного маршруту обльоту, а графіка польоту, наприклад, через дію метеоумов (вітру), час прогнозування змінюється. Отже і нове місце розташування точок вимагає повторного перепланування маршруту.

Вказані невідповідності в існуючих методах рішення задач автоматизованого планування маршрутів польоту БПЛА для пошуку динамічних та стаціонарних об'єктів вимагає проведення відповідного дослідження. Його схема наведена на рисунку 2.1, що включає систему нових наукових та практичних результатів.

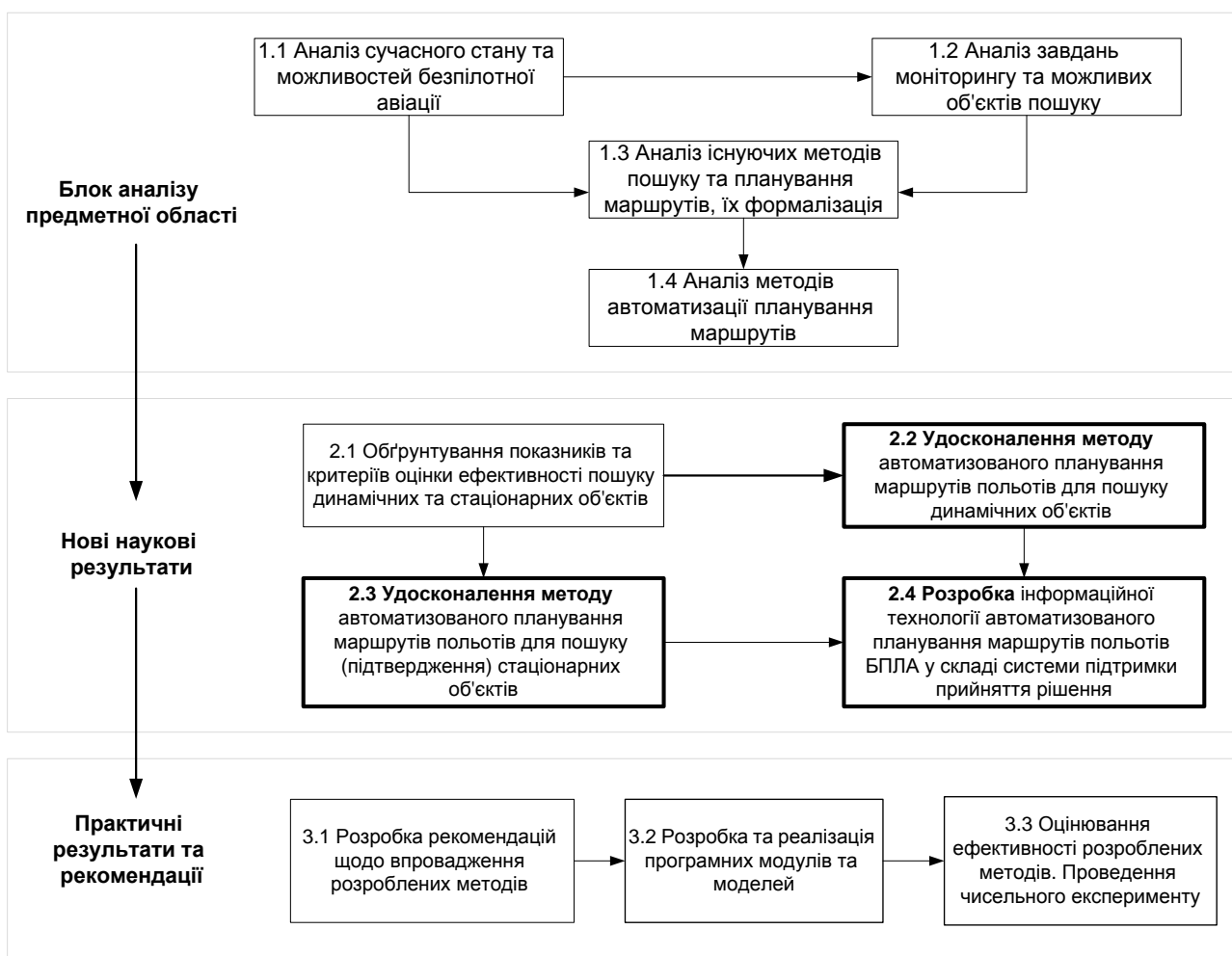


Рисунок 2.1 – Схема проведення дисертаційного дослідження

На першому етапі виконується аналіз предметної області: існуючий стан та ТТХ БПЛА, дається характеристика об'єктів пошуку, аналізуються напрацювання вітчизняних та закордонних вчених в галузі автоматизованого планування маршрутів руху БПЛА, робиться висновок про недосконалість існуючих методів та необхідність їх удосконалення.

На другому етапі проводиться обґрунтування показників та критеріїв оцінювання ефективності розроблених методів; з урахуванням висунутих вимог до систем автоматизованого планування маршрутів польоту БПЛА для пошуку як динамічних, так і стаціонарних об'єктів, виконується удосконалення методів та інформаційної технології, що складає зміст нових наукових результатів.

На третьому етапі розробляються відповідні рекомендації щодо впровадження результатів роботи в практику застосування БПЛА,

описуються розроблені програмні модулі та компоненти, що реалізують розроблену інформаційну технологію, проводиться чисельний експеримент та оцінюється ефективність отриманих результатів.

2.3 Обґрунтування програмних модулів, використаних у дослідженні

Для проведення дослідження та чисельного експерименту його результатів було використано наступну сукупність програмних модулів, пов'язаних у єдину систему (рисунок 2.2).

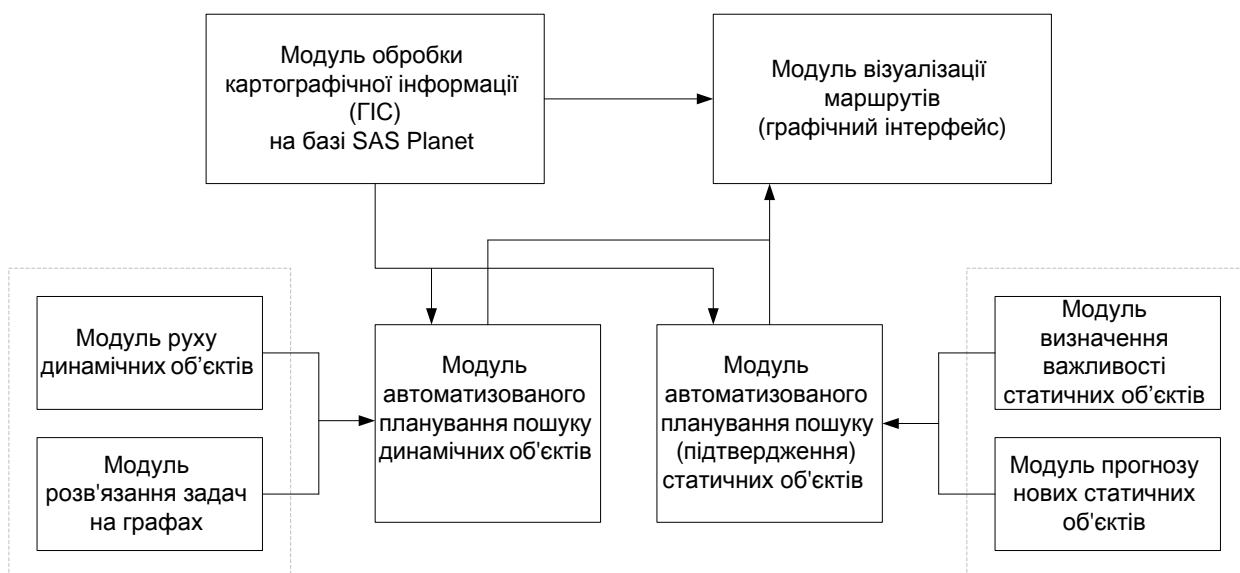


Рисунок 2.2 – Сукупність програмних модулів використаних при проведенні дослідження

Характеристики та відомості про виконавців програмних модулів безпосередньо не розроблюваних в межах виконання дисертаційної роботи наведено в Додатку Б. Далі наведемо дані лише по розробленим модулям.

Для прогнозування значень показників руху динамічних об'єктів розроблений програмний модуль, результати роботи якого наведені на рисунках 2.3 – 2.5.

Для одержання щільності розподілу випадкової величини – часу виходу динамічного об'єкту на середину відкритої ділянки була використана модель руху з параметрами, отриманими на практиці. Апроксимуємо щільність розподілу імовірності вибору швидкості руху динамічних об'єктів при подоланні елементарних ділянок формою рівномірного закону. Тоді при постійній довжині цих ділянок форма щільності розподілу часу виходу на відкриту ділянку буде мати форму нормального закону (рис. 2.3-2.5).

Моделювання проведено для таких початкових даних: довжини елементарної ділянки – 2 м., загальній довжині маршруту в лісі – 5 км, при зміні швидкості руху від 2 до 4 км/год., 9999 прогонів.

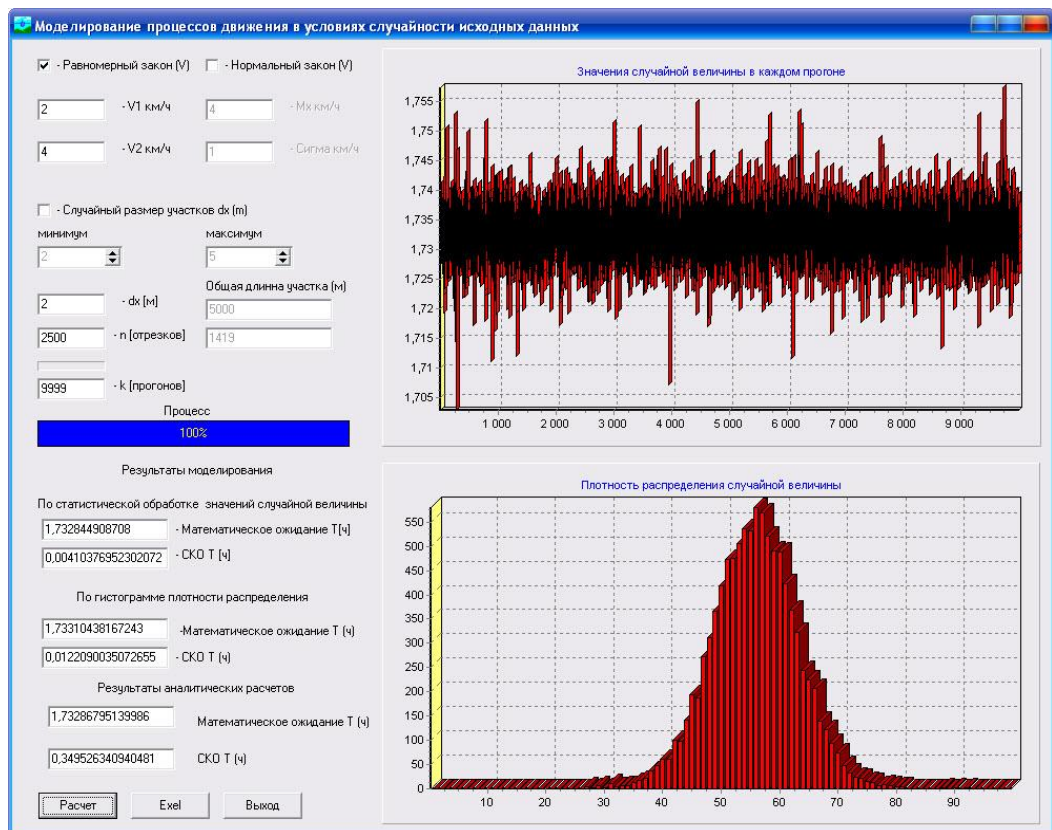


Рисунок 2.3 – Відображення результатів моделювання процесу руху динамічного об'єкту (5 осіб) у лісовому масиві до виходу на відкриту ділянку (випадкова швидкість руху)

При цьому розраховувалися: математичне сподівання часу виходу динамічного об'єкту із лісу і середньоквадратичне відхилення (СКВ)

випадкової величини. Причому, як видно з результатів моделювання (рисунок 2.3), розрахунки математичного сподівання, отримані аналітичним способом, за статистичними даними і за гістограмою щільності розподілу практично збігаються, а величина СКВ – відрізняються на порядок. Тому в подальших розрахунках використовувалося значення СКВ, отримане зі статистичних даних.

На рисунках 2.4 і 2.5 відображені результати моделювання процесу руху динамічних об'єктів у лісовому масиві до виходу і після виходу на відкриту ділянку (випадкова швидкість руху динамічного об'єкту і довжина елементарної ділянки).

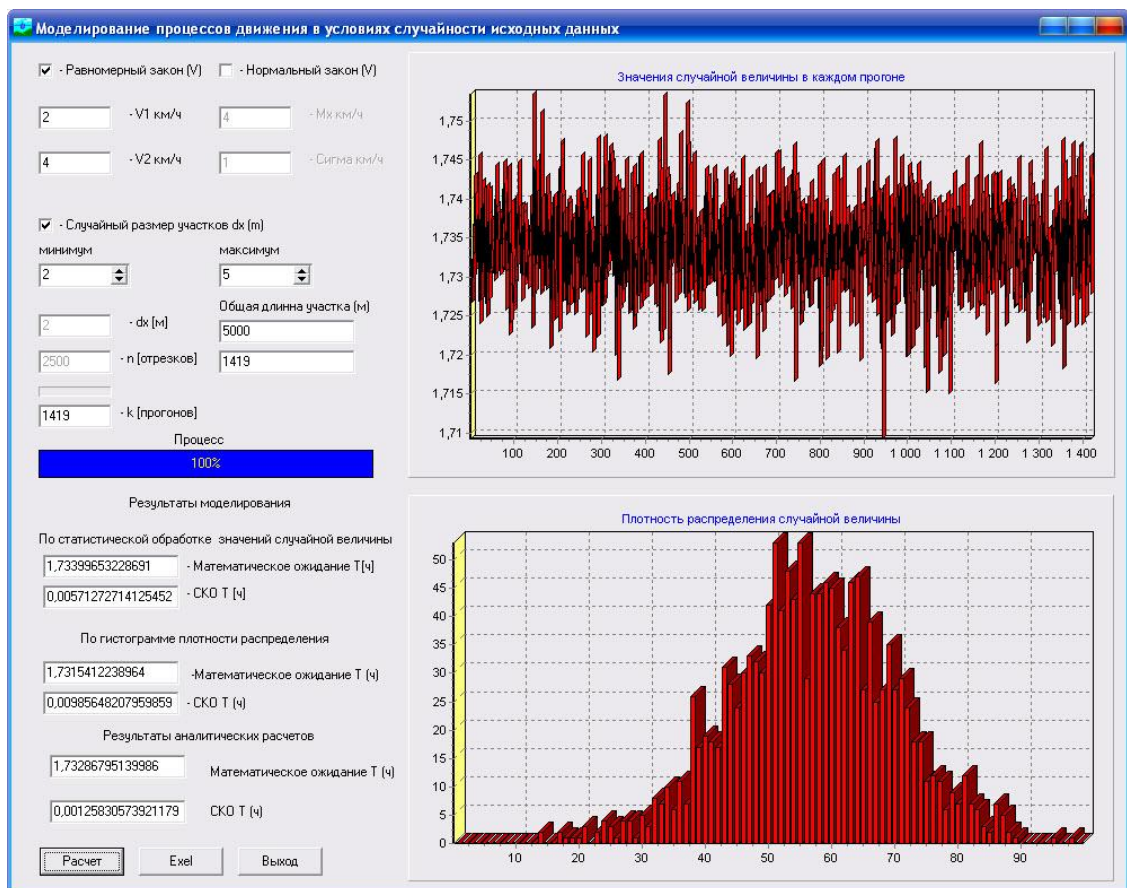


Рисунок 2.4 – Відображення результатів моделювання процесу руху динамічного об'єкту у лісовому масиві до виходу на відкриту ділянку

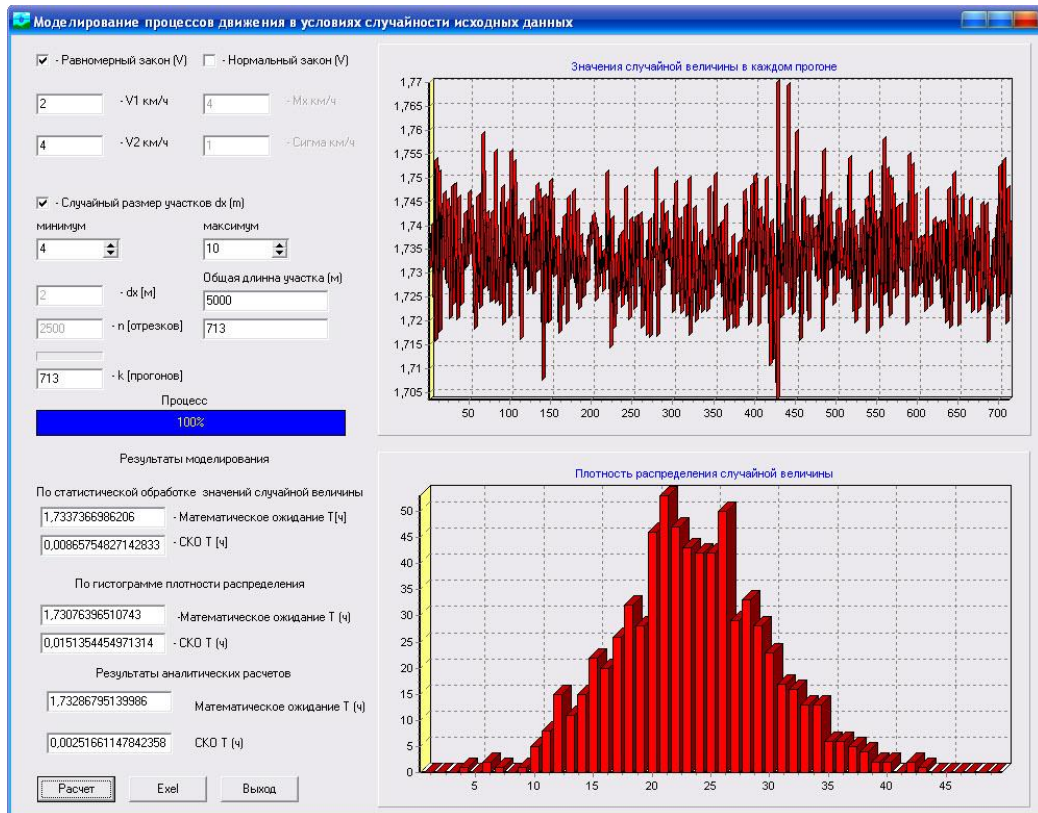


Рисунок 2.5 – Відображення результатів моделювання процесу руху динамічного об'єкту після виходу з відкритої ділянки

Виходячи з результатів моделювання, можна представити в загальному виді щільність розподілу випадкової величини – часу виходу динамічного об'єкту на середину відкритої ділянки маршруту, як показано на рисунку 2.6.

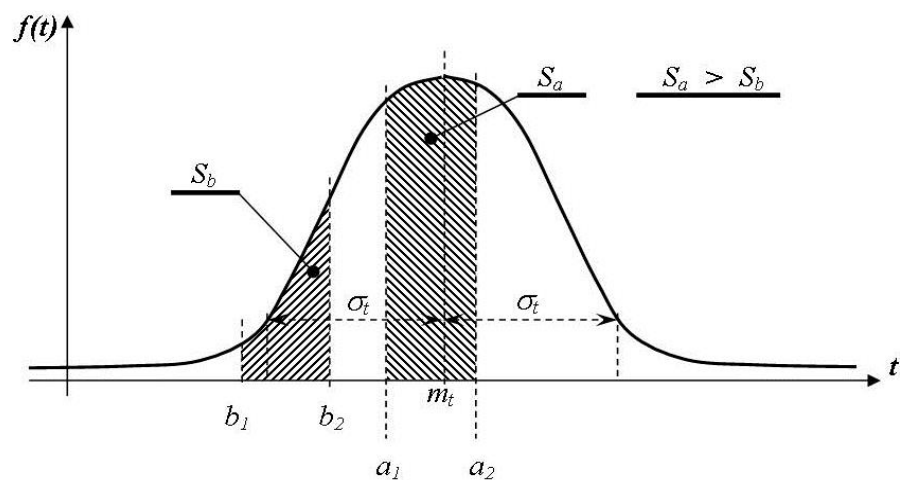


Рисунок 2.6 – Щільність розподілу імовірності випадкової величини – часу виходу динамічного об'єкту на середину відкритої ділянки

Висновки до другого розділу

1. Для оцінювання ефективності планування маршрутів польотів БПЛА та пошуку динамічного об'єкту використаний принцип раціональності дій двох протилежних сторін, які при виборі маршрутів руху досягають протилежні цілі.

2. Сутність оцінки ефективності пошуку динамічного об'єкту полягає в отриманні і співставленні двох оцінок: ймовірнісної оцінки часу виходу динамічного об'єкту і детермінованої можливої оцінки часу перебування БПЛА над відкритою ділянкою маршруту руху динамічного об'єкту.

3. В основі способу одержання інформації про ефективність моніторингу динамічного об'єкту лежить функція щільності розподілу імовірності часу виходу динамічного об'єкту на середину відкритої ділянки, що використовується як вимірювальна характеристика для розрахунку величини ефекту, яка залежить від ступеня збігу часу прильоту БПЛА і часу виходу динамічного об'єкту на ділянку.

4. Основним завданням пошуку статичних об'єктів є:

- а) підтвердження відомих статичних об'єктів та їх характеристик;
- б) пошук нових (невідомих) статичних об'єктів, виходячи з гіпотези стійкості системи, яка досліджується.

5. В обох випадках точки маршруту будуть мати вагу w_i . При цьому використовується адитивний критерій, кожен доданок якого визначається ефектом від включення в маршрут відповідної точки.

6. Математична постановка задачі пошуку (підтвердження) статичних об'єктів з використанням БПЛА представляє собою задачу булевого лінійного програмування.

7. Існуючі в даний час підходи до рішення задачі планування маршруту польоту в першу чергу відносяться до процесу почергового обльоту і спостереження нерухомих об'єктів. Однак у даних методах недостатня увага приділена обмеженим динамічним можливостям БПЛА та важливості

об'єктів моніторингу (пошуку), а їх урахування призводить до змін плану польоту об'єктів. Відсутні методи прогнозу наявності стаціонарних об'єктів, виходячи з гіпотези стійкості системи. Значні труднощі виникають при плануванні пошуку динамічних об'єктів.

8. Схема проведення дослідження складається з трьох етапів, що відповідають аналізу проблемної області автоматизованого планування маршрутів польоту БПЛА для пошуку динамічних та стаціонарних об'єктів, розробки (удосконалення) моделей і методів як сукупності нових наукових результатів роботи, отримання нових практичних результатів та оцінка ефективності розроблених методів шляхом проведення чисельного експерименту.

9. Дослідження процесу автоматизованого планування маршрутів польоту БПЛА для пошуку динамічних та стаціонарних об'єктів проводиться із застосуванням методології системного аналізу, теорії ймовірності, математичного моделювання, елементів штучного інтелекту, сучасних інформаційних технологій.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА МЕТОДІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПЛАНУВАННЯ МАРШРУТІВ ПОЛЬОТУ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

В розділі розкривається сутність та зміст методів автоматизованого планування маршрутів польоту БПЛА для динамічних та стаціонарних об'єктів.

В умовах невизначеності інформації про можливі дії динамічних об'єктів ймовірнісні оцінки отримання позитивних результатів виявлення цих об'єктів із застосуванням БПЛА близькі до нуля. Існуючі методи обґрунтування маршрутів і виявлення динамічних об'єктів за допомогою БПЛА у лісостеповій місцевості не відповідають методам прогнозу їх дій. Тому в умовах апріорної невизначеності дій динамічного об'єкту пошук не забезпечує їх своєчасне виявлення і розпізнавання. Для усунення даної невідповідності в роботі удосконалений метод автоматизованого планування маршруту польоту БПЛА для пошуку динамічного об'єкту. Метод враховує невизначеність в діях протилежної сторони, формує варіанти прогнозу руху, оцінює вразливість динамічного об'єкту на кожному з можливих маршрутів їх руху. Це дозволяє знизити невизначеність інформації про дані маршрути і сформулювати раціональний маршрут моніторингу об'єктів спостереження.

Удосконалений метод автоматизованого планування маршруту польоту БПЛА для пошуку стаціонарних об'єктів ґрунтується на оптимізації булевих функцій, враховує зв'язаність структури стаціонарних об'єктів на різних топологічних рівнях та дозволяє оцінити важливість даного типу об'єктів в загальній структурі. Розробка даних методів ґрунтується на наукових положеннях, що розкриті в роботах [10], [24], [82], [95], [97], [115], [116].

Основні наукові результати, які розкриті в даному розділі опубліковані в роботах [55], [56], [60], [64].

3.1 Метод автоматизованого планування маршруту польоту безпілотного літального апарату для пошуку динамічного об'єкту

3.1.1 Обґрунтування структури методу автоматизованого планування маршруту польоту безпілотного літального апарату для пошуку динамічного об'єкту

Застосування БПЛА для повітряного пошуку динамічних об'єктів пов'язана з тим, що вони можуть виконувати свої завдання на великій території, де знаходяться кілька десятків можливих об'єктів впливу. У такому випадку сил та часу для ведення наземного пошуку може не вистачити.

Існуюча схема планування маршруту польоту БПЛА вимагає постійного внесення змін. Це пояснюється тим, що маршрут польоту БПЛА повинен враховувати дії протилежної сторони, допускати застосування прийомів і способів протидії повітряному пошуку для прихованого виходу до об'єктів впливу з використанням лісових масивів для маскуванню.

Відмінною рисою розробленого методу є необхідність урахування множини варіантів маршрутів руху динамічних об'єктів і множини маршрутів польоту БПЛА. Звідси витікає розв'язання задачі оптимізації варіантів з використанням критеріїв ефективності дій динамічних об'єктів та БПЛА, що детально розглянуті в п.2.1 дисертаційної роботи.

Спочатку необхідно оцінити можливість ведення пошуку за допомогою БПЛА. Для цього враховується час первинного виявлення динамічних об'єктів, їх вихідний район розташування, в якому вони могли знаходитися. Якщо до поточного часу додати розрахунковий час виходу динамічних об'єктів до можливих об'єктів дії, то першим знайденим показником буде час готовності БПЛА до ведення пошуку (treadAR).

Другий показник ефективності пошуку за допомогою БПЛА характеризує оперативність виконання задачі пошуку (timplAR). Різниця

значень двох розрахункових показників дозволяє оцінити запас часу для організації протидії динамічним об'єктам спеціальними силами (Δ – необхідний запас часу).

Якщо $\Delta \leq 0$, то задача пошуку динамічного об'єкту за допомогою БПЛА неможлива. Це вимагає зміни виду пошуку (наприклад, наземний).

При позитивних зовнішніх умовах ведення пошуку за допомогою БПЛА проводиться підготовка вихідних даних з оцінки дій динамічного об'єкту, що включає оцінку:

- а) кількості об'єктів пошуку;
- б) кількості районів дій (впливу);
- в) загальної площі району ведення пошуку;
- г) кількості можливих об'єктів впливу та їх характеристика;
- д) вихідного часу і місця виявлення динамічного об'єкту;
- е) кількості і характеристик природно-ландшафтних масивів з маскувальними властивостями (маскувальних областей, відкритих ділянок на можливих маршрутах руху динамічних об'єктів);
- ж) характеристик рельєфу на можливих маршрутах руху динамічних об'єктів.

Після введення до СППР вихідних даних і побудови варіантів можливих маршрутів виходу динамічних об'єктів до об'єктів впливу, проводиться оптимізація кількості маршрутів за мінімумом значення показника вразливості динамічного об'єкту на кожному з маршрутів.

У результаті на кожен об'єкт впливу визначається один раціональний маршрут, на якому є як лісові масиви з маскувальними властивостями, так і відкриті ділянки, минати які динамічний об'єкт не може. Використовуючи модель руху динамічного об'єкту, можна отримати прогнозне значення часу виходу його на середину кожної відкритої ділянки для всіх відібраних маршрутів до кожного об'єкту впливу.

Таким чином, із усієї множини відкритих ділянок місцевості виділяються ті з них, на яких з визначеною імовірністю можлива поява динамічного об'єкту.

Тепер розробка плану пошуку звужується до задачі польоту БПЛА відібраних відкритих ділянок маршрутів руху динамічних об'єктів саме в той час, що отримується при розв'язанні ймовірнісної задачі оцінки часу виходу динамічного об'єкту на ці ділянки.

Використовуючи модель польоту БПЛА і метод оцінки ефективності пошуку за допомогою БПЛА (див. п. 2.1.1), можна провести оптимізацію кількості всіх можливих маршрутів польоту за обраним критерієм ефективності.

3.1.2 Зміст методу автоматизованого планування маршруту польоту безпілотного літального апарату для пошуку динамічного об'єкту

3.1.2.1 Автоматизована оцінка варіантів маршрутів руху динамічного об'єкту при виконанні місії

Автоматизація процесів оцінювання необхідна для отримання раціонального варіанта дій динамічного об'єкту, для обґрунтування плану пошуку за допомогою БПЛА і прийняття рішення на пошук. При цьому алгоритми будуються на відомих математичних методах теорії дослідження операцій, теорії графів [29], [31].

У загальному випадку задача зводиться до опису методами теорії графів структури плану дій динамічних об'єктів на вибір маршрутів руху до об'єктів впливу.

Нехай в районі пошуку існує I лісистих ділянок (в яких динамічний об'єкт не може бути виявлений засобами БПЛА). Кожен район має геометричні розміри, в межах яких вибирається довжина маршруту L_{1i} , де

$i \in [1 \dots I]$. Також існує J відкритих ділянок між ними, кожна з яких має геометричні розміри, в межах яких вибирається довжина маршруту руху по відкритій ділянці L_{2i} , де $i \in [1 \dots J]$.

В районі пошуку визначено N можливих об'єктів впливу з боку динамічних об'єктів (для терористичних груп – це може бути об'єкти економіко-соціальної інфраструктури, військові об'єкти, для правопорушників – переходи через ділянки кордонів, місця доступності врізування до трубопроводів тощо).

Ймовірність знаходження динамічного об'єкту в i -ій лісистій ділянці складає $p_i^0, i \in [1..I]$, ймовірність того, що динамічний об'єкт діє по n -му об'єкту впливу – $p_n^1, n \in [1..N]$.

Приймемо множину лісистих ділянок I за вершини орієнтовано графа [29], які можуть мати як вхідні, так і вихідні ребра (назвемо їх вершини першого типу). Вершинами другого типу є множина об'єктів впливу N . Множина відкритих ділянок між лісистими ділянками формує ребра орієнтованого графа. Одну і ту саму відкриту ділянку не може поєднувати декілька пар вершин.

На першому етапі будується незважений граф, кількість вершин якого (потужність множини вершин V) визначається за формулою

$$V = I + N. \quad (3.1)$$

Кількість ребер побудованого графу (потужність множини ребер B) визначається за формулою

$$B = J + N. \quad (3.2)$$

Другий доданок формули (3.2) отримано з припущення, що з ліистої ділянки до об'єкту впливу є лише один шлях.

Задача визначення ваг ребер графа пов'язана з показниками

ефективності дій динамічних об'єктів (див. п. 2.1.1). Один з них – це час виходу на n – ий об'єкт впливу з i – ої маскувальної області, тоді ваги ребер графа відповідають відстані між маскувальними областями та об'єктами впливу. Другим показником доцільно вибрати кількість відкритих ділянок на маршруті проходження динамічного об'єкту. Чим менше відкритих ділянок на маршруті руху, тим менше імовірність виявлення динамічного об'єкту (при цьому ваги ребер графа приймаються рівними 1).

Визначення ваг ребер графа вихідної обстановки в районі пошуку дозволяє, застосувавши відомі методи розв'язання задач на графах [29], [31], одержати множину можливих варіантів дії динамічного об'єкту.

Розв'язання даної задачі зводиться до знаходження мінімального шляху з вихідної вершини в усі кінцеві. При цьому вихідні вершини відповідають лісистим ділянкам, а кінцеві – об'єктам впливу.

Дана задача може бути розв'язана з використанням алгоритму Дейкстри [29]. Ітераційно повторюючи алгоритм для кожної початкової вершини (лісистій ділянки), можна одержати найкоротші маршрути з кожної ділянки до об'єкта впливу, що зручно представити у виді матриці Q :

$$Q = \begin{array}{c|ccc} & 1 & \dots & I \\ \hline 1 & q_{11} & \dots & q_{1I} \\ \dots & \dots & q_{in} & \dots \\ N & q_{1N} & \dots & q_{IN} \end{array}, \quad (3.3)$$

де q_{in} – вектор, який має вигляд:

$$q_{in} = \{L_{in}, T_{in}, N_{in}, T_{in}^{entry}, T_{in}^{exit}\}, \quad (3.4)$$

де L_{in} – відстань між i – ою лісистією ділянкою та n – м об'єктом впливу;

T_{in} – час руху динамічного об'єкту між i – ою лісистією ділянкою та

n – м об'єктом впливу;

$$N_{in} = \langle l_{ij} \rangle, N_{in} \subseteq L(\Pi), j = [1, J] \quad \text{– множина ребер (відкритих ділянок)}$$

на маршруті руху динамічного об'єкту до об'єкту впливу;

$$T_{in}^{entry}(l_{ij}) = \langle t_j^{entry} \rangle \quad \text{– множина значень часу входу на відкриті ділянки}$$

динамічного об'єкту;

$$T_{in}^{exit}(l_{ij}) = \langle t_j^{exit} \rangle \quad \text{– множина часу виходу динамічного об'єкту з}$$

відкритих ділянок.

Матриця (3.3) являє собою сукупність раціональних маршрутів руху динамічного об'єкту з вихідної точки до кожного можливого об'єкту впливу.

З цієї матриці для подальших розрахунків приймається множина всіх відкритих ділянок на маршрутах руху динамічних об'єктів до всіх об'єктів впливу

3.1.2.2 Автоматизований вибір маршруту польоту безпілотного літального апарату для виявлення динамічного об'єкту

Таким чином, відібравши за критерієм (2.2) сімейство раціональних варіантів маршрутів руху динамічного об'єкту до об'єктів впливу, можна скласти множину відкритих ділянок місцевості (Q_{TG}), на яких доцільно вести пошук динамічних об'єктів.

Алгоритм планування пошуку за допомогою БПЛА доцільно виконувати в два етапи:

а) побудова множини можливих маршрутів ведення моніторингу з необхідною умовою обльоту всіх відкритих ділянок, а саме у час перебування динамічного об'єкту на відкритих ділянках;

б) вибір одного з раціональних маршрутів польоту БПЛА з максимальним показником ефективності виявлення об'єкту.

Складена множина відкритих ділянок місцевості описується графом

$G=(Q, E)$, де $Q \subset Q_{TG}$ – множина вершин графа, що відповідає множині можливих відкритих ділянок місцевості на маршрутах руху динамічних об’єктів, а E – множина дуг графа, що описуються відстанню між ділянками і часом польоту БПЛА між ними.

Мінімально t_{mn}^{\min} і максимально t_{mn}^{\max} можливий час польоту БПЛА від однієї обраної ділянки пошуку до наступної залежить від ТТХ БПЛА:

$$t_{mn}^{\max} = \frac{L_{mn}}{V_{UAV}^{\min}}; t_{mn}^{\min} = \frac{L_{mn}}{V_{UAV}^{\max}}. \quad (3.5)$$

Суть сортування матриці полягає у розстановці її елементів матриці в рядках і стовпцях у певному порядку. Згідно з ним, зростання номерів рядків і стовпців матриці відповідає росту часу виходу динамічного об’єкту на середину кожної ділянки. Після цього формально можна стверджувати, що в рядках уже побудовані можливі варіанти польоту БПЛА.

При цьому утвориться (таблиця 3.1) матриця досяжності [55] (множина) можливих маршрутів польоту БПЛА, в якій поки не враховуються умови часового узгодження подій “прильоту БПЛА і приходу динамічного об’єкту”. Отже, просторові параметри між ділянками пошуку (вершинами графа) створюють різні умови ведення моніторингу (не завжди БПЛА над ділянкою знаходиться саме в той час, коли на нього передбачається вихід динамічного об’єкту). Тому для оцінки ступеня збігу цих подій відповідно до алгоритму проводиться аналіз усіх рядків і стовпців даної матриці.

Таблиця 3.1 – Результат сортування матриці маршрутів польоту безпілотного літального апарату

	1	2	...	n	...	N	$\Delta P_{раз_s}$
1	0	ΔP_{12}	...	ΔP_{1n}	...	ΔP_{1N}	ΔP_1
2	<0	0	...	ΔP_{2n}	...	ΔP_{2N}	ΔP_2
...	<0	<0	0	ΔP_{3n}	...	ΔP_{3N}	ΔP_3

n	<0	<0	<0	0	...	ΔP_{nN}	ΔP_n
...	<0	<0	<0	<0	0
N	<0	<0	<0	<0	<0	0	0

Елементами матриці є вектор який містить часові показники:

$$\begin{aligned}\Delta t_{(n-1)n} &= m_{t_n} - m_{t_(n-1)} > 0; \\ \Delta t_{n(n-1)} &= m_{t_(n-1)} - m_{t_n} < 0;\end{aligned}\tag{3.6}$$

Частина елементів матриці (затінена частина таблиці 3.1) мають негативні значення різниці очікуваного часу виходу динамічного об'єкту на середину розглянутих ділянок (через принцип сортування) і тому з аналізу виключаються.

Друга симетрична частина матриці включає елементи з позитивними параметрами, які можна використовувати при плануванні маршруту пошуку динамічного об'єкту. При цьому перевіряється кілька умов, одну з яких доцільно записати у вигляді:

$$t_{mn}^{\min} - \sigma_{t_n} \leq m_{t_n} - m_{t_m} \leq t_{mn}^{\max} + \sigma_{t_m}.\tag{3.7}$$

Умова (3.7) дозволяє оцінити відповідність ТТХ БПЛА і вимог щодо прибуття динамічного об'єкту в середину наступної обраної ділянки. По мірі віддалення від першої ділянки умова (3.7) буде менш критичною через збільшення дисперсії. Тому більш важливими для аналізу є початкові ділянки ведення пошуку.

Якщо наступна ділянка в матриці 3.1 відповідає умові (3.7), то вона включається до складу маршруту польоту БПЛА. Для нього розраховуються необхідні швидкість і час польоту з таким розрахунком, щоб приліт БПЛА і вихід динамічного об'єкту на середину ділянки були синхронізовані у часі.

Для розрахунку імовірності події одночасної присутності БПЛА і динамічного об'єкту на ділянці пошуку необхідно розрахувати час вльоту БПЛА у відкриту ділянку і вильоту з неї:

$$t_{enter_n} = m_{t_n} - \frac{L_n}{2V_{UAV}^{min}}; \quad t_{depart_n} = m_{t_n} + \frac{L_n}{2V_{UAV}^{min}}; \quad (3.8)$$

де L_n – довжина n -ої ділянки польоту БПЛА для пошуку.

Тоді ймовірність виявлення динамічного об'єкту на даній ділянці ΔP_{recon_n} можна знайти з використанням табличних значень інтеграла імовірності [40]

$$\Delta P_{recon_n} = \left| F \left(\frac{t_{enter_n} - m_{t_n}}{\sigma_{t_n}} \right) - F \left(\frac{t_{depart_n} - m_{t_n}}{\sigma_{t_n}} \right) \right|. \quad (3.9)$$

При досягненні кінця рядка матриці сформований маршрут включається до множини можливих маршрутів пошуку.

Для формування інших маршрутів пошуку необхідно починати моніторинг не з першої, а з наступної ділянки. Для цього аналізується комплектування маршруту пошуку ділянками по інших рядках матриці (табл. 3.1). Аналіз усіх можливих маршрутів пошуку закінчується після перегляду всіх рядків і стовпців матриці.

3.1.3 Схема застосування методу автоматизованого планування маршруту польоту безпілотної літального апарату для пошуку динамічного об'єкту

Удосконалений метод автоматизованого планування раціонального маршруту польоту БПЛА для ведення пошуку динамічного об'єкту допускає

формалізацію процесів прийняття рішення і враховує показники і критерії ефективності ведення пошуку (рисунок 3.1).

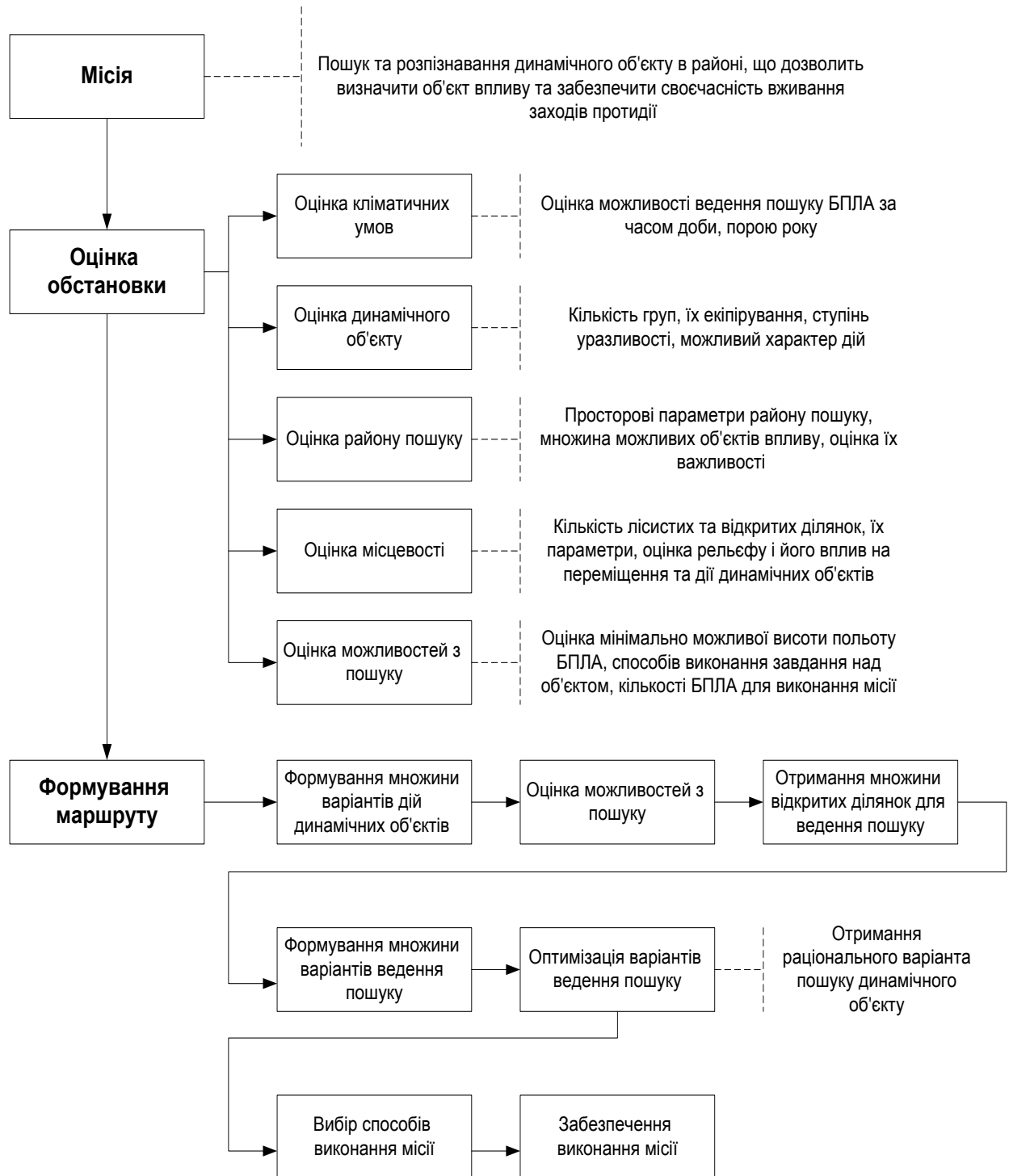


Рисунок 3.1 – Загальна схема застосування методу автоматизованого планування маршруту польоту безпілотної літальної апаратури для пошуку динамічного об'єкту

Використаний у методі підхід допускає порівняння між собою кожної (кінцевої) множини варіантів ведення моніторингу динамічних об'єктів на маршрутах їх руху і вибір з них кращого. Цільовою функцією за якою оцінюється кожне рішення щодо включення в маршрут польоту БПЛА кожної відкритої ділянки, є щільність розподілу імовірності часу виходу динамічного об'єкту на неї в кожному маршруті руху такого об'єкту.

Функції щільності розподілу випадкової величини часу виходу динамічного об'єкту на кожну з відкритих ділянок одного з конкретних маршрутів, що розглядалися при проведенні чисельного експерименту, відповідають нормальним. Оскільки кількість раціональних маршрутів руху динамічних об'єктів визначається кількістю об'єктів впливу, то матриця (таблиця 3.1) містить множину варіантів маршрутів польоту БПЛА, елементи якого будуть упорядкованими за часом виходу динамічного об'єкту на відкриті ділянки. По мірі віддалення від вихідної точки руху динамічного об'єкту для маршруту отримана шукана ймовірність виявлення динамічного об'єкту в інтервалі часу перебування БПЛА над відкритою ділянкою буде зменшуватися, на що додатково буде впливати і тривалість інтервалу пошуку (рисунок 3.2).

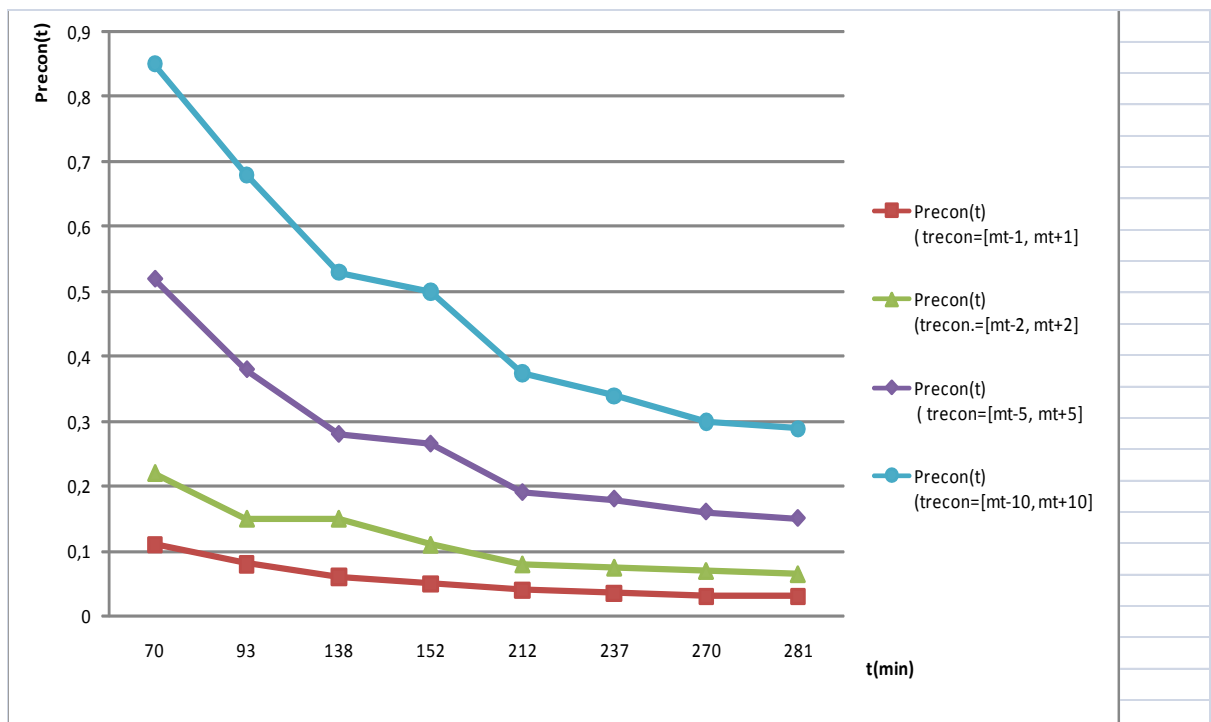


Рисунок 3.2 – Результати розрахунку імовірності знаходження динамічного об'єкту на ділянках маршруту по мірі їх видалення від вихідної точки до об'єкту впливу і залежно від обраного інтервалу часу пошуку

За ймовірністю виявлення динамічного об'єкту на всьому маршруті польоту БПЛА відбирається варіант із великим значенням показника. Отримане сумарне значення імовірності характеризуватиме математичне сподівання кількості виявлень динамічного об'єкту на всьому маршруті польоту БПЛА.

Метод прийняття рішення на ведення пошуку за участю БПЛА дозволяє відібрати один варіант маршруту, що і складе основу плану.

Існуючий метод обґрунтування раціонального маршруту ведення пошуку динамічних об'єктів з застосуванням БПЛА у лісостеповій місцевості не має кількісної оцінки через те, що:

- реалізується принцип “вільного полювання” із задачею знайти, якщо зустрінеться динамічна група;

- виявлення динамічних об'єктів у лісостеповій місцевості визначеної площі не дозволяє вибрати інший показник ефективності, крім як співвідношення площі, на якій знаходиться об'єкт, до загальної площі моніторингу.

Такий підхід до оцінки ефективності за існуючим методом на прикладах завдань планування виявлення динамічних об'єктів в лісостеповій місцевості дає значення показника ефективності близько 1%.

За допомогою розробленого методу розраховано математичне сподівання кількості виявлень динамічного об'єкту на 56 відкритих ділянках раціонального маршруту польоту БПЛА на місцевості площею 10000 км² із 18 можливими об'єктами впливу. Воно складає 31.

3.2 Метод автоматизованого планування маршруту польоту безпілотного літального апарату для пошуку стаціонарних об'єктів

3.2.1 Обґрунтування структури методу автоматизованого планування маршруту польоту безпілотного літального апарату для пошуку стаціонарних об'єктів

Вихідні дані, що використовуються для планування маршруту польоту БПЛА для пошуку стаціонарних об'єктів, поділяється на інформацію про цільову ситуацію і дані про характеристики БПЛА. Цільова ситуація задається за допомогою інформації про місце розташування точок, які треба зв'язати маршрутом, і додаткові характеристики зони польоту (метеорологічні умови, заборонені зони тощо). До опису цільової ситуації входить інша додаткова інформація обумовлена специфікою розглянутої задачі маршрутизації.

Це, зокрема, повинна бути інформація про пріоритети маршрутних точок (їх вагу), обов'язкові точки маршруту, а також дані про точки початку (старту), а за потреби, закінчення (фінішу) маршруту (при побудові розімкнених маршрутів).

Під характеристиками БПЛА в даному випадку розуміється його повітряна швидкість при маршрутному польоті і допустима тривалість польоту. Результати рішення задачі маршрутизації являють собою послідовність обльоту всіх або частини точок для максимізації функції вигляду (2.13).

Дані, які використовуються для рішення задачі автоматизованого планування маршруту БПЛА для пошуку (підтвердження) стаціонарних об'єктів, схематично наведені на рисунку 3.3. В цілому, така постановка відповідає дослідженню, проведеному в роботах [107], [115] за виключенням визначення координат прогнозних точок та методу визначення ваги (пріоритету) точок маршруту, що в даних роботах відсутнє.

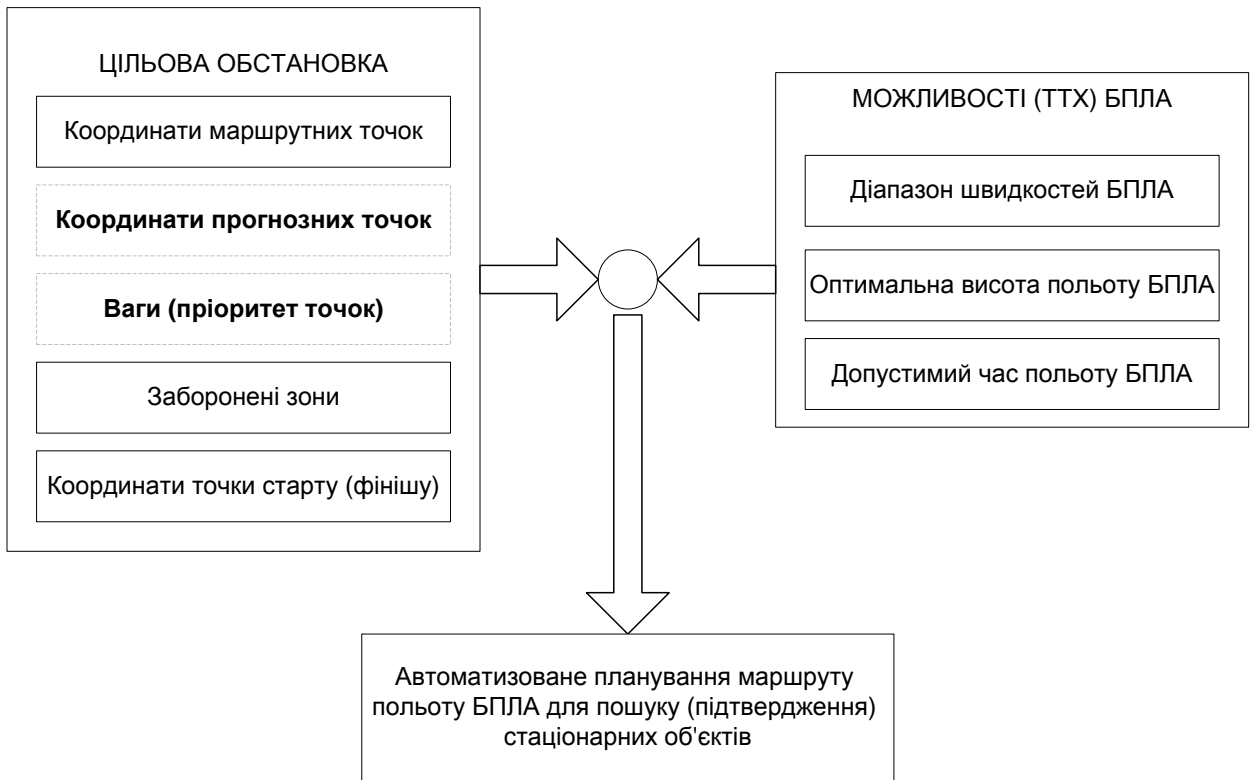


Рисунок 3.3 – Дані для автоматизованого планування маршруту польоту безпілотної літальної апарату для пошуку (підтвердження) стаціонарних об'єктів

Таким чином, удосконалений метод автоматизованого планування маршруту польоту БПЛА повинен включати методи визначення пріоритетності точок, розрахунку координат прогнозних точок та спиратися на відомі методи побудови маршрутів (евристичні методи оптимізації, метод булевої оптимізації, метод динамічного програмування) [29], [30], [31], [33], [107], [115].

3.2.2 Зміст методу автоматизованого планування маршруту польоту безпілотного літального апарату для пошуку стаціонарних об'єктів

Приймаючи гіпотезу про раціональність побудови системи стаціонарних об'єктів протилежної сторони (в умовах протиборства) задачу отримання прогнозних точок можна розв'язати шляхом пошуку точок стійкості складної системи стаціонарних об'єктів пошуку [116], [117].

3.2.2.1 Метод аналізу стійкості системи стаціонарних об'єктів пошуку

Структура складної зв'язаної системи управління являє собою жорстку ієрархічну конструкцію, яка дозволяє зовнішньому впливу розповсюджуватися по всій структурі системи. При цьому імпульс впливу зменшує як показник надійності окремих елементів системи, так і стійкість всієї системи в загалом. Для побудови математичної моделі використаємо апарат алгебри топології, дискретної математики [73] й теорії графів [29], [30], [31].

Підвищення стійкості систем та надійності їх елементів неможливе шляхом дублювання всіх елементів системи. Тому дослідимо реакцію системи на зовнішні впливи, знайдемо найбільш уразливі елементи системи та запропонуємо рекомендації щодо додаткового пошуку. Для цього визначимо точний метод формального подання системи, зовнішнього впливу та динаміки його поширення по складній системі.

Поширення впливу від одного елемента системи до іншого на графі системи задамо орієнтованим ребром, який не матиме петель.

Надійністю елемента системи будемо вважати ймовірність $P(t < T)$ того, що елемент системи буде виконувати свої функції протягом часу T з початку зовнішнього впливу. Але врахування лише надійності елементів системи у

вигляді вагових коефіцієнтів недостатньо для повного формального подання системи. Вплив при проходженні від одного елемента до іншого втрачає свою силу. Надійність елемента системи та долю зменшення впливу при переході від одного елемента до іншого можна одержати експериментально або при експертному аналізі. Таким чином, на орієнтованому графі $G = (V, E)$ системи для вершини $v_i \in V, i \in \{1, 2, \dots, n\}$ вагою $w_i(t) = P_{v_i}(t < T)$ є величина надійності елемента складної системи стаціонарних об'єктів пошуку, що відповідає вершині v_i . Вагою $w(v_i, v_j) = \varepsilon_{ij}$, де $j \in \{1, 2, \dots, n\}, i \neq j$, дуги $(v_i, v_j) \in E$ є число $0 < \varepsilon_{ij} \leq 1$, що дорівнює долі впливу, який передається по структурі системи при переході від вершини v_i до вершини v_j .

Процес зміни ваги вершин графа системи опишемо за допомогою імпульсної дії $\text{imp}_j(t), j \in \{1, 2, \dots, n\}$ в дискретному часі $t > 0$

$$\text{imp}_j(t) = \frac{w_j(t)}{w_j(t-1)}. \quad (3.10)$$

Тоді для j -ої вершини графа G визначимо імпульсну дію як

$$w_j(t+1) = w_j(t) \prod_{i=1}^{\text{deg } v_j} \varepsilon_{ij} \text{imp}_j(t) \quad (3.11)$$

або

$$w_j(t+1) = w_j(t) \prod_{i=1}^{\text{deg } v_j} (1 - \varepsilon_{ij} \text{imp}_j(t)), \quad (3.12)$$

де $\text{deg } v_j$ – кількість ребер, що входять до вершини v_j .

Формули (3.10) – (3.12) задають зміни ваги вершин графу $G = (V, E)$, визначаючи динаміку розповсюдження зовнішніх впливів по системі.

Формула (3.11) відповідає зростаючим імпульсним впливам при переході від вершини до вершини в структурі системи, а формула (3.12) – загасаючим впливам, що зменшуються при переході від однієї вершини до іншої. Дана модель є відомою для технічних систем [117].

Розширимо дану модель на величину компенсації впливу системи. Компенсатором $r_{ij}(w_j(t))$, де $j \in \{1, 2, \dots, n\}$, $i \neq j$, дуги $(v_i, v_j) \in E$ є число $0 < r_{ij} \leq 1$, що дорівнює долі впливу, який компенсується вершиною v_j в структурі системи при переході від вершини v_i до вершини v_j . У випадку, коли компенсатор r_{ij} більший за вагу ребра ε_{ij} , вважається, що вага вершини не змінюється.

В загальному випадку для складної системи стаціонарних об'єктів пошуку впливи можуть розділятися за типами, що породжує матрицю імпульсної дії вигляду:

$$I = \text{imp}_{jk}(t), \quad j \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad k \in \{1, 2, \dots, m\}, \quad (3.13)$$

де m – кількість типів впливів.

Тоді формули (3.11), (3.12) можна переписати у вигляді:

$$w_j(t+1) = w_j(t) \sum_{k=1}^K \prod_{i=1}^{\text{deg } v_j} (\varepsilon_{ijk} - r_{ijk}) \cdot \text{imp}_{jk}(t). \quad (3.14)$$

або

$$w_j(t+1) = w_j(t) \sum_{k=1}^K \prod_{i=1}^{\text{deg } v_j} (1 - (\varepsilon_{ijk} - r_{ijk}) \cdot \text{imp}_{jk}(t)) \quad (3.15)$$

Складна організаційно-технічна система (СОТС), на відміну від технічної, після завершення впливу починає відновлюватися. Процес відновлення вершини v_i графу $G = (V, E)$ системи полягає у поверненні її ваги

$$w_i^k = f(w_i(t_0), k, t_0, t_1), \quad (3.16)$$

де t_0 – час початку відновлення вершини;

t_1 – час завершення відновлення вершини (проміжок часу між t_0 та t_1 є часом відновлення);

$w_i(t_0)$ – вага вершини w_i на початку відновлення;

k – тип впливу;

f – функціонал, що поєднує дані змінні.

Відновлення може відбутися до повного або часткового повернення ваги вершини.

Модель впливу на складну систему представимо у вигляді векторів (матриць):

– вектору початкових значень ваги вершин:

$$W(0) = (w_1(0), w_2(0), \dots, w_n(0)); \quad (3.17)$$

– матриці імпульсної дії вигляду (3.6), якщо кожен рядок матриці має тільки одну i -ту, відмінну від одиниці компоненту, то такий вплив є простим з початковою вершиною v_i ;

– трьохмірної матриці передачі впливу по структурі системи:

$$E = \|\varepsilon_{ijk}\|; \quad (3.18)$$

– трьохмірної матриці компенсації впливу:

$$R = \|r_{ijk}\|; \quad (3.19)$$

– матриці функцій відновлення вершин графу вигляду (3.16).

Поширення впливів в системі відповідно до побудованої моделі (3.10)-(3.19) залежить від структури складної системи.

При цьому виникає ряд взаємопов'язаних задач.

По-перше, необхідно з'ясувати, яку частину елементів системи може вразити зовнішній вплив, тобто глибину розповсюдження впливу на структуру системи. При цьому важливо, наскільки буде зменшена вага вершин графа при такому впливі та який час потрібен для відновлення. Задача ускладнюється тим, що глибина поширення впливу залежить безпосередньо від місця вершин, на які вони будуть направлені.

По-друге, у графа складної системи можлива наявність контурів [30]. Будь-який контур у побудованій моделі є контуром позитивного зворотного зв'язку [31]. Тобто зменшення ваги будь-якої вершини контуру графа системи з моделі (3.10) – (3.19) призводить до зменшення ваги всіх елементів контуру. Таке зациклення впливу на систему може привести до втрати елемента з контуру. Більше того, при подібному поширенні впливу по графу системи можлива відмова елементів, що не отримали вплив безпосередньо, але мали низьку початкову вагу.

По-третє, розповсюдження впливу залежить від складності структури системи. Процес зміни ваги кожної вершин графа системи під час впливу можна вважати динамічним. Але тривалість цих змін та процес відновлення залежать від структури системи.

Властивості структури складної системи визначають параметри її стійкості. Якщо структура системи стаціонарних об'єктів пошуку не забезпечує її стійкості, то у відповідності з висунутою гіпотезою про

раціональність дій протилежної сторони, потрібно відшукати прогностичні точки та включити їх до перспективного маршруту пошуку.

У подальшому викладенні матеріалу використаємо визначення понять теорії графів, які наведені в джерелах [21], [29], [30]:

- маршрут, довжина маршруту, крайні точки маршруту, цикл;
- ланцюг, шлях, контур;
- напівмаршрут, напівланцюг, напівшлях, напівконтур.

Орієнтований граф називається сильнозв'язаним, якщо будь-які дві його вершини досяжні одна з одною, слабозв'язаним – якщо дві його вершини з'єднані напівшляхом [30].

Сильнозв'язаною компонентою (бікомпонентом) орієнтованого графу називається його максимальний сильнозв'язаний підграф [29].

Вочевидь, що відношення взаємної досяжності орієнтованого графа G рефлексивно, транзитивно та симетрично [29]. Тому одержимо розбивку множини вершин V на класи, якщо до одного класу включимо вершини, які досяжні одна з одною.

Як підтверджують результати дослідження [30], підграфи, породжені класами даної розбивки, і тільки вони, є сильнозв'язаними компонентами орієнтованого графу G . В орієнтованому графі можуть бути ребра, які не входять до жодної з його сильнозв'язаних компонент. Нехай $\{H_1, H_2, \dots, H_m\}$ – множина всіх сильнозв'язаних компонент орієнтованого графа G . Конденсацією орієнтованого графа G є граф G^* , вершини h_1, h_2, \dots, h_m якого відповідають сильнозв'язаним компонентам орієнтованого графа G , і пара (h_i, h_j) є ребром в G^* тільки тоді, коли в G є ребро, початок якого належить компоненті H_i , а кінець – H_j . На рисунку 3.4 представлені граф G та його конденсація G^* .

Вочевидь, що будь-який контур орієнтованого G входить до однієї з його сильнозв'язаних компонент. Однак тоді конденсація G^* не має контурів а, значить, є безконтурним графом.

Поширюючись за структурою системи, зовнішній вплив, зменшуючи надійність хоча б одного елемента будь-якого контуру графа, зменшить надійності і всіх інших елементів контуру.

Тобто, якщо зовнішній вплив досягнув хоча б однієї з вершин сильнозв'язаної компоненти орієнтованого графа, то він, вочевидь, досягне і всіх інших вершин цієї бікомпоненти. Таким чином, вивчення процесу поширення зовнішнього впливу по структурі системи має сенс звести до дослідження його конденсації. Для Гамільтонових графів [31] даний підхід неможливий.

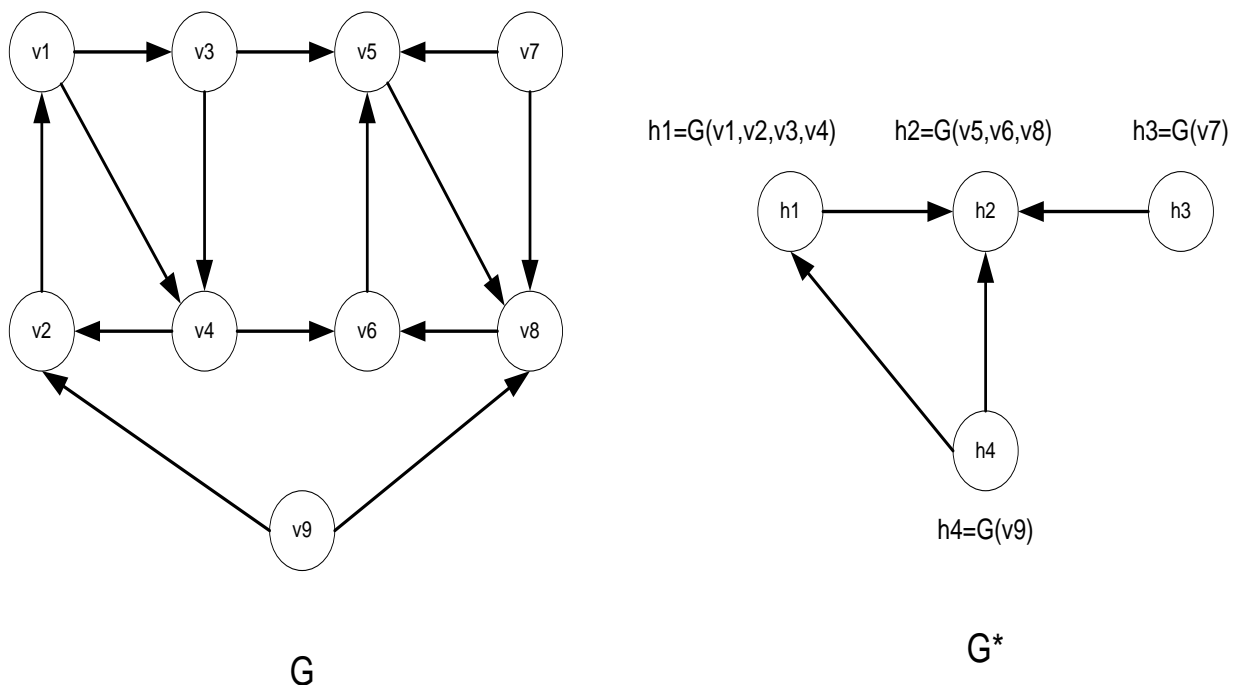


Рисунок 3.4 – Перетворення графа G в його конденсацію G^*

Сильнозв'язні компоненти графа складної системи є особливо слабкими місцями у структурі системи. Як правило, виникає необхідність їх нейтралізації, тобто перетворення структури системи в безконтурний граф. Нейтралізацію контурів, включених у бікомпоненти, можна здійснити, наприклад, зміною напрямків ребер, що входять у вершини графу, якщо таке перетворення (рекомбінація) дозволяє зробити структура системи і особливості її побудови.

Застосування даного підходу веде до пошуку всіх бікомпонент орієнтованого графу G , а як наслідок, і всіх його контурів, що здійснюється шляхом побудови конденсації G^* . Тобто протилежна сторона, створюючи систему стаціонарних об'єктів, буде намагатися уникнути наявності сильнозв'язаних компонент. Алгоритми пошуку бікомпонент на графі є відомими та досить детально розкриті в роботах [31].

Розглянемо конденсацію графа СОТС та простий вплив на нього. Оскільки вплив в даному випадку досягає всіх вершин системи, то міра того, наскільки зміниться надійність конкретного елемента, залежить від кількості базових шляхів, яким він належить, або, точніше, від кількості шляхів, кінцем яких він є.

Структурною вразливістю $vl(u)$ вершини $u \in V^*$ є кількість шляхів, кінцем яких є вершина u . Для розрахунку структурної вразливості вершини $u \in V^*$ графа G^* достатньо визначити множину U вершин, з яких досягається вершина u , та визначити кількість всіх не співпадаючих один з одним (u, v) шляхів для кожної вершини $v \in U$.

Множину U назвемо множиною вразливості вершини u . Вочевидь, що в утворенні всіх напівбазових шляхів вершини $u \in V^*$ приймають участь тільки вершини її множини вразливості U , яку на графі G^* можна отримати за допомогою наступного алгоритму.

На нульовому кроці вибирається вихідна вершина u , структурну вразливість якої потрібно обчислити.

На першому кроці помічаються всі ребра, які входять до вершини u , та вершини $u_{1,1}, u_{1,2}, \dots, u_{1,s_1}$, з яких вони виходять. В індексному позначенні послідовності $s_1 \geq 1$ – напівступінь заходу вершини u . Вершини u та $u_{1,1}, u_{1,2}, \dots, u_{1,s_1}$ об'єднуємо до множини U .

На наступних кроках (від 2-го до ℓ -го) таку операцію потрібно провести з кожною виділеною на попередніх етапах вершиною

$u_{i-1,1}, u_{i-1,2}, \dots, u_{i-1,s_1}$, ($i = 2, 3, \dots, I$), а виділені на поточному етапі вершини $u_{i,1}, u_{i,2}, \dots, u_{i,s_1}$ помічаються та додаються до множини U . На кожному етапі виділяти треба лише непомічені раніше вершини.

Алгоритм продовжується до тих пір, поки у помічених вершин напівступень відрізняється від нуля.

У даному алгоритмі кожна вершина, виділена на етапі $i-1$, досягається хоча б з однієї вершини, що виділена на наступному етапі. В іншому випадку дана вершина мала б нульову напівступень заходу. Також слід відмітити, що для вершини $u \in V^*$ графа $G^* = (V^*, G^*)$ її множина вразливості U може співпадати з множиною вершин V^* графа G^* .

Структурна вразливість елемента дає якісну оцінку його розташуванню в структурі системи. Структурна вразливість дозволяє зробити висновок про те, наскільки безпечно розташування елемента в структурі системи щодо інших елементів у період впливів на систему.

Ціль дослідження конденсації графа системи – дати поверхневу, наближену оцінку стійкості системи, необхідну на первинному етапі аналізу системи стаціонарних об'єктів противника в цілому та її структури, зокрема. Дослідження конденсації графа й підрахунок його структурних параметрів має сенс тільки тоді, коли конденсація – нетривіальний граф, тобто не вироджується в одну вершину при її побудові.

Для прогнозування нових вершин у структурі системи, тобто зміни порядку зв'язків серед елементів системи, з метою реалізації гіпотези про апріорну стійкість системи або поліпшення значення деяких зі структурних параметрів системи потрібно більш детальне вивчення структури системи.

У цьому випадку об'єктом дослідження повинен бути сам граф системи, а не його конденсація. Основна відмінність між графом і його конденсацією полягає в наявності у першого контурів зворотного зв'язку. Контури графа системи належать винятково його бікомпонентам і стягуються у деякі вершини його конденсації.

Вершини конденсації, отримані стягуванням бікомпонент графа системи, будемо називати стягнутими, а всі інші вершини конденсації, відповідно, – нестягнутими. Конденсація, залежно від числа бікомпонент свого графа, може здобувати різний вид. Конденсація графа взагалі може не містити вершин, що не стягуються. Вочевидь, значення структурних параметрів вершин графа і його конденсації відрізняються один від одного.

І те, наскільки вони відрізняються один від одного залежить, у першу чергу, від кількості і розміру контурів у структурі системи. Імпульсний вплив на будь-яку вершину контуру позитивного зворотного зв'язку призводить до зниження надійності елемента цього контуру до критичного рівня, і як наслідок, і до переходу в граничний стан [116]. За цієї причини контури в структурі системи мають негативний вплив на стійкість всієї системи. Схема методу дослідження стійкості системи стаціонарних об'єктів пошуку складається з послідовності етапів та приведена на рисунку 3.5.

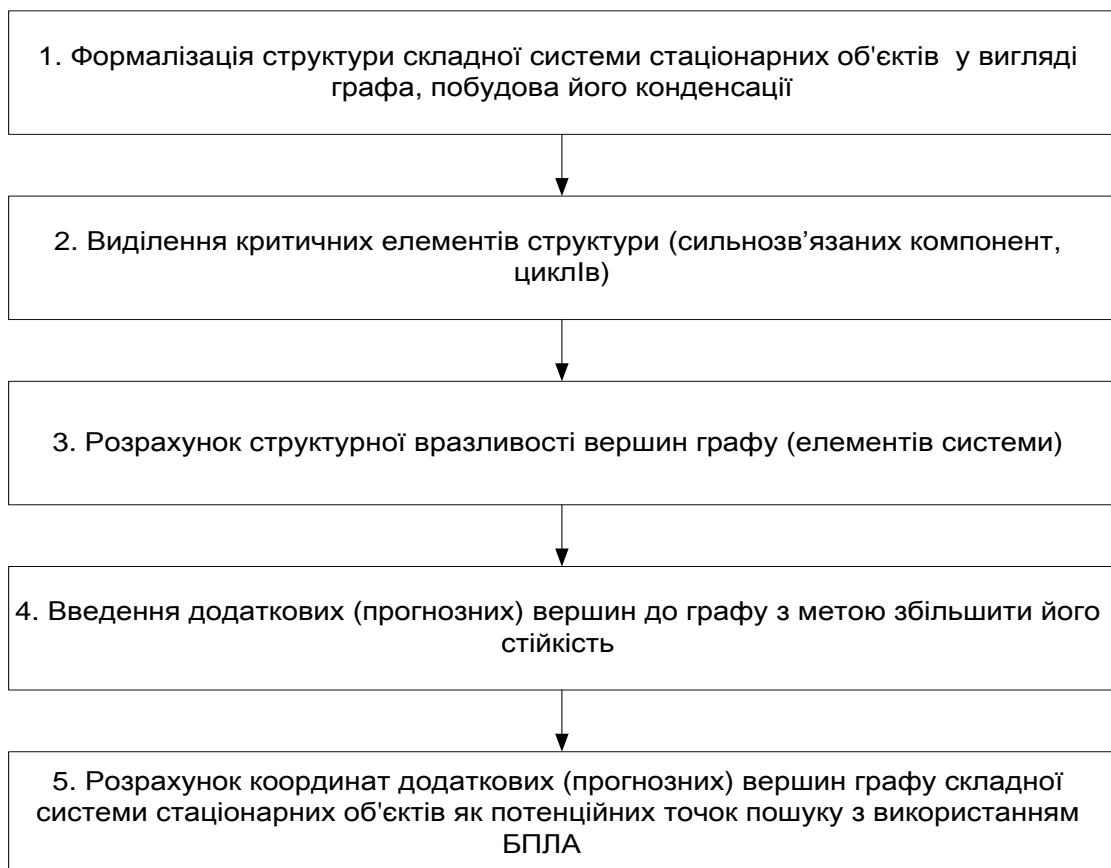


Рисунок 3.5 – Послідовність етапів дослідження стійкості складної системи стаціонарних об'єктів для визначення прогнозних точок пошуку

Таким чином, формалізація та автоматизація даного методу дозволяє отримати прогностні точки складної системи стаціонарних об'єктів та спланувати маршрут для їх пошуку.

3.2.2.2 Метод визначення ваги елементів системи стаціонарних об'єктів пошуку

Відомі традиційні підходи (теорія графів, кластерний аналіз, опис систем у просторі станів тощо), які дозволяють аналізувати структури складних систем. Використання апарату алгебраїчної топології (поліедрального аналізу) і бінарних відношень дозволяє аналізувати та прогнозувати поведінку структури системи об'єктів як складного багатомірного геометричного утворення – симпліціального комплексу.

Основною метою поліедрального аналізу є розгляд структури складної системи у вигляді відношень між елементами кінцевих множин.

Структура системи використовується для одержання геометричного та алгебраїчного подань системи як симпліціального комплексу, що складається з множин вершин, і заданого сімейства непустих підмножин цих вершин – симплексів.

Інакше кажучи, будь-яке відношення задає на множині вершин сукупність підмножин, які перетинаються. Кожна з них трактується як геометричний симплекс, а вся сукупність таких симплексів утворює симпліціальний комплекс. Даний підхід до опису структури складної системи дозволяє по іншому підійти до рішення питань, пов'язаних з вивченням складності структури системи, структури її підсистем, їх ролі та способу взаємодії в динаміці функціонування.

В основі симпліціального подання лежить структура досліджуваної системи стаціонарних об'єктів пошуку. Для коректного переходу від структури складної системи до її симпліціального подання необхідно задати множину вершин симпліціального комплексу та визначити деяке правило.

Відповідно до нього вихідна множина вершин буде розбита на множину непустих підмножин, які перетинаються – симплексів.

Характер відношення між елементами складної системи стаціонарних об'єктів пошуку визначається її завданням. Це може бути як розмірні фізичні величини (відстань, час, рубежі досяжності і т.п.), так і умовні величини (ступінь впливу на досягнення кінцевої мети функціонування системи, вплив на стійкість функціонування системи).

Процедура побудови моделі системи полягає у виборі двох скінчених множин X та Y , елементи яких зв'язані деяким відношенням зі складною системою стаціонарних об'єктів. Взаємний зв'язок елементів системи представляється у вигляді відношень між елементами множин X та Y . Кожне відношення між X та Y є підмножиною декартового добутку $X \times Y$, ($\lambda \in X \times Y$). Відношення зручно представляти матрицею інцидентності [30]:

$$\Lambda = [\lambda_{ij}], \quad (3.20)$$

де $\lambda_{ij} = 1$, якщо $(x_i, y_j) \in \lambda$ та $\lambda_{ij} = 0$ в іншому випадку.

При переході від структури відношення до симпліціального комплексу за множину Y комплексу вибирається множина вершин системи, а кожному елементу множини X ставиться у відповідність один з симплексів системи. Кожен симплекс $S_p \in K$, де K – комплекс, що однозначно визначається підмножиною з $(p+1)$ різних $\gamma_j \in Y$.

Будь-яка підмножина симплекса s визначається $(q+1)$ елементами множини Y , де $q \leq p$, що називається його q -гранями та утворюють новий симплекс. Кількість елементів в деякій підмножині Y , що утворює симплекс s , позначається $\text{card}(s)$ та визначається числом вершин даного симплексу. Таким чином, кожне відношення λ породжує симпліціальний комплекс, який позначається як $K_X(Y, \lambda)$. Саме він та його геометрична реалізація описує структуру відношення λ . Якщо змінити ролі множин X та Y , тобто вважати,

що X представляє собою множину вершин, то λ^* породжує спряжений комплекс $K_X(Y, \lambda^*)$, який складається із симплексів $\{\gamma_j\}$. Матриця інцидентності для λ^* отримується транспонуванням матриці Λ . Тому з кожним відношенням пов'язані два симпліціальні комплекси.

Як приклад, що реалізує даний підхід, побудуємо симпліціальну модель системи стаціонарних об'єктів пошуку, структура якої наведена на рисунку 3.6.

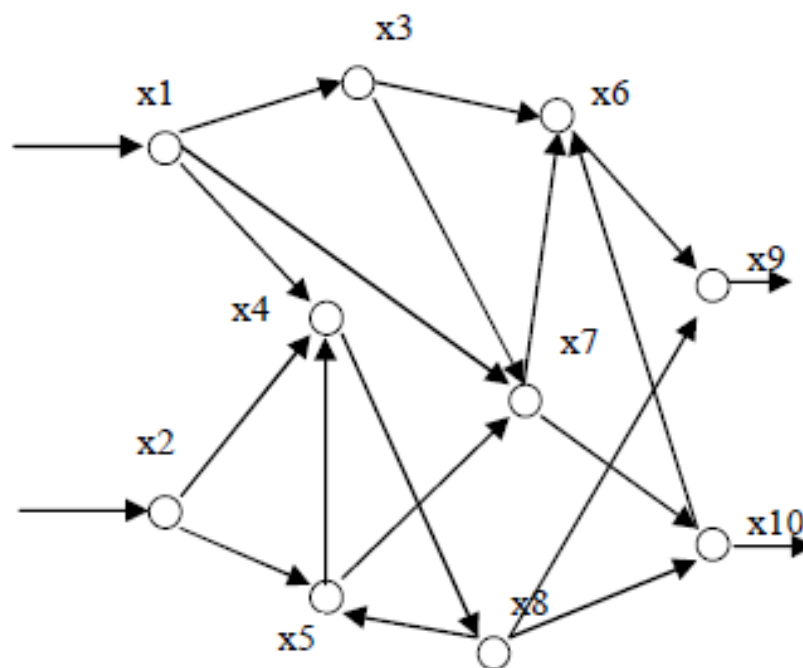


Рисунок 3.6 – Графова структура системи стаціонарних об'єктів пошуку

Стрілками позначені можливі напрямки взаємодії одних елементів з іншими. Наявність вхідних стрілок до вузлів x_1 та x_2 , а також вихідних стрілок з вузлів x_9 та x_{10} свідчить, що дана система є елементом надсистеми, з якою теж встановлюється взаємодія.

Нехай λ визначається відношенням “на об'єкт впливає зв'язаний з ним елемент”. Тоді λ^* буде відповідати першому з відношень.

Множина Y задається на множині вузлів:

$$\lambda = \{x_1, x_2, \dots, x_{10}\}. \quad (3.21)$$

Множині X буде відповідати множина симплексів, кожен з яких описує конкретний вузол структури з позиції вузлів системи, що знаходяться з ними в заданому відношенні λ . Можна записати, що:

$$s(x_i) = \{x_j \in Y : (x_i, x_j) \in \lambda\}. \quad (3.22)$$

Для прикладу, наведеного на рисунку 3.6, та обраного відношення λ маємо таку множину симплексів:

$$\begin{aligned} s(x_1) &= \{\emptyset\}; & s(x_2) &= \{\emptyset\}; & s(x_3) &= \{x_1\}; & s(x_4) &= \{x_1, x_2, x_5\}; \\ s(x_5) &= \{x_2, x_8\}; & s(x_6) &= \{x_3, x_7, x_{10}\}; & s(x_7) &= \{x_1, x_3, x_5\}; & s(x_8) &= \{x_4\}; \\ s(x_9) &= \{x_6, x_8\}; & s(x_{10}) &= \{x_7, x_8\}. \end{aligned}$$

Набір усіх наведених симплексів задає симпліціальний комплекс $K_X(Y, \lambda)$, що може бути представлений за допомогою матриці інцидентності:

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	
$\sigma(x_3)$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
$\sigma(x_4)$	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	
$\sigma(x_5)$	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	
$K_X(Y, \lambda) = \sigma(x_6)$	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	(3.23)
$\sigma(x_7)$	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	
$\sigma(x_8)$	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
$\sigma(x_9)$	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	
$\sigma(x_{10})$	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	

Для спрощення алгоритму полідрального аналізу в матриці (3.23) пусті симплекси можна не записувати.

Наслідуючи дані принципи, неважко отримати симпліціальні комплекси для відношення λ^* шляхом транспонування матриці (3.23).

Відмітимо, що задачею визначення ваги елемента складної системи стаціонарних об'єктів пошуку є значення окремих елементів системи та їх впливу на стійкість системи в цілому. В симпліціальній моделі кожному вузлу системи ставиться у відповідність симплекс. Він характеризує його з точки зору зв'язку з іншими елементами системи. Це дозволяє вирішувати завдання визначення важливості вузлів як для локальних складних систем, так і для забезпечення стійкості функціонування всієї системи та досягнення нею мети.

Відносну важливість окремого симплекса в комплексі відображає показник ексцентриситету. Він дозволяє оцінити щільність вкладення кожного симплекса до комплексу, тобто характеризує локальні особливості структури [118], [119]:

$$\text{ecc}(s) = \frac{\dim(s) - q'}{q' + 1}, \quad (3.24)$$

де $\dim(s)$ – розмірність комплексу;

q' – найбільше значення q , при якому симплекс стає зв'язаним з будь-яким іншим симплексом комплексу.

Величина $\dim(s) - q'$ є мірою нонконформності симплексу. Ділення на $q' + 1$ дозволяє врахувати відносну частку ексцентриситету, що вноситься незв'язаними вузлами в комплекс. Нульове значення ексцентриситету означає повністю зв'язаний (неексцентричний) симплекс. Ексцентриситет симплекса, не пов'язаний з іншими симплексами, буде наближатися до нескінченності.

Але вираз (3.24) достатньо простий, він не враховує багатьох особливостей симплексів. Перш за все це – кількість симплексів, з якими він здатен встановити зв'язки, і те, яким чином симпліціальні зв'язки розподіляються за рівнями зв'язаності. Це важливо при обґрунтуванні важливості елементу системи стаціонарних об'єктів пошуку. Таким чином:

$$ecc(s^k) = 1 - \frac{\text{card}(s^k) - \text{card}(v^k)}{(n_k + 1) \cdot \text{card}(s^k)}, \quad (3.25)$$

де n_k – кількість симплексів в комплексі, що мають $\text{card}(v^k)$ загальних вершин з симплексом s^k ;

При цьому $\text{card}(v^k) = \max_j \left[\text{card}(s_i^k \cap s_i^j) \right]$ – максимальна кількість загальних вершин k -го симплексу з іншими симплексами, k та j – порядкові номери симплексів, призначені при початковому визначенні множин $k \neq j$.

Формула (3.25) більш повно враховує властивості симплексу. В ній, окрім розмірності симплексів та кількості загальних вершин, присутня кількість симплексів, з якими досліджуваний симплекс здатен встановлювати зв'язок на максимальному рівні зв'язаності.

Значення ексцентриситету знаходиться у діапазоні $[0,1]$, що дозволяє більш чітко класифікувати ступінь вкладеності симплексів до структури комплексу – від незначної до високої.

Отримані в результаті проведеного q -аналізу оцінки та характеристики дозволяють врахувати особливості досліджуваної системи для планування заходів щодо визначення пріоритетів її пошуку.

Таким чином, для визначення важливості стаціонарного об'єкту в складній системі об'єктів пошуку використаємо такі показники:

- а) час останнього підтвердження (t_p);
- б) важливість об'єкту в системі (e);

в) тип об'єкту (“підтверджений”, “прогнозний”).

Показник часу останнього підтвердження перетворимо до нормованого вигляду k_t за допомогою формули:

$$k_t = 1 - e^{-t_p/T}, \quad (3.26)$$

де T – необхідний час підтвердження стану стаціонарного об'єкту.

Наприклад, для значення $T=6$ діб значення показника (3.26) щодобово наведено на рисунку 3.7.

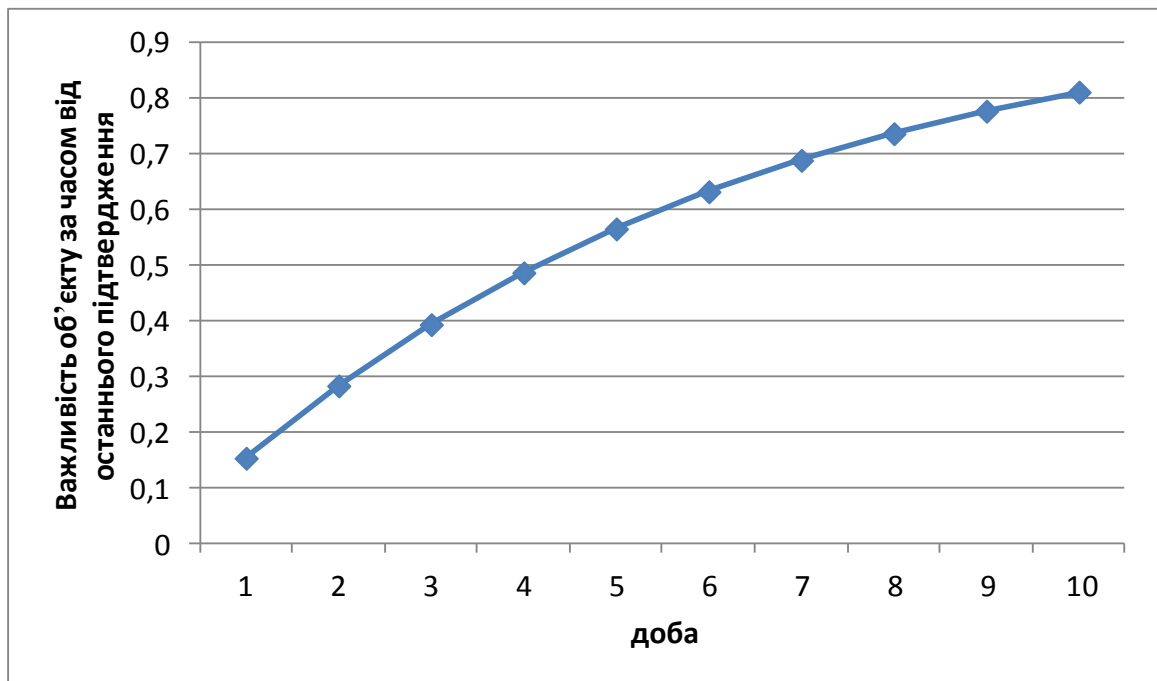


Рисунок 3.7 – Значення показника k_t для кожної доби за умови, що потрібний час підтвердження стану $T = 6$ діб

Для “прогнозного” об'єкту даний коефіцієнт приймається рівним одиниці. Важливість стаціонарного об'єкту в системі визначається коефіцієнтом ексцентриситету k_e , що обчислюється за формулою (3.25). Для “прогнозного” об'єкту даний коефіцієнт також приймається рівним одиниці.

Коефіцієнт типу об'єкту (“підтверджений”, “прогнозний”) k_o приймає значення: 0,5 – для підтверженого об'єкту, 1 – для прогнозного значення.

Адитивна згортка даних коефіцієнтів для визначення важливості i – го стаціонарного об'єкта задається формулою:

$$w_i = a_1 \cdot k_{t_i} + a_2 \cdot k_{e_i} + a_3 \cdot k_{o_i}. \quad (3.26)$$

Значення вагових коефіцієнтів задовольняє умові $a_1 + a_2 + a_3 = 1$. Вибір вагових коефіцієнтів здійснюється користувачем СППР один раз для всієї складної системи стаціонарних об'єктів пошуку. З урахуванням того, що коефіцієнти k_t , k_e та k_o є нормованими, значення ваги стаціонарного об'єкту належить інтервалу $[0;1]$.

Схема методу визначення ваги елементів системи стаціонарних об'єктів пошуку представлена на рисунку 3.8.

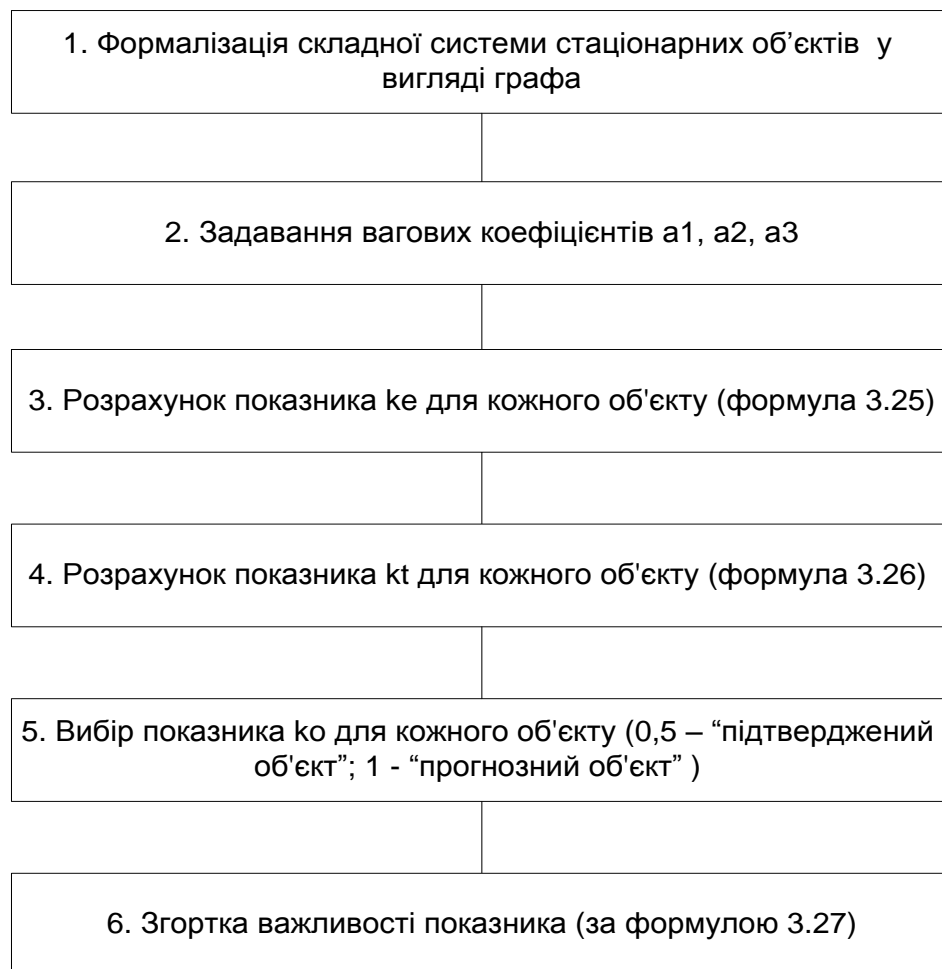


Рисунок 3.8 – Схема методу визначення ваги елементів системи стаціонарних об'єктів пошуку

Таким чином, отримання вагових коефіцієнтів стаціонарних об'єктів дає змогу поставити та вирішити із застосуванням ІТ у складі СППР розширену оптимізаційну задачу комбінаторної оптимізації виду (2.13) з обмеженнями (2.14) – (2.17).

3.2.3 Схема застосування методу автоматизованого планування маршруту польоту безпілотної літальної апарату для пошуку стаціонарних об'єктів

Удосконалений метод автоматизованого планування раціонального маршруту польоту БПЛА для пошуку стаціонарних об'єктів допускає формалізацію процесів прийняття рішення, враховує показники і критерії ефективності ведення пошуку, а також має свій порядок отримання результату (рисунок 3.9). Використаний у методі підхід допускає отримання оптимальних значень цільової функції вигляду (2.13) за умови призначення ваги як відомим, так і прогнозним об'єктам. Прогнозні об'єкти мають більшу вагу, оскільки їх місцезнаходження і тип ще не відомі.

Таким чином, структура методу наведена на рисунку 3.9.

Звертаючись до методів розв'язання оптимізаційної задачі впливу (2.13), можна зробити висновок, що на даний час розроблений достатній науково-методичний апарат розв'язання задач комбінаторної оптимізації [114], [120], [121], що виходить за межі даного дисертаційного дослідження.

Хоча у даних роботах задача планування маршруту інтерпретована як задача комівояжера, що допускає урахування вимоги на безумовний обліт усіх заданих точок. При цьому час польоту розглядається як критерій, що підлягає мінімізації.

Прагнення зменшити час обльоту точок залежить від бажання знизити витрати енергоресурсів і підвищити оперативність доставки цільової інформації. Використання такого критерію є непрямим відображення того, що і запас ресурсів, і час, протягом якого повинна бути доставлена цільова

інформація, фактично обмежені. У цій ситуації становить практичний інтерес розгляд задачі планування маршруту при явному врахуванні обмеження на час польоту за маршрутом.

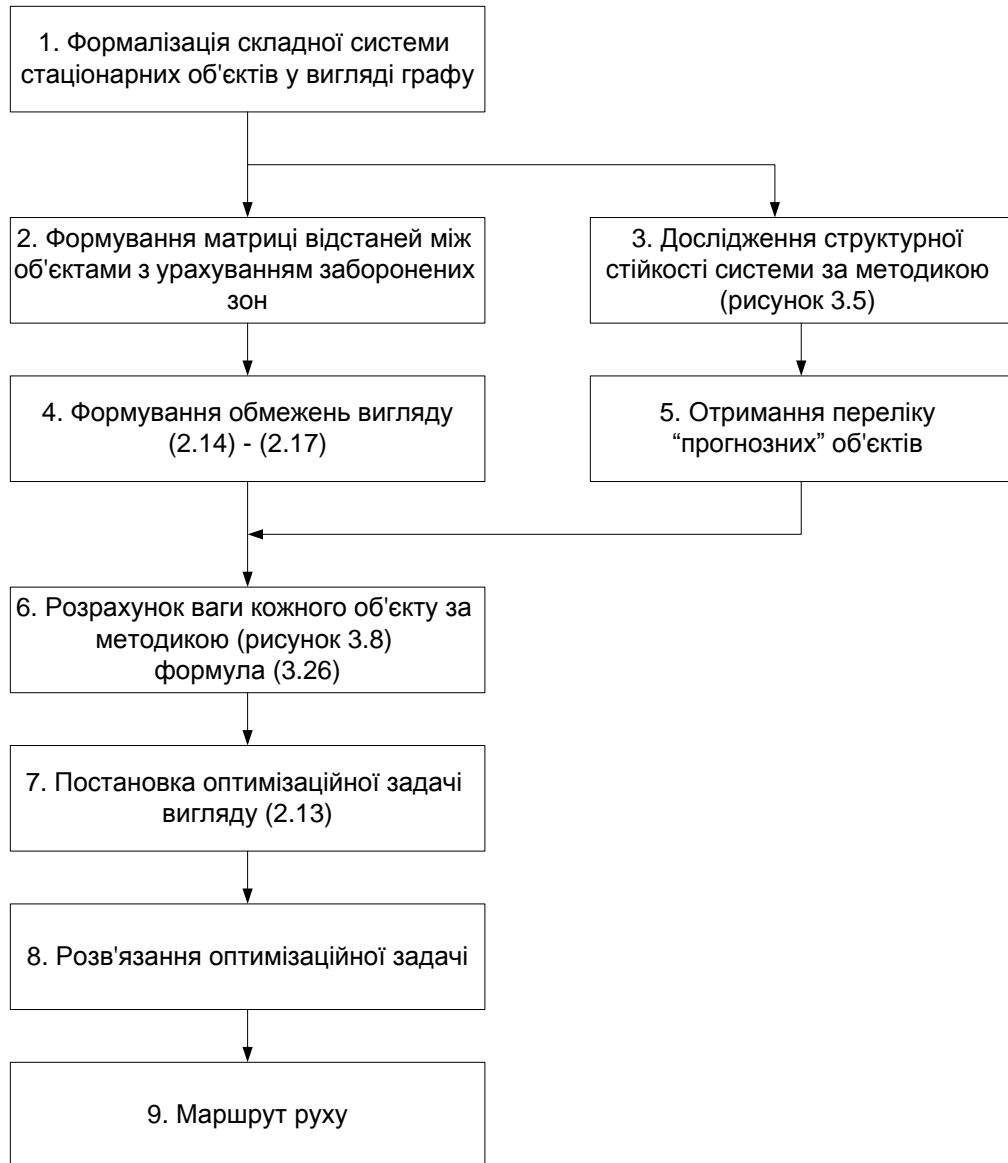


Рисунок 3.9 – Структура методу автоматизованого планування маршруту польоту безпілотної літальної апарату для пошуку стаціонарних об'єктів

У такій постановці цілком можливо, що не всі точки з числа заданих виявляться включеними до оптимального маршруту. Явне врахування

обмеження на час польоту за маршрутом, з погляду математичного трактування задачі планування маршруту, вже не дозволяє говорити про неї як про класичну задачу комівояжера. Така задача формалізується як задача булевого цілочисельного програмування.

Висновки до третього розділу

1. Обґрунтована структура і зміст двох методів автоматизованого формування маршрутів польотів БПЛА для пошуку динамічних і стаціонарних об'єктів.

2. При пошуку динамічних об'єктів існуюча схема планування маршруту польоту БПЛА вимагає змін, оскільки маршрут польоту БПЛА повинен враховувати дії протилежної сторони, допускати застосування прийомів і способів протидії пошуку для прихованого виходу до об'єктів впливу з використанням лісових масивів для маскування. Відмінною рисою вдосконаленого методу автоматизованого планування маршрутів польоту БПЛА для пошуку динамічних об'єктів є необхідність урахування множини варіантів маршрутів руху динамічних об'єктів і множини маршрутів польоту БПЛА. Звідси витікає розв'язання задачі оптимізації варіантів з використанням критеріїв ефективності дій динамічних об'єктів та БПЛА.

3. Вихідні дані, що використовуються для планування маршруту польоту БПЛА для пошуку стаціонарних об'єктів, можна поділити на інформацію про цільову ситуацію і характеристики БПЛА.

4. Удосконалений метод автоматизованого планування маршруту польоту безпілотного літального апарату повинен включати методи визначення пріоритетності точок, розрахунку координат прогнозних точок та спиратися на відомі методи побудови маршрутів (евристичні методи оптимізації, метод булевої оптимізації, метод динамічного програмування).

РОЗДІЛ 4

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПЛАНУВАННЯ ДІЙ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Розроблені в попередніх розділах математичні моделі та методи планування маршрутів польотів БПЛА для пошуку стаціонарних та динамічних об'єктів характеризуються значною обчислювальною складністю. Тому запропонована у рамках СППР інформаційна технологія автоматизованого планування дій безпілотних літальних апаратів під час виконання ними місії ґрунтується на об'єктно-орієнтованому методі проектування. Вона використовує знанняорієнтовані методи розпізнавання образів (знімків) та їх інтелектуальний аналіз, що дозволяє підвищити оперативність та обґрунтованість рішень.

Дана інформаційна технологія є невід'ємною складовою інформаційного забезпечення перспективної СППР планування маршрутів польотів БПЛА. Теоретичною основою розробки інформаційної технології є роботи з об'єктно-орієнтованого проектування складних інформаційних систем [37], [38], [122]. Удосконалення інформаційної технології ґрунтується на роботах [82], [122], [123], [125].

Дослідження, викладені в розділі, опубліковані в роботах [57], [64].

4.1 Обґрунтування складу та призначення інформаційної технології автоматизованого планування дій безпілотних літальних апаратів

Найважливішою функціональною підсистемою розроблюваної СППР є підсистема планування дій БПЛА. Дана підсистема забезпечує максимально можливий рівень автономного виконання поставлених перед БПЛА цільових завдань у невизначених умовах виконання місії.

За своїм призначенням інформаційна технологія планування дій БПЛА повинна вирішувати такі завдання:

а) пошук і розпізнавання (підтвердження) об'єктів, заданих у польотному завданні;

б) планування повторного пошуку і додаткового розпізнавання об'єктів у випадку їх втрати або незадовільної ідентифікації при першому прольоті;

в) перебудова маршруту польоту БПЛА при виявленні нових об'єктів.

Для кожного з цих завдань при розробці бази знань інформаційною технологією виділяються проблемні ситуації (ПрС) та їх ситуаційні вектори (СВ) [82].

При реалізації вказаних завдань БПЛА має враховувати дії протилежної сторони щодо перешкоди виконанню місії або (та) впливу метеорологічних умов. При проектуванні БЗ СППР для кожного з видів дій протилежної сторони формуються відповідні ПрС і СВ, засновані на логіці предикатів.

Для рішення сформульованих вище завдань з максимально можливим рівнем автономності в складі ІТ передбачається система машинного зору, що забезпечує пошук, визначення, розпізнавання та автоматичну ідентифікацію об'єктів пошуку. Система машинного зору повинна включити (залежно від цільового навантаження БПЛА):

а) оптико-електронні та радіолокаційні системи пошуку об'єктів, що складають цільове навантаження БПЛА;

б) програмні комплекси обробки зображень, отримані в ході пошуку цільовим навантаженням БПЛА.

До складу системи ідентифікації протидії БПЛА доцільно включити:

а) датчики, що фіксують факти і вимірюють характеристики застосовуваних засобів противника та їх розпізнавання;

б) програмні засоби обробки результатів вимірів.

Взаємозв'язок інформаційних технологій в єдину знанняорієнтовану систему наведено на рисунку 4.1.



Рисунок 4.1 – Загальна структура знанняорієнтованої системи планування дій безпілотних літальних апаратів

Інформаційна технологія автоматизованого планування дій БПЛА розроблена в вигляді IDEF0-діаграм.

IDEF0-діаграми містять такі елементи:

– прямокутники, що показують функції (процеси обробки інформаційних потоків), що виконуються в процесі застосування інформаційної технології;

– горизонтальні стрілки, що відображають інформаційні потоки, зокрема вхідні та вихідні дані;

– вертикальні стрілки, що направлені зверху вниз, відображають входи керування;

– вертикальні стрілки, що направлені знизу вгору, відображають інструментальні засоби підтримки прийняття рішень, що застосовуються для реалізації інформаційної технології.

На рисунку 4.2 представлена ІТ у вигляді послідовності інформаційних потоків, процесів їх обробки та інструментальних засобів вибору заходів

планування маршрутів.

Далі дано опис елементів ІТ.

Вхідні інформаційні потоки:

- задача (місія) пошуку (підтвердження) об'єктів;
- тип БПЛА, що обраний для виконання місії;



Рисунок 4.2 – Діаграма IDEF0 основного процесу інформаційної технології

Вихідний інформаційний потік:

- уточнений маршрут БПЛА для виконання місії у вигляді просторово-часового графіка.

Процеси оброблення інформаційних потоків (функції) наведено на рисунку 4.3.

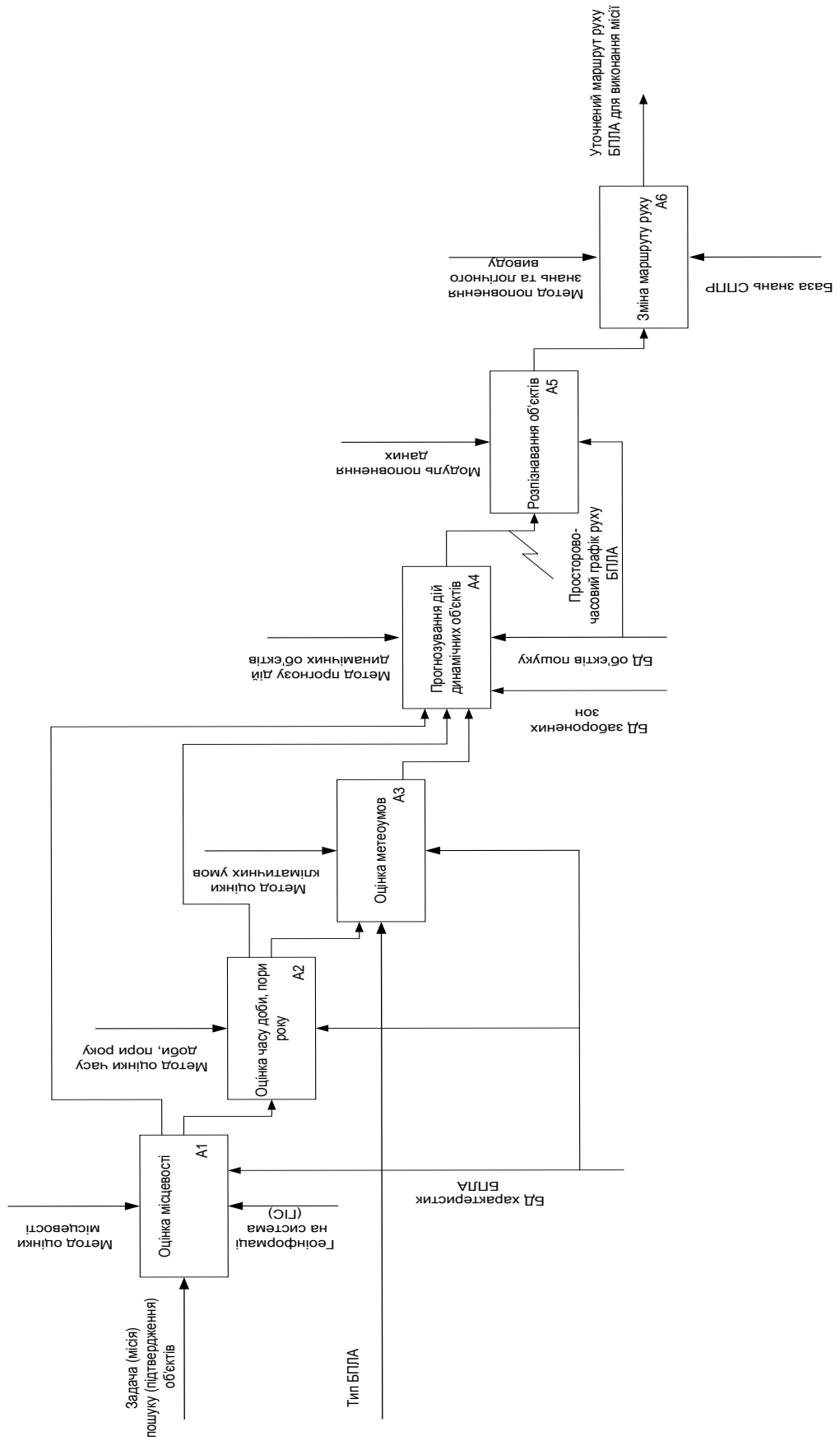


Рисунок 4.3 - Процеси оброблення інформаційних потоків в інформаційній технології

Інструментарієм інформаційної технології є:

- геоінформаційна система;
- база даних характеристик БПЛА;
- база даних заборонених зон;
- база даних об'єктів пошуку;
- база знань СППР.

Рішення в СППР отримується за допомогою спеціальних процедур логічного виведення у БЗ. У ній повинні бути розміщені формалізовані знання, результати роботи обладнання пошуку, типові правила зміни маршруту, пошуку (у т. ч. повторного), рішення завдань переслідування об'єктів з автоматичними перерахунком точок маршруту та зміни польотного завдання. База знань організується як сімейство продукційних правил, що функціонують у складі СППР [126]. При формуванні блоку математичних моделей використовуються результати, отримані в розділі 3 даної роботи.

Розв'язання задач навігації і цілевизначення для пошуку БПЛА зводиться до максимально достовірного виявлення деяких класів об'єктів на місцевості [123], [125], їх ідентифікації в межах установлених класів і видачі визначених директив виконавчим органам управління.

У БЗ СППР повинні бути зафіксовані образи об'єктів для їх повторного пошуку. При недостатньому об'єкту інформації для їх розпізнавання повинна видаватися команда на “допошук” об'єкту.

Удосконалена інформаційна технологія має включати такі компоненти:

- а) комплекси програм, що реалізують методи рішення завдань пошуку на базі розроблених математичних алгоритмів (див. розділ 3);
- б) бази даних (БД), що містять дані для рішення завдань пошуку;
- в) інтерфейсні програми (ІП), що забезпечують збір і передачу даних в межах СППР;
- г) комплекс програм роботи з БЗ, що складаються з таких модулів:
 - модуль БЗ СППР;
 - модуль корегування і поповнення БЗ;

- модуль формування варіантів рішень;
- д) комплекс програм аналізу варіантів і вибору конкретного рішення за критеріями часу та ймовірності успішної реалізації;
- е) комплекс програм перетворення обраного рішення у виконавчу форму, зокрема в цифровий код для його реалізації в системі автоматичного управління (САУ) БПЛА.

Структурна схема системи прийняття рішень, що описує технологію її функціонування, наведена на рисунку 4.4.

Інформаційна технологія планування маршрутів оперує з двома видами об'єктів:

а) основні об'єкти, які визначаються на інтервалі часу $[t_0, t_k]$ попереднім цільовим завданням БПЛА;

б) додаткові об'єкти, які з'являються при ліквідації виникнення ПрС в ході польоту.

Вважатимемо, що ПрС виникають у випадкові моменти часу $t \in [t_0, t_k]$.

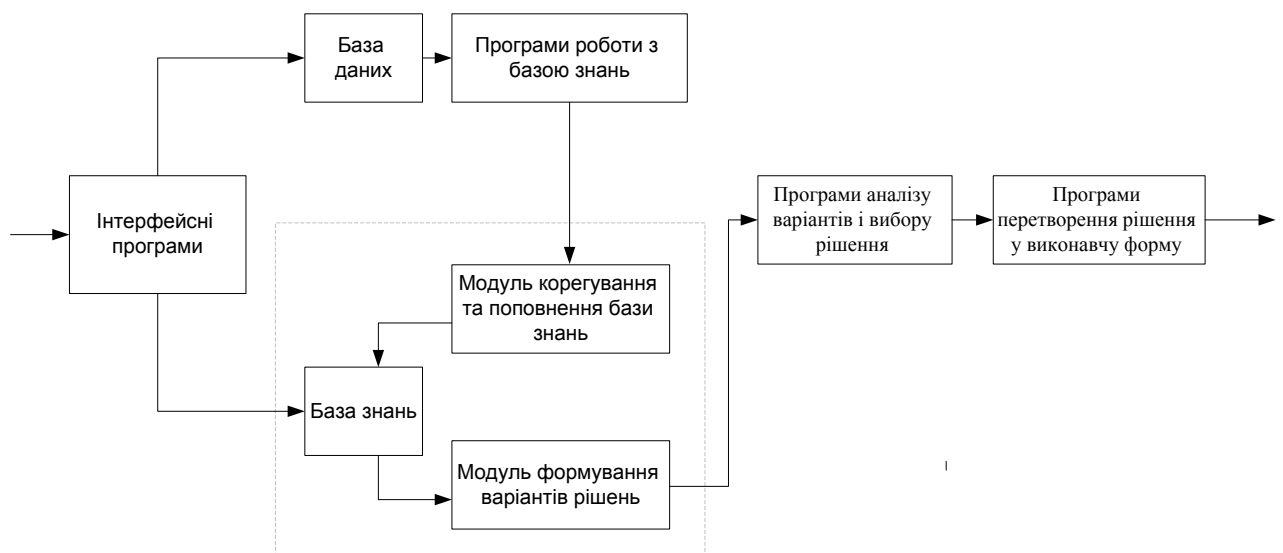


Рисунок 4.4 – Структурна схема системи прийняття рішення щодо корегування місії безпілотної літальної апарату за результатами розпізнавання об'єктів

Введемо множини C – об’єктів першого типу (заздалегідь заданих) та S – об’єктів другого типу (пошук та виявлення яких змінюється в процесі реалізації польотного завдання).

Множина $T = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N\}$ – час, в який планується пошук конкретних об’єктів з множини C . Зв’язок множин C та T представимо у вигляді бінарного відношення виду:

$$Q \subseteq T \times C. \quad (4.1)$$

Виділимо в множині C підмножину знайдених (підтверджених) C_d та не знайдених (не підтверджених) об’єктів C_{nd} . Першим завданням є виділення в момент часу $\tau_i \in T$ не знайдених (не підтверджених) об’єктів $C_{\tau_i} \in C_{nd}$. Для розв’язання даної задачі використовується множина продукційних правил виду:

$$Pr_1 = \{ \pi_{ip}^{(1)} | l(\overline{1, N}), p = (\overline{1, M}) \}, \quad (4.2)$$

яка складається з правил:

$$\pi_{ip}^{(1)}: \text{якщо } \{ P_p^{(1)}(a(\tau_i), d(\tau_i), e(\tau_i)) = 1 \}, \text{ то } \{ C_{\tau_i} \in C_d \}, \quad (4.3)$$

$$\text{інакше } \{ C_{\tau_i} \in C_{nd} \}$$

В даних правилах для аналізу досягнення результатів пошуку кожного, запланованого в момент часу $t = \tau_i$ об’єкту використовуються відповідні предикати $P_p^{(1)}$, значення яких описують факти виконання (“1”) або невиконання (“0”) умов, при яких об’єкт вважається знайденим (підтвердженим). Аргументами даних предикатів є значення векторів даних $a(t)$, $d(t)$, що надходять відповідно від оптоелектронної апаратури БПЛА та інших датчиків цільового навантаження. Вектор $e(t)$ – інформація, яка

надходить від інших БПЛА (за наявності такого обміну) або від наземної станції.

Для формування множини додаткових об'єктів використовуємо множину Z етапів польоту БПЛА (вирішуваних завдань) та множину S – ПрС, що вимагають формування та реалізацію відповідних рішень. Зв'язок даних множин представимо бінарним відношенням:

$$Q' \subseteq Z \times S \quad (4.4)$$

Вважаємо, що для виділення в кожен момент часу $t \in [t_0, t_k]$ ПрС, яка потребує конкретного рішення, використовується інформація $a(t)$, $d(t)$ та $e(t)$. Тоді для пошуку додаткових об'єктів будемо використовувати систему продукційних правил виду:

$$Pr_2 = \{ \pi_{\alpha\beta}^{(2)} | \alpha = (\overline{1, L}), \beta = (\overline{1, K}) \}, \quad (4.5)$$

де кожне правило $\pi_{\alpha\beta}$ є конкретизацією правила виду:

$$\pi_{\alpha\beta}^{(2)}: \text{якщо } \{ P_{\alpha}^{(2)}(a(t), d(t), e(t)) = 1 \}, \text{ то } \{ \text{ситуація } S_{\beta} \}, \quad (4.6)$$

$$\text{інакше } \{ \text{перехід } \pi_{\sigma\gamma}^{(2)} \}$$

Правило $\pi_{\sigma\gamma}^{(2)}$ належить до множини правил Pr_1 виду (4.2), (4.3). У формулі (4.6) через $P_{\alpha}^{(2)}(a(t), d(t), e(t))$ позначено α -й предикат, який залежно від векторів $a(t), d(t), e(t)$ приймає значення “1” або “0”. Параметр S_{β} представляє собою ідентифікатор β -ої ПрС, який є елементом множини S таких ситуацій.

Іншим завданням є виділення у відповідні моменти часу $t \in [\tau_i, \tau_{i+1}]$ множини ПрС, які потребують рішення:

$$S_\beta = \arg \left\{ P_\alpha^{(2)}(a(t), d(t), e(t)) = 1 \mid \alpha = (\overline{1, L}) \right\}, \quad (4.7)$$

які включаються до підмножини $S(t) \subset S$ поточних проблемних ситуацій. У зв'язку з тим, що проблемні ситуації виникають у випадкові моменти часу, множина $S(t)$ повинна формуватися шляхом прогнозування значень векторів $a(t)$ та $d(t)$, що входять до предикатів $P_1^{(2)}, P_2^{(2)}, \dots, P_L^{(2)}$.

Таким чином, робота інформаційної технології полягає у використанні множин правил (4.5) та (4.6) в поточний момент часу $t \in [t_0, t_k]$ польоту БПЛА та правил (4.2), (4.3) в задані моменти часу $\tau_i \in T$. Результатом роботи є множини виниклих проблемних ситуацій $S(t)$ та не знайдених (не підтверджених) об'єктів C_{nd} . Якщо дані множини у відповідні моменти часу не є порожніми, то вони передаються як вхідні дані до формування рішень.

4.2 Інформаційна технологія автоматизованого виявлення та класифікації об'єктів безпілотними літальними апаратами

Інформаційна технологія автоматизованого виявлення та класифікації об'єктів безпілотними літальними апаратами реалізується за рахунок використання:

- вхідних даних льотно-технічних характеристик БПЛА, характеристик оптико-електронного обладнання, параметрів польоту, цифрових знімків земної поверхні, апріорних даних про стаціонарні об'єкти, відносно яких здійснюється виявлення;

- вихідних даних (задокументована результати виявлення та класифікації стаціонарних об'єктів);

- модуля підготовки до функціонування (навчання), який включає процедури, що реалізують метод формування навчальної вибірки зображень та навчання нейронної мережі виявленню та класифікації стаціонарних

об'єктів;

- модуля обробки даних, який включає процедури попередньої обробки графічної інформації; процедури, що реалізують метод автоматизованого виявлення та класифікації стаціонарних об'єктів на борту БПЛА;

- модуля зберігання, який включає процедуру документування даних, отриманих в процесі ведення пошуку, та засоби їх зберігання;

- модуля передачі даних, який включає процедуру передачі отриманих в процесі пошуку даних споживачам та засоби їх передачі.

При розробці узагальненої структури інформаційної технології автоматизованого виявлення та ідентифікації стаціонарних об'єктів враховані результати, отримані в роботі [123]:

- модель виявлення та класифікації стаціонарних об'єктів;

- визначені допущення та обмеження методу автоматизованого паралельного виявлення та класифікації стаціонарних об'єктів;

- топологія згорткової нечіткої мережі (ЗНМ);

- метод автоматизованого паралельного виявлення та класифікації стаціонарних об'єктів.

- метод формування навчальної вибірки зображень для навчання ЗНМ виявленню та класифікації стаціонарних об'єктів.

Розроблена інформаційна технологія реалізується в чотири етапи: підготовчий, основний, додатковий та заключний. Кожний етап складається з окремих процедур, направлених на збір, обробку, зберігання та передачу інформації в процесі польоту.

Перший (підготовчий) етап функціонування ІТ виконується до початку польоту. Вихідні дані включають топологію та вагові коефіцієнти ЗНМ, які передаються для виконання основного етапу.

По закінченні підготовчого етапу здійснюється копіювання файлів топології та вагових коефіцієнтів ЗНМ в форматі SAFFE з модуля підготовки до функціонування (навчання) до модуля обробки. Здійснюється перевірка правильності функціонування ІТ та підготовка до застосування БПЛА за

призначенням (рис. 4.5).

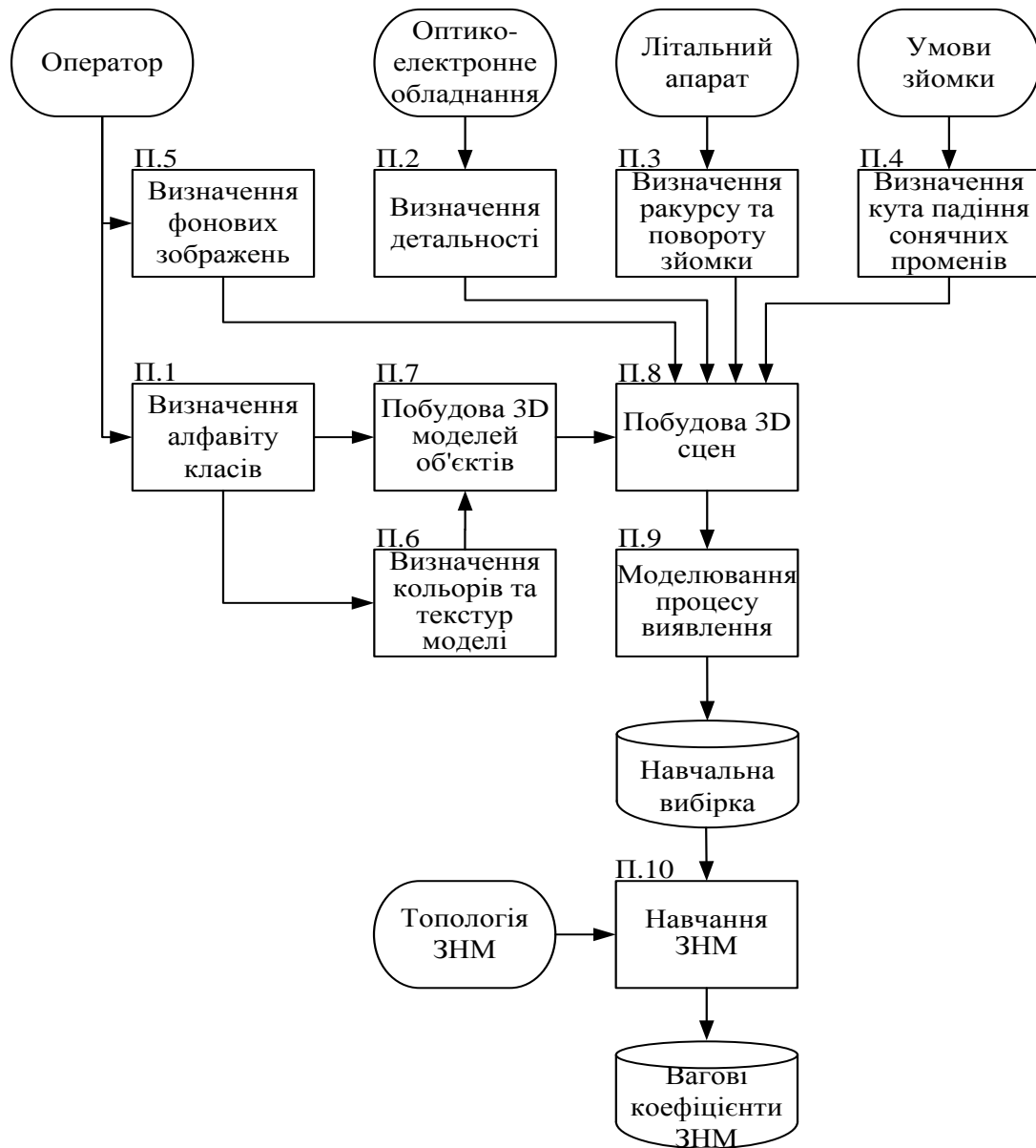


Рисунок 4.5 – Структурна схема підготовчого етапу інформаційної технології автоматизованого виявлення та класифікації стаціонарних об'єктів

Основний, додатковий та заключний етапи функціонування ІТ (див. рис. 4.6) виконуються в процесі польоту БПЛА.

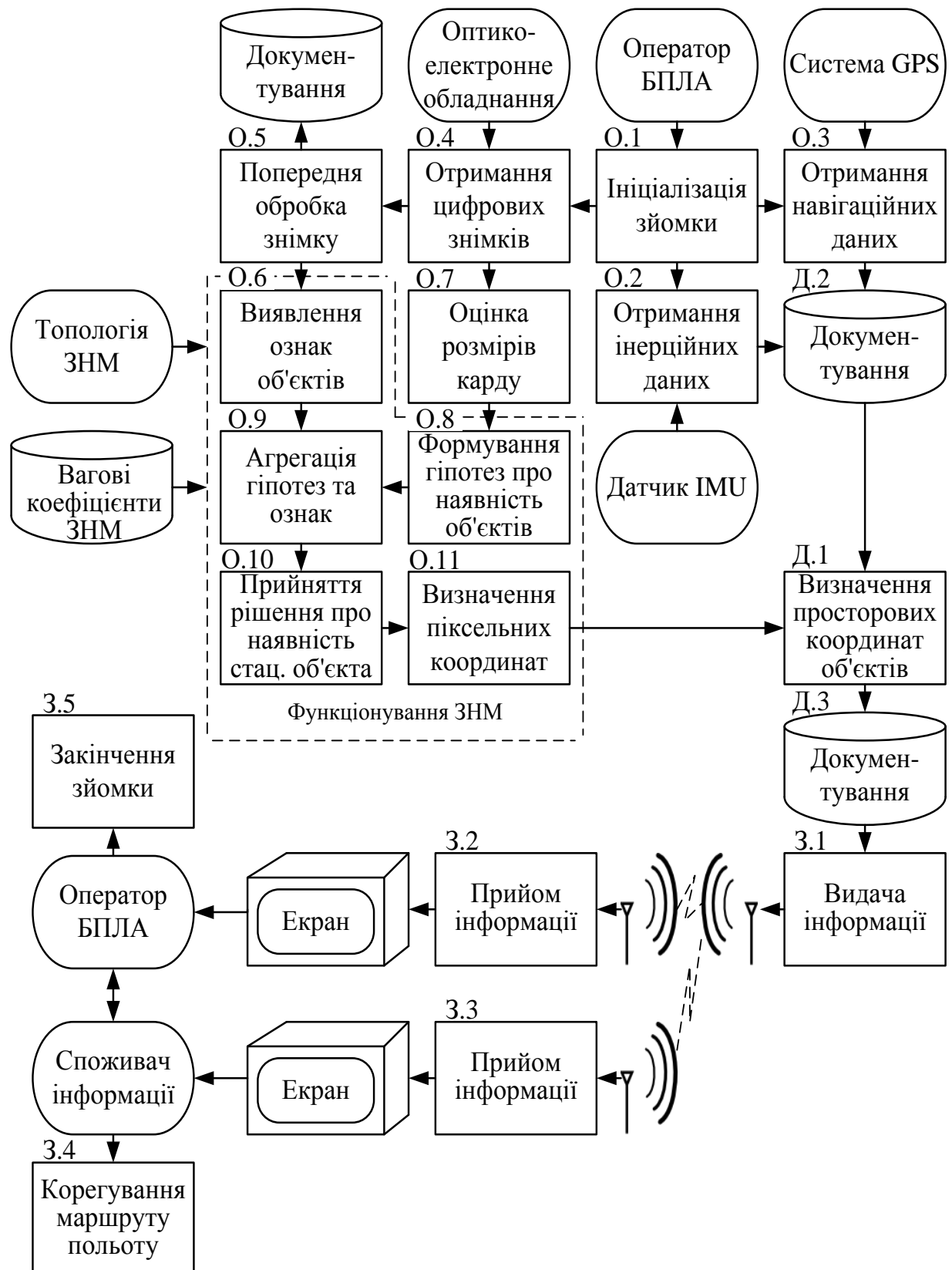


Рисунок 4.6 – Структурна схема основного, додаткового та заключного етапів інформаційної технології автоматизованого виявлення та класифікації стаціонарних об'єктів

Вхідними даними для відповідних етапів є команди оператора на початок та закінчення функціонування, цифрові знімки земної поверхні, отримані від оптико-електронних засобів БПЛА, навігаційні та інерційні дані, а також топологія та вагові коефіцієнти ЗНМ, отримані на підготовчому етапі. Вихідними даними основного етапу функціонування ІТ є передані повідомлення, задокументовані дані оптико-електронного обладнання БПЛА, інерційних та навігаційних датчиків, результатів виявлення та класифікації.

Таким чином, розроблена ІТ автоматизованого виявлення та класифікації стаціонарних об'єктів із застосуванням ЗНМ дозволяє приймати, обробляти, зберігати та передавати інформацію за результатами виявлення та класифікації стаціонарних об'єктів на борту БПЛА.

4.3 Інформаційна технологія планування маршрутів польотів безпілотних літальних апаратів

Інформаційна модель планування маршрутів польотів БПЛА є складовою частиною СППР та дозволяє ОПР приймати обґрунтовані рішення щодо вибору точок маршруту БПЛА для підвищення ефективності пошуку динамічних та стаціонарних об'єктів.

Архітектурою інформаційної технології є комплекс взаємопов'язаних рішень на базі основних принципів вибору стандартів і технологій для створення взаємодіючих програм в СППР, а також для формування вимог до необхідного для розробки й функціонування цих програм технологічним, технічним і телекомунікаційним засобам і іншим видам забезпечення [37], [39]. Архітектура інформаційної технології наведена на рисунку 4.7.

Завдання інформаційної технології:

– надавати органу управління актуальну інформацію про раціональні маршрути польоту БПЛА для пошуку динамічних об'єктів в умовах лісостепної місцевості;

- надавати органу управління актуальну інформацію про стан підсистем власного БПЛА;
- надавати інформацію органу управління актуальну інформацію про раціональні маршрути польоту БПЛА для пошуку стаціонарних об'єктів;
- вести каталог (базу даних) об'єктів пошуку;
- документувати інформацію польоту;
- обробляти інформацію для побудови оптимальних маршрутів пошуку об'єктів;
- вести базу знань правил корегування маршрутів в ході виконання місії за результатом розпізнавання об'єктів пошуку;
- вести каталог заборонених зон.

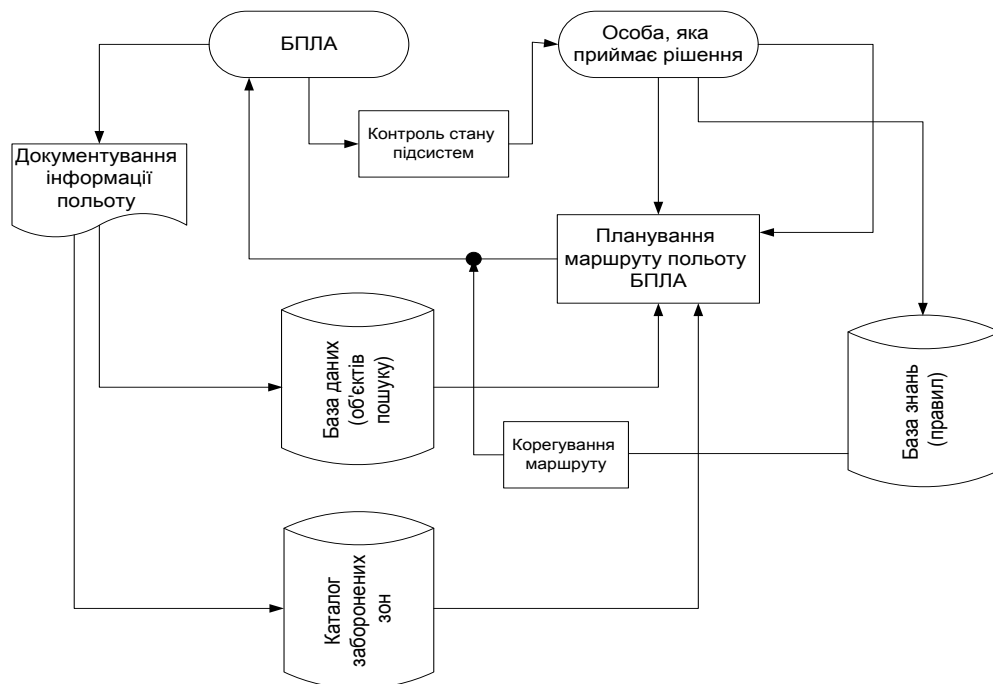


Рисунок 4.7 – Архітектура інформаційної технології планування маршрутів безпілотного літального апарату

Проведемо аналіз вимог, що висуваються до програмно-апаратних комплексів, визначимо функції, які повинна виконувати інформаційна технологія у складі системи підтримки прийняття рішення та порядок її

взаємодії з користувачами. Обґрунтуємо вибір концепції створення системи й необхідні для її функціонування засоби. Головною особливістю інформаційної технології СППР є метод організації взаємодії обчислювальної системи та особи, що приймає рішення [39]. Вироблення рішення, що є основною метою такої взаємодії, здійснюється в результаті ітераційного процесу, в якому приймають участь:

а) система підтримки прийняття рішень у ролі обчислювального комплексу;

б) органи управління як управляючий орган, що задає вхідні дані та оцінює отриманий від програмно-апаратного комплексу результат.

Найважливішими вимогами до СППР є достовірність отриманих результатів, оперативність розрахунків (актуальність проведених розрахунків в динаміці виконання місії) та контрольованість впливів (СППР лише рекомендує, а людина приймає рішення та повністю за нього відповідає) [39].

Закінчення цього процесу проходить за рішенням людини при прогнозованому досягненні заданих критеріїв ефективності функціонування БПЛА або за відсутністю часу (часовий критерій прийняття рішення) за умови вибору раціонального варіанту вибору траєкторії управління.

Інформаційна технологія у складі СППР характеризується такими особливості [39]:

1) орієнтація на рішення слабо структурованих (формалізованих) задач, використання в алгоритмах СППР методів нечітких множин, нечітких мір, інтелектуального аналізу даних;

2) використання у складі алгоритмічного (математичного) забезпечення методів прийняття рішень в умовах невизначеності;

3) поєднання традиційних методів доступу та обробки даних з можливостями математичних моделей та методами розв'язання задач на їх основі;

4) урахування системи переваг органу управління БПЛА;

5) висока адаптивність, що забезпечує можливість пристосування до особливостей технічного та програмного забезпечення і вимог користувача;

СППР може використовуватися на будь-якому рівні управління, що характерно для ієрархічної та мережецентричної структури побудови системи управління. Іншими словами, рішення (пропозиції), що приймаються на різних рівнях системи управління, повинні бути координовані. Розробка програмного комплексу пов'язана з вибором типу обчислювального комплексу, операційної системи, бібліотек графічного API (Application Programming Interface) і сервера баз даних (БД), варіанта побудови структури БД і технологій їх розробки.

Висновки до четвертого розділу

1. Наведені основні елементи розробленої інформаційної технології автоматизованого планування дій БПЛА, їх взаємозв'язок та порядок функціонування.

2. Показано, що розроблена ІТ складається з двох частин:

а) інформаційної технології автоматизованого виявлення та класифікації об'єктів безпілотними літальними апаратами;

б) інформаційної технології планування маршрутів польотів безпілотних літальних апаратів.

3. Інформаційна технологія автоматизованого планування маршрутів польотів безпілотних літальних апаратів дозволяє отримати раціональні маршрути для пошуку динамічних та стаціонарних об'єктів з урахуванням бази (каталогу) об'єктів, аналізу системи об'єктів пошуку, заборонених зон.

4. Знанняорієнтованість системи полягає у наявності бази знань для зберігання правил відносно зміни місії БПЛА під час виявлення об'єктів.

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ПОБУДОВИ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕННЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДІВ

В даному розділі дослідження на підґрунті розроблених методів планування маршрутів польотів БПЛА розроблені рекомендації щодо впровадження їх до системи підтримки прийняття рішення. Обґрунтовується структура даної системи, комплекс задач, які повинні входити до даної системи. Оцінюється ефективність розроблених методів, виконані розрахунки чисельного експерименту, доведена перевага методів над існуючими. Результати дослідження опубліковані в роботах автора [55], [59].

5.1 Рекомендації щодо побудови системи підтримки прийняття рішення для управління безпілотними літальними апаратами

В основі функціонування СППР для управління БПЛА є інформаційна технологія планування дій БПЛА (див. в розділі 4).

Інтегроване інформаційне середовище забезпечує підтримку всіх етапів створення інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень і адаптації їх для розв'язання прикладних задач з метою ефективного управління БПЛА:

- система розпізнавання визначає характер відхилення показників від допустимих по еталонах у БЗ і на основі цього вирішує завдання розпізнавання;

- система моніторингу орієнтована на безперервну інтерпретацію даних у реальному часі і сигналізацію про вихід тих або інших параметрів за допустимі межі;

- система управління визначає оптимальні плани дій і схеми обльоту та здійснює контроль за їх виконанням;

– система прогнозування робить висновки про майбутній розвиток подій, виходячи з поточної ситуації, прогнозує параметри при різних схемах обльоту і режимах польоту.

Задачі, які розв'язуються СППР:

- аналіз, оцінка і розпізнавання ситуацій, об'єктів;
- узагальнення результатів розпізнавання ситуацій, об'єктів від декількох джерел виявлення для формування єдиного інформаційного поля;
- контроль, оцінка і діагностика станів, параметрів;
- оцінка важливості і пріоритету альтернатив;
- виявлення та оповіщення про надзвичайні, аварійні ситуації, що загрожують БПЛА та їх реєстрація;
- прогнозування розвитку подій, ситуацій і дій;
- реалізація алгоритмів планування маршрутів і сценаріїв дій;
- формування рекомендацій та оцінювання варіантів рішень;
- забезпечення швидкого настроювання, адаптації і модифікації системи до нових умов експлуатації.

Основними структурними складовими інтелектуальної СППР є база знань і механізм логічного виведення. В основу системи покладене логічне обчислення предикатів першого порядку. При створенні моделей знань використовується спеціальна внутрішня мова опису експертних знань. Механізм логічного виведення – модифікований метод резолюцій для обчислення предикатів. База знань призначена для збереження сукупності фактів, закономірностей, відношень (знань), що описують проблемну область, і правил, що описують доцільні форми структурування, формалізації і перетворення знань у цій області.

Механізм логічного виведення представляє собою сукупність способів застосування правил виведення. Використовуючи поточні або проміжні вихідні дані (факти) і знання з бази знань, СППР формує послідовність правил, що, будучи застосовані до вихідних даних (фактів), отриманих від бортової вимірювальної системи або наземного пункту управління в

результаті контролю стану підсистем БПЛА, приводять до розв'язання конкретної задачі діагностики, прогнозування і регулювання параметрів польоту та виконання завдання.

Гнучка відкрита структура СППР дозволяє розширювати функціональні можливості системи і коло задач, що розв'язуються у процесі її експлуатації, а також постійно підвищує точність аналізу, прогнозування, планування, організації, координації і контролю прийнятих рішень за рахунок використання досвіду, що накопичується в базі знань. Наявність достатньо повної моделі знань у конкретній предметній області і постійний контроль тенденцій змін параметрів об'єкта управління забезпечує діагностику і прогноз його поведінки з достатньо високим ступенем вірогідності і заданої точності.

Узагальнена структура інтелектуальної СППР планування дій БПЛА наведена на рисунку 5.1.

Надамо коротку характеристику зазначеним модулям та бібліотекам.

Модуль означування предикатів призначений з метою формування бази фактів для обраної системи аксіом по первинних (базових) відношеннях (предикатах) з бази даних.

База правил призначена для формалізованого опису логічних задач на мові обчислення предикатів першого порядку.

База фактів призначена для інтерпретації аксіом в процесі логічного виведення.

Бібліотека розрахункових модулів призначена для отримання даних, необхідних для формування бази фактів.

Бібліотека внутрішніх функцій призначена для виконання відповідних функцій, відношень, алгоритмів.

Таким чином, база знань системи містить у собі базу правил і базу питань. База правил формалізовано описує логічні задачі мовою представлення знань системи. База питань призначена для поповнення,

збереження і використання списків можливих питань для кожної логічної задачі.

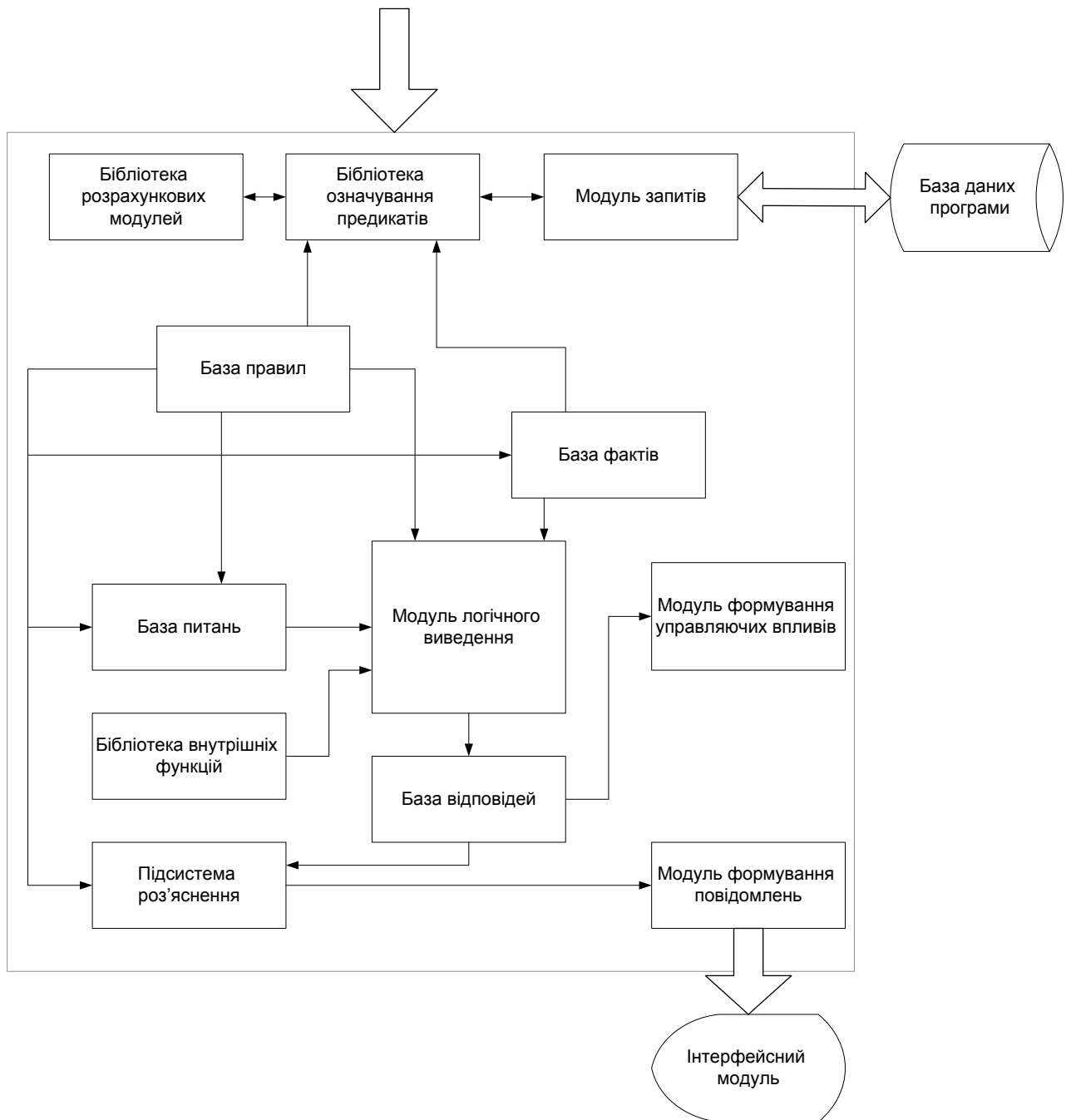


Рисунок 5.1 – Узагальнена структура інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень планування дій безпілотними літальними апаратами

Центральним елементом системи є модуль логічного виведення, призначений для логічного виведення наслідків (відповідей) із системи

правил, що знаходяться в БЗ, з використанням модифікованого методу резолюцій, розробленого у [127].

Модуль доступу до даних або універсальна означувальна процедура слугує для формування бази фактів (вихідний і проміжний дані розв'язуваної в поточний момент логічної задачі) для обраної системи аксіом по первинних (базових) відношеннях до даних у БД.

Підсистема пояснення (у варіанті застосування в наземному комплексі) надає вичерпну інформацію про причини отримання тієї або іншої відповіді (факти і правила), задіяні у логічному виведенні, що полегшує тестування системи і підвищує довіру до отриманого результату.

Основні режими функціонування системи:

- корегування і поповнення бази знань;
- консультування або питально-відповідний режим (система видає відповіді – діагнози, рекомендації, повідомлення; у варіанті застосування в наземному комплексі – природною мовою в реальному часі прийняття рішень для оператора);
- автоматичний (основний режим для варіанта застосування в бортовому комплексі БПЛА);
- пояснення результатів (видається вичерпна інформація про причини отримання даної відповіді – фактів і правил, задіяних у процесі логічного виведення – у варіанті застосування в наземному комплексі).

Складність існуючих методів доведення у методах обчислення предикатів полягає в їх нерозв'язності і необхідності перебору великої кількості варіантів доведення в процесі пошуку рішення. Тому великі часові витрати в окремих реалізаціях даних методів зводять до нуля їхню практичну цінність [128]. У розробленій структурі СППР використаний ефективний алгоритм логічного виведення при різних стратегіях скорочення перебору, розроблений у [127], модифікована схема якого наведена на рисунку 5.2.

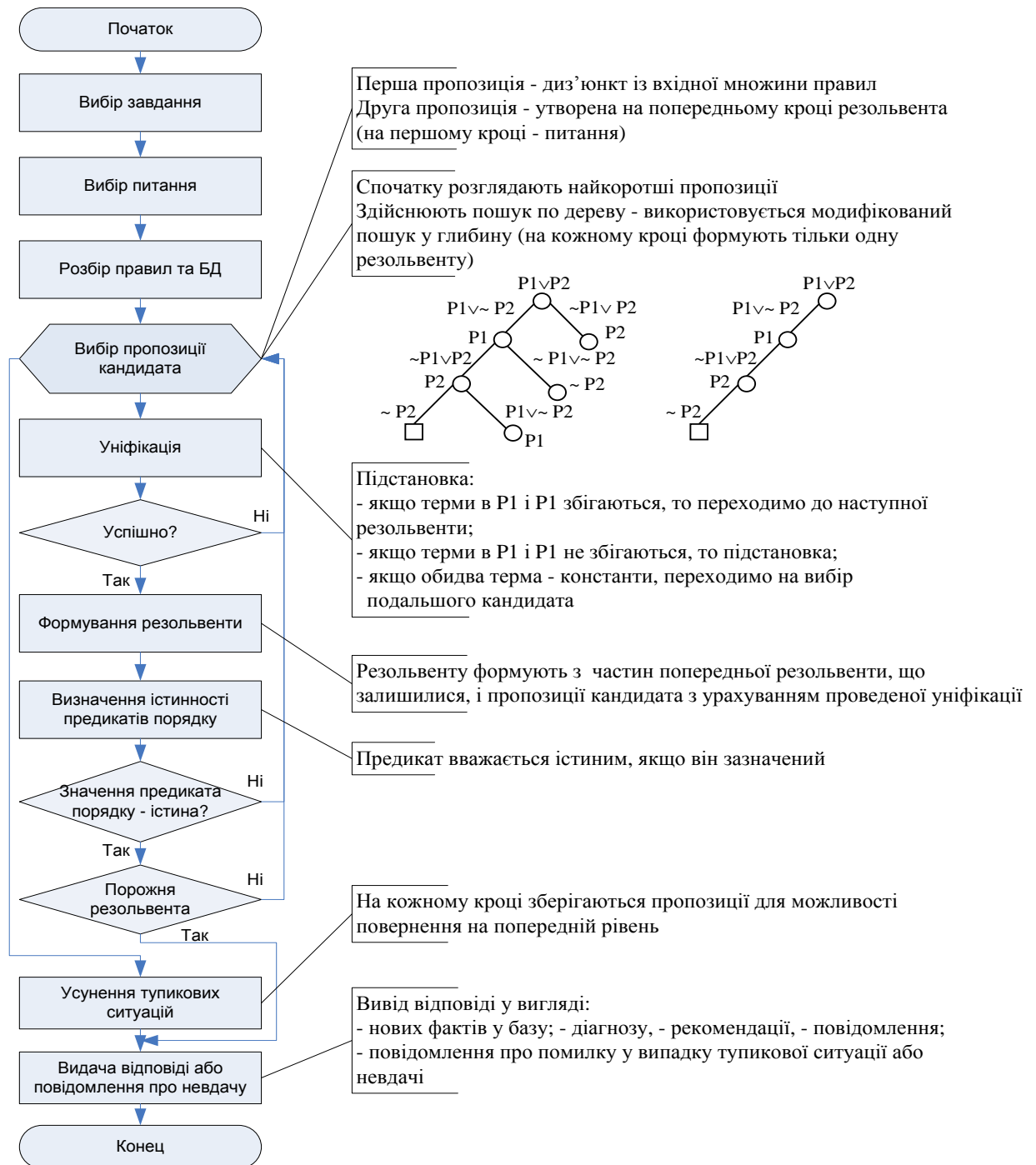


Рисунок 5.2 – Модифікована система логічного виведення для інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень планування дій безпілотних авіаційних комплексів [127]

У загальному випадку в базі знань для кожного предиката вказують:

- тип (первинний – означається фактами, вторинний – визначається формулою, розрахунковий – означається фактами, отриманими в результаті логічного виведення);
- внутрішнє представлення на спеціальній формалізованій мові;
- семантичний зміст;
- формулу обчислення предиката (для вторинних);
- формулу визначення фактів (для розрахункових);
- семантичний зміст рекомендації.

Семантичний зміст предиката представляє собою текст відповіді на запитання. У семантичному змісті вказують змінні (куди будуть підставлені значення, знайдені в результаті логічного виведення). Крім зазначених, є ще один тип предикатів – предикати порядку, істинність яких обчислюється внутрішнім програмним модулем алгоритму логічного виведення після підстановки замість термів предикатів фактичних значень.

Так, наприклад, для створення ІТ виявлення, розпізнавання та ідентифікації наземних об'єктів необхідно попереднє формування бази знань вихідною сигнатурною інформацією про цілі і підстилаючі поверхні. Сигнатурна інформація може включати комбінації: інтегральні і спектральні коефіцієнти яскравості; індикатриси зазначених коефіцієнтів; інтегральні і диференціальні поверхні розсіювання; типові портрети. У базі знань фіксуються умови в момент застосування БПЛА: ракурс спостереження об'єктів бортовою апаратурою, час доби, умови освітлення, вологість і інші показники метеоумов.

Для реалізації функцій планування дій БПЛА необхідно створювати і підтримувати цифрові моделі обстановки. Для цього доцільно використовувати типову структуру геоінформаційних систем (ГІС), наведену на рисунку 5.3. Наявність наведених на рисунку 5.3 підсистем визначає глибину інтеграції даних і методів їх обробки, дозволяє в одному форматі приймати органами управління рішення і реалізовувати їх.

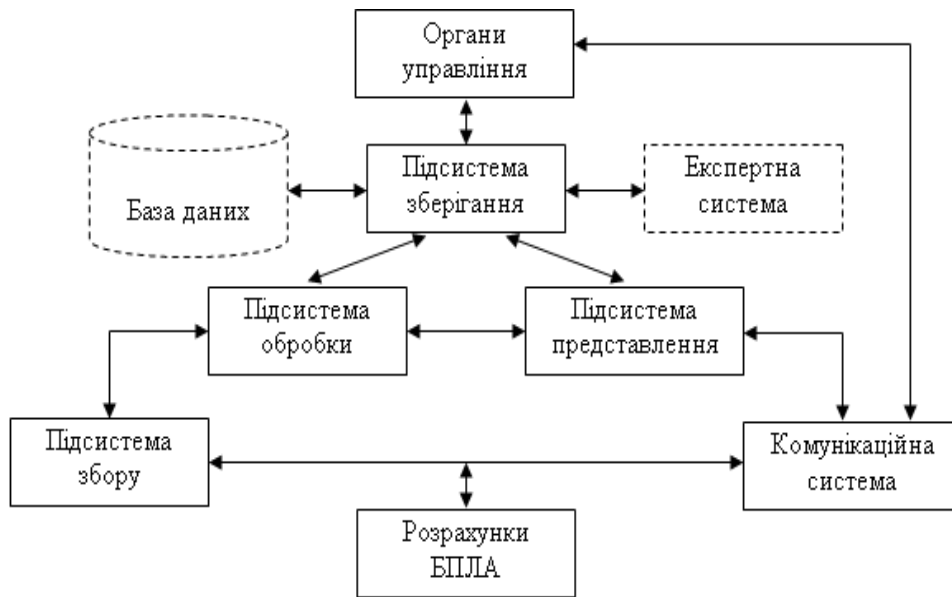


Рисунок 5.3 – Типова структура геоінформаційної системи для планування дій безпілотних літальних апаратів

Комплекс задач планування маршрутів БПЛА є складовою частиною системи підтримки прийняття рішення на застосування БПЛА і складається із сукупності взаємозалежних завдань (рисунок 5.4).

Завдання збору інформації і формалізації даних призначене для отримання інформації про можливий район пошуку, її формалізації для автоматизованої обробки. Дане завдання нерозривно зв'язане з завданням управління інформаційним забезпеченням, призначеним для формування інформації для прийняття рішення, обміну необхідною інформацією між елементами структури і формалізації польотного завдання БПЛА.

Центральним завданням комплексу завдань планування маршрутів дій БПЛА є моделювання можливих варіантів дій динамічних об'єктів та польотів БПЛА. Результат моделювання використовується в завданні №5 (рисунок 5.4) (формування управляючого впливу), звідки обґрунтований варіант маршруту передається оператору БПЛА.

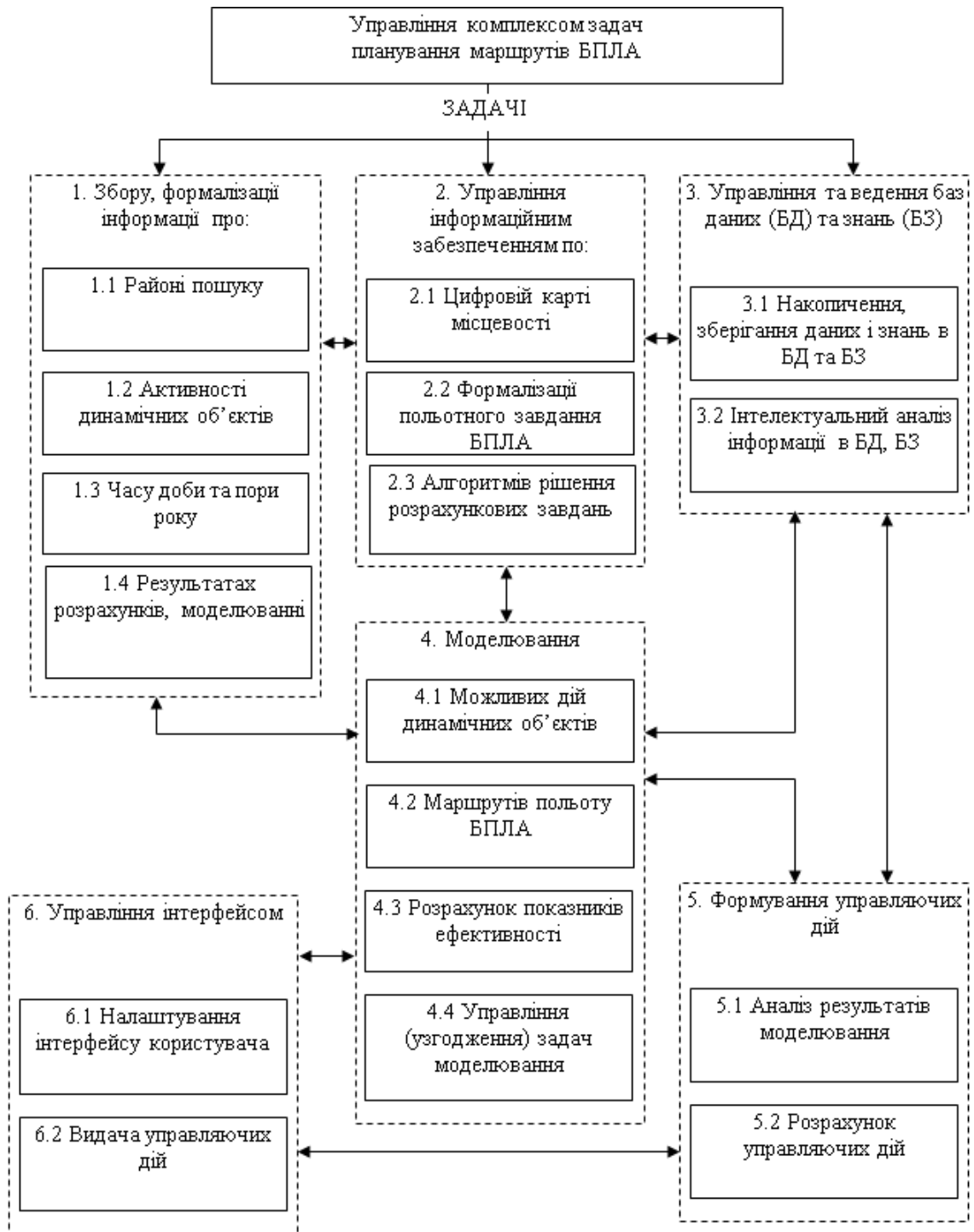


Рисунок 5.4 – Структура комплексу завдань планування маршрутів польоту безпілотних літальних апаратів

Розроблений комплекс задач планування маршрутів польотів БПЛА входить до складу СППР автоматизованої системи управління безпілотними літальними апаратами.

5.2 Оцінювання ефективності методу планування маршрутів польоту безпілотних літальних апаратів для пошуку динамічних об'єктів

Для оцінювання ефективності удосконаленого в дисертаційній роботі методу планування маршрутів польоту безпілотних літальних апаратів для пошуку динамічних об'єктів проведений чисельний експеримент.

Для проведення чисельного експерименту використана лісостепова місцевість (рисунок 5.5). Як видно рисунку 5.5, вихідний район пошуку містить дев'ять можливих маскувальних областей для динамічних об'єктів і шість об'єктів впливу. Для одержання ймовірно-часової оцінки можливих дій динамічних об'єктів формалізуємо дану карту графом (рисунок 5.6).

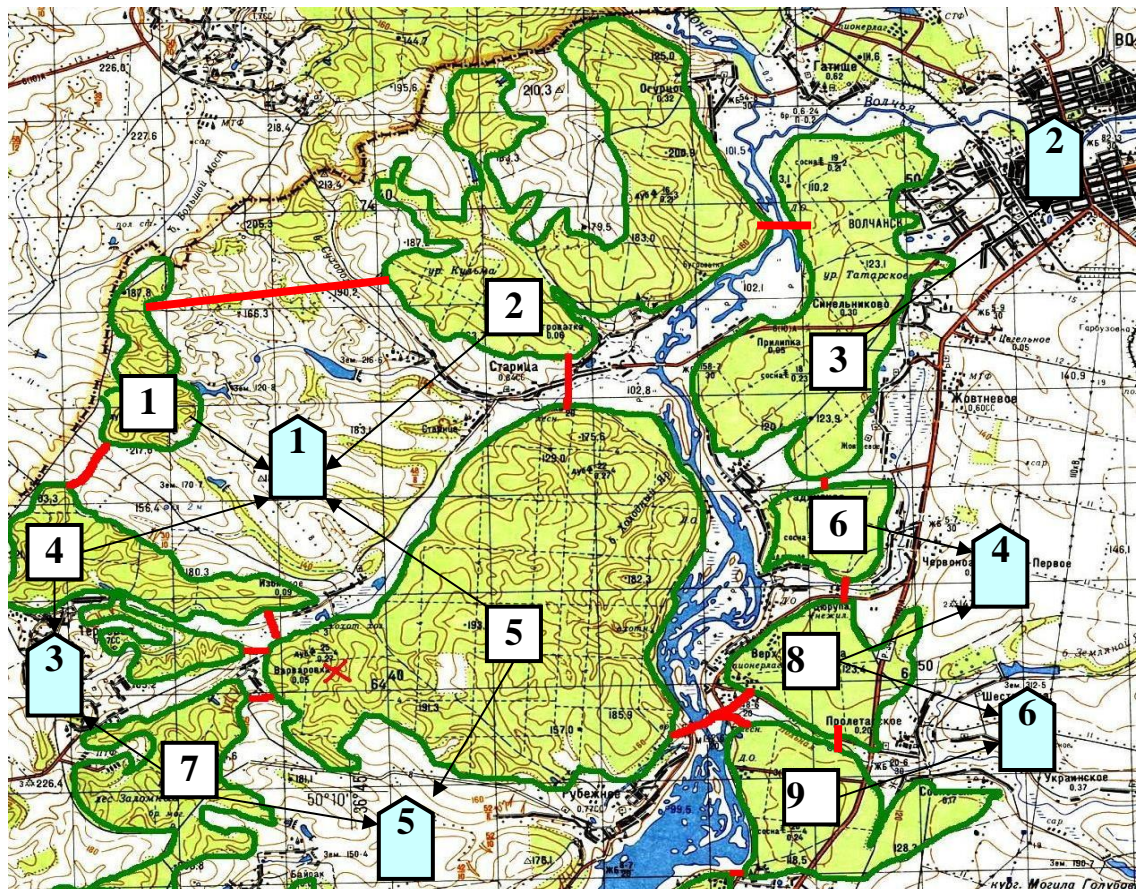


Рисунок 5.5 – Карта району пошуку динамічних об'єктів

Відповідний граф наведений на рисунку 5.6, де вершини 1-9

дисертаційної роботи) складає 500, що забезпечує статистичну стійкість результатів, математичне сподівання часу проходження ділянки m_{4-5} складає 0,223 години, а СКВ: $\sigma_{4-5} = 0,014$ години.

Таблиця 5.1 – Характеристика відкритих ділянок у районі пошуку

№ з/п	Номер відкритої ділянки (ребро графа)	Довжина ділянки [км]	Мінімальна швидкість руху динамічного об'єкту [км/год]	Максимальна швидкість руху динамічного об'єкту [км/год]
1	1-2	10	3	6
2	1-4	2	3	6
3	1-10	2	3	6
4	2-3	1	2	3
5	2-5	2,5	3	4
6	2-10	8	3	5
7	3-6	0,5	4	5
8	3-11	3	2	3
9	4-5	1	4	6
10	4-10	3	4	5
11	4-12	0,6	3	5
12	5-7	0,7	3	4
13	5-9	1,2	1	2
14	5-10	3	2	6
15	5-13	1,5	2	5
16	6-8	0,8	3	5
17	6-14	2	2	6
18	7-12	1,1	2	6
19	7-13	3,5	2	6
20	8-9	0,6	3	5
21	8-14	1,7	2	6
22	8-15	2,3	2	6
23	9-15	0,9	2	6

Проведено аналогічні розрахунки математичного сподівання і СКВ для кожної відкритої ділянки на маршруті руху від 4-ої маскувальної області (4-ої вершини графа рисунок 5.6) до 2-го об'єкту впливу (11-ої вершини графа рисунок 5.6). Результати представлені у вигляді таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Прогноз часу проходження відкритих ділянок динамічним об'єктом на заданому маршруті руху

№ з/п	Номер ребра	Математичне сподівання часу проходження, [год]	СКВ часу проходження, [год]
1	4-5	0,223	0,014
2	5-9	0,8	0,075
3	8-9	0,15	0,015
4	6-8	0,2	0,018
5	3-6	0,11	0,006
6	3-11	1,21	0,012

Далі визначається час руху динамічного об'єкту по маскувальних областях на заданому маршруті, виходячи з їх характеристик; результати занесені в таблицю 5.3. Довжина маскувальної області приймається як відстань від входу відкритої ділянки до його виходу (для даного маршруту).

Таблиця 5.3 – Прогноз часу проходження маскувальних областей динамічним об'єктом на заданому маршруті руху

№ з/п	Номер маскувальної області	Довжина, [км]	Мінімальна швидкість, [км/год]	Максимальна швидкість, [км/год]	Математичне сподівання часу проходження, [год]	СКВ часу проходження, [год]
1	4	3	2	3	1,21	0,02
1	2	3	4	5	6	7
2	5	10	2	3	2,84	0,03
3	9	1,5	3	4	0,43	0,0013
4	8	3	2	3	1,21	0,02
5	6	1,5	2	3	0,6	0,012
6	3	5	2	3	2,03	0,02

Враховуючи, що математичне сподівання суми незалежних випадкових величин, розподілених за нормальним законом розподілу, дорівнює сумі математичних сподівань, а дисперсія суми незалежних випадкових величин – сумі дисперсій [40], запишемо результати моделювання руху динамічного об'єкту на маршруті в таблицю 5.4.

Часовий графік руху динамічного об'єкту з 4-ої маскувальної області до 2-го об'єкту впливу (11-та вершина графа) показаний на рисунку 5.7.

На рисунку 5.7 цифрами в колі показаний номер ділянки маршруту, що відповідає рядку таблиці 5.4.

Аналогічно виконаний прогноз часу руху динамічного об'єкту по маршруту при русі його з четвертої маскувальної області до 4-го, 5-го і 6-го об'єкту впливу, що відповідає вершинам графа 14, 13, 15 відповідно.

Таблиця 5.4 – Прогноз часу руху динамічного об'єкту по маршруту №4-№11

№ з/п	Ділянка маршруту	Математичне сподівання часу входу, [год]	СКВ, [год]	3*СКВ, [год]	Математичне сподівання часу виходу, [год]	СКВ, [год]	3*СКВ, [год]
1	маскувальна область №4	0	0	0	1,21	0,02	0,06
2	відкрита ділянка №4-5	1,21	0,02	0,06	1,433	0,024	0,084
3	маскувальна область №5	1,433	0,024	0,084	4,273	0,039	0,117
4	відкрита ділянка №5-9	4,273	0,039	0,117	5,073	0,085	0,255
5	маскувальна область №9	5,073	0,085	0,255	5,503	0,085	0,255
6	відкрита ділянка №9-8	5,503	0,085	0,255	5,653	0,086	0,258
7	маскувальна область №8	5,653	0,086	0,258	6,763	0,088	0,264
8	відкрита ділянка №8-6	6,763	0,088	0,264	6,964	0,09	0,27
9	маскувальна область №6	6,964	0,09	0,27	7,564	0,092	0,276
10	відкрита ділянка №6-3	7,564	0,092	0,276	7,674	0,1	0,3
11	маскувальна область №3	7,674	0,1	0,3	9,704	0,11	0,33

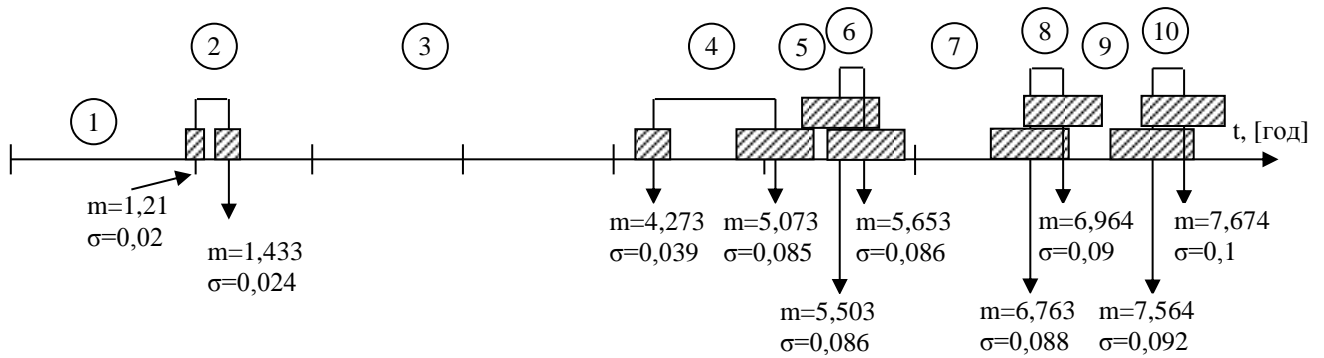


Рисунок 5.7 – Часовий графік руху динамічного об'єкту по маршруту №4 - №11

Застосовуючи алгоритм Дейкстри [29], [30] для орієнтованого зваженого графа (див. рисунок 5.6) отримані маршрути руху динамічного об'єкту з 4-ої маскувальної області до 4, 5 і 6-го об'єкту впливу відповідно.

Використовуючи дані з таблиці 5.2 та 5.3, заповнюються таблиці 5.5-5.7, що за побудовою аналогічні таблиці 5.4 (прогноз часу руху динамічного об'єкту по маршруту).

Таблиця 5.5 - Прогноз часу руху динамічного об'єкту по маршруту №4 - №14

№ з/п	Ділянка маршруту	Математичне сподівання часу входу, [год]	СКВ, [год]	3*СКВ, [год]	Математичне сподівання часу виходу, [год]	СКВ, [год]	3*СКВ, [год]
1	маскувальна область №4	0	0	0	1,21	0,02	0,06
2	відкрита ділянка №4-5	1,21	0,02	0,06	1,433	0,024	0,084
3	маскувальна область №5	1,433	0,024	0,084	4,273	0,039	0,117
4	відкрита ділянка №5-9	4,273	0,039	0,117	5,073	0,085	0,255
5	маскувальна область №9	5,073	0,085	0,255	5,503	0,085	0,255
6	відкрита ділянка №9-8	5,503	0,085	0,255	5,653	0,086	0,258
7	маскувальна область №8	5,653	0,086	0,258	6,763	0,088	0,264
8	відкрита ділянка №8-14	6,763	0,88	0,264	7,233	0,09	0,27

Таблиця 5.6 - Прогноз часу руху динамічного об'єкту по маршруту №4-№13

№ з/п	Ділянка маршруту	Математичне сподівання часу входу, [год]	СКВ, [год]	3*СКВ, [год]	Математичне сподівання часу виходу, [год]	СКВ, [год]	3*СКВ, [год]
1	маскувальна область №4	0	0	0	1,21	0,02	0,06
2	відкрита ділянка №4-5	1,21	0,02	0,06	1,433	0,024	0,084
3	маскувальна область №5	1,433	0,024	0,084	4,273	0,039	0,117
4	відкрита ділянка №5-13	4,273	0,039	0,117	4,733	0,04	0,12

Таблиця 5.7 - Прогноз часу руху динамічного об'єкту по маршруту №4-№15

№ з/п	Ділянка маршруту	Математичне сподівання часу входу, [год]	СКВ, [год]	3*СКВ, [год]	Математичне сподівання часу виходу, [год]	СКВ, [год]	3*СКВ, [год]
1	маскувальна область №4	0	0	0	1,21	0,02	0,06
2	відкрита ділянка №4-5	1,21	0,02	0,06	1,433	0,024	0,084
3	маскувальна область №5	1,433	0,024	0,084	4,273	0,039	0,117
4	відкрита ділянка №5-9	4,273	0,039	0,117	5,073	0,085	0,255
5	маскувальна область №9	5,073	0,085	0,255	5,503	0,085	0,255
6	відкрита ділянка №9-15	5,503	0,085	0,255	5,723	0,086	0,258

Часові графіки руху динамічного об'єкту для кожного маршруту представлені на рисунку 5.8. З аналізу даних, наведених на рисунку 5.8, можна зробити висновок, що при первинному перебуванні в четвертій

маскувальної області, пошук динамічного об'єкту потрібно здійснювати на відкритій ділянці 4-5. При цьому час польоту БПЛА над відкритою ділянкою для гарантованого перебування на ньому динамічного об'єкту має складати $t_{\min} = 1,21 + 0,06 = 1,27$ години від моменту виявлення динамічного об'єкту до $t_{\max} = 1,433 - 0,084 = 1,349$ часу виходу з відкритої ділянки.

Таким чином, час гарантованого знаходження динамічного об'єкту на відкритій ділянці складе 0,08 год. або близько 5 хв., що достатньо для виявлення динамічного об'єкту з використанням БПЛА.

У випадку неможливості ведення пошуку за допомогою БПЛА на даній відкритій ділянці (наприклад, через несвоєчасність одержання інформації про вихідне перебування динамічного об'єкту), варто проводити моніторинг за допомогою БПЛА на відкритій ділянці між маскувальними областями 5-9 (див. рисунок 5.6), крім варіанта виходу динамічного об'єкту до 5-го об'єкту дії.

Час гарантованого перебування динамічного об'єкту на даній відкритій ділянці складає в межах: $t_{\min} = 4,273 + 0,039 \cdot 3 = 4,39$ год. від моменту виявлення динамічного об'єкту до $t_{\max} = 5,073 - 0,085 \cdot 3 = 4,818$ год. – часу виходу динамічного об'єкту з відкритої ділянки. Таким чином, час гарантованого перебування динамічного об'єкту на відкритій ділянці складе приблизно 25 хв., що достатньо для виявлення динамічного об'єкту з використанням БПЛА.

Побудуємо часові графіки руху динамічного об'єкту для кожного маршруту. Час перебування динамічного об'єкту на відкритій ділянці між маскувальними областями 9 і 8 (див. рисунок 5.6) показано на рисунку 5.8. Динамічний об'єкт може перебувати на даній відкритій ділянці лише при впливі динамічного об'єкту по об'єктах дії №4 і №6 (див. рисунок 5.5), що відповідає вершинам графа №11 і №14 (див. рисунок 5.6).

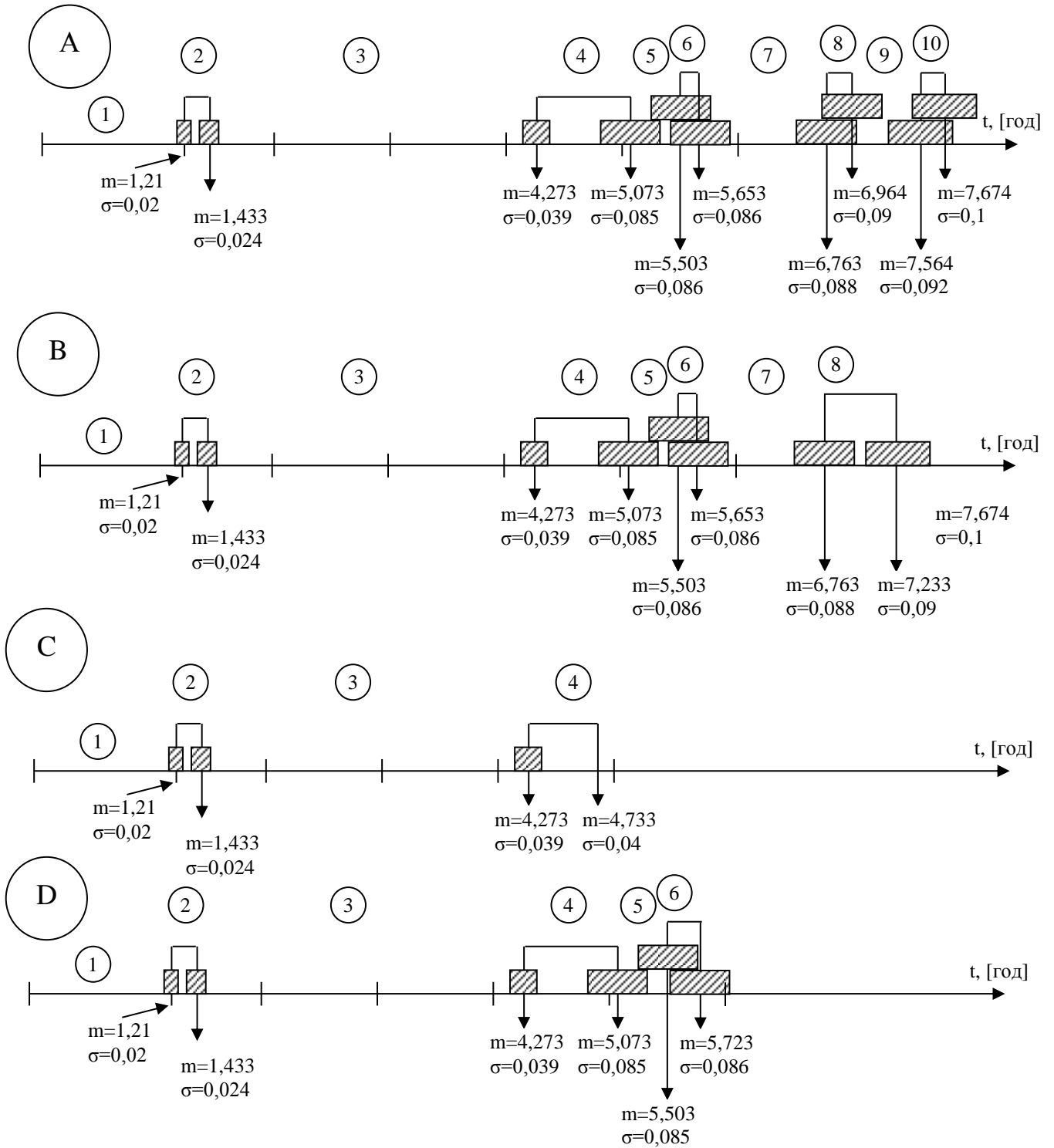


Рисунок 5.8 – Часові графіки руху динамічного об’єкту з 4-ої маскувальної області

(А – маршрут “4”-“11”, В – маршрут “4”-“14”, С – маршрут “4”-“13”,
 D – маршрут “4”-“15”)

Час входу динамічного об'єкту на дану відкриту ділянку є випадковою величиною, розподіленою за нормальним законом розподілу [30] з параметрами $m_{entry} = 5,503; \sigma_{entry} = 0,086$. Час виходу динамічного об'єкту з відкритої ділянки також є випадковою величиною, розподіленою за нормальним законом з параметрами: $m_{exit} = 5,653; \sigma_{exit} = 0,086$.

Для визначення ймовірності перебування динамічного об'єкту на даній відкритій ділянці визначимо граничні ймовірнісні інтервали, виходячи з правила "трьох сигм" (рисунок 5.9).

Суцільною лінією показаний розкид випадкової величини – часу появи динамічного об'єкту на даній відкритій ділянці, а пунктирною – розкид випадкової величини часу виходу динамічного об'єкту з відкритої ділянки.

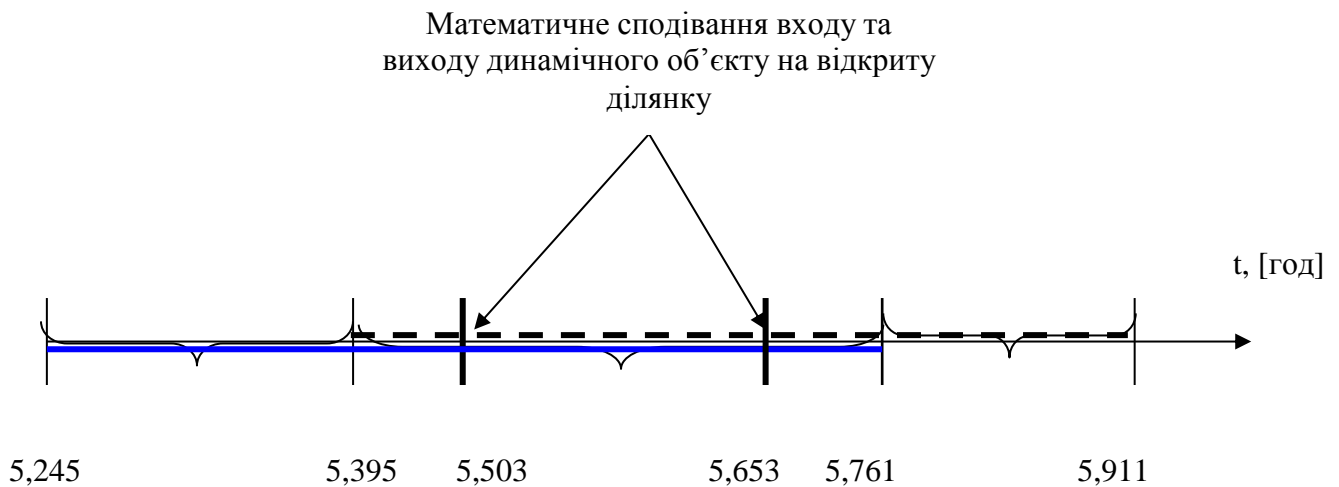


Рисунок 5.9 – Часовий графік проходження динамічним об'єктом відкритої ділянки

Знаючи, що обидві випадкові величини розподілені за нормальним законом, знайдемо ймовірність перебування динамічного об'єкту на кожному часовому інтервалі, представленою на графіку.

Перший часовий інтервал [5,245; 5,395].

Ймовірність того, що динамічний об'єкт буде на відкритій ділянці в

даному часовому інтервалі дорівнює:

$$P_1 = F\left(\frac{5,395 - 5,503}{0,086}\right) - F\left(\frac{5,245 - 5,503}{0,086}\right) \approx 0,4$$

Другий часовий інтервал [5,395; 5,761].

Імовірність перебування динамічного об'єкту на відкритій ділянці в даному часовому інтервалі складається з імовірності двох незалежних подій: імовірності того, що динамічний об'єкт буде на даному інтервалі P_2^{entry} та ймовірності того, що динамічний об'єкт не піде з даної відкритої ділянки $P_2^{nl} = 1 - P_2^{exit}$. Таким чином: $P_2 = P_2^{entry} \cdot (1 - P_2^{exit})$.

$$P_2^{entry} = F\left(\frac{5,761 - 5,503}{0,086}\right) - F\left(\frac{5,395 - 5,503}{0,086}\right) \approx 0,6;$$

$$P_2^{exit} = F\left(\frac{5,761 - 5,653}{0,086}\right) - F\left(\frac{5,395 - 5,553}{0,086}\right) \approx 0,6;$$

$$P_2 = 0,6 \cdot (1 - 0,6) = 0,24.$$

Третій часовий інтервал [5,761; 5,911].

Імовірність того, що динамічний об'єкт буде на відкритій ділянці в даний часовий інтервал, дорівнює:

$$P_3 = 1 - \left[F\left(\frac{5,911 - 5,653}{0,086}\right) - F\left(\frac{5,761 - 5,653}{0,086}\right) \right] \approx 0,6.$$

Таким чином, можна визначити ймовірність перебування динамічного об'єкту на відкритій ділянці в будь-якому часовому діапазоні і задати часовий діапазон перегляду відкритої ділянки для досягнення ймовірності перебування не менше заданої.

Нехай ймовірність правильного розпізнавання динамічного об'єкту з

використанням БПЛА дорівнює $P_{RC} = 0,9$, а ймовірність правильної ідентифікації наземного об'єкта як динамічного об'єкту – $P_{ID} = 0,8$. Прийmemo рівноймовірну гіпотезу про об'єкти впливу для динамічного об'єкту, що знаходиться в четвертій маскувальній області. Визначимо ймовірність виконання завдання пошуку за допомогою БПЛА для розглянутого прикладу.

Як було показано раніше, для виконання задачі пошуку за допомогою БПЛА потрібно планувати обліт відкритих ділянок за графіком (таблиця 5.8).

Ймовірність того, що БПЛА діє з 4-й маскувальної області по 2-му об'єкту дії (11-я вершина графа рисунок 5.6) $P_{4-2} = 0,25$. Ймовірність виконання задачі пошуку за допомогою у даному випадку при обльоті відкритих ділянок, згідно таблиці 5.8, складає:

$$P_{AR_{4-2}} = 1 - (1 - 0,72) \cdot (1 - 0,72) \cdot (1 - 0,432) \cdot (1 - 0,37) \cdot (1 - 0,432) = 0,984.$$

Таблиця 5.8 – Графік обльоту відкритих ділянок у ході виконання завдання пошуку динамічного об'єкту за допомогою безпілотного літального апарату

№ з/п	Номер відкритої ділянки	Час вльоту	Час вильоту	Ймовірність наявності динамічного об'єкту на відкритій ділянці	P_{RC}	P_{ID}	P_{AR}
1	№4-5	1 год 16 хв.	1 год 21 хв.	1	0,9	0,8	0,72
2	№5-9	4 год 25 хв.	4 год 50 хв.	1	0,9	0,8	0,72
3	№9-8	5 год 45 хв.	5 год 54 хв.	0,6	0,9	0,8	0,432
4	№ 8-6	6 год 42 хв.	7 год 02 хв.	0,52	0,9	0,8	0,37
5	№ 6-3	7 год 22 хв.	7 год 31 хв.	0,6	0,9	0,8	0,432

Ймовірність того, що динамічний об'єкт діє з 4-ої маскувальної області по 4-му об'єкту впливу (14-та вершина графа рисунок 5.6) складає $P_{4-4} = 0,25$. Ймовірність виконання завдання пошуку за допомогою БПЛА у

даному випадку при обльоті відкритих ділянок, згідно таблиці 5.8, складає:

$$P_{AR_{4-4}} = 1 - (1 - 0,72) \cdot (1 - 0,72) \cdot (1 - 0,432) = 0,955.$$

Ймовірність того, що динамічний об'єкт діє з 4-ої маскувальної області по 5-му об'єкту впливу (13-та вершина графа див. рисунок 5.6) $P_{4-5} = 0,25$.

Ймовірність виконання завдання пошуку за допомогою БПЛА у даному випадку при обльоті відкритих ділянок, згідно таблиці 5.8, складає:

$$P_{AR_{4-5}} = 1 - (1 - 0,72) = 0,72.$$

Ймовірність того, що динамічний об'єкт діє з 4-ої маскувальної області по 5-му об'єкту впливу (15-та вершина графа рисунок 5.6) $P_{4-6} = 0,25$.

Ймовірність виконання завдання пошуку за допомогою БПЛА даному випадку при обльоті відкритих ділянок, згідно таблиці 5.8, складає:

$$P_{AR_{4-6}} = 1 - (1 - 0,72) \cdot (1 - 0,72) = 0,9216.$$

Таким чином, ймовірність успішного ведення пошуку за допомогою БПЛА з використанням розробленого методу за умови перебування динамічного об'єкту у четвертій маскувальній області (див. рисунки 5.5, 5.6) складає:

$$P_{AR} = 0,25 \cdot 0,984 + 0,25 \cdot 0,955 + 0,25 \cdot 0,72 + 0,25 \cdot 0,9216 = 0,895.$$

Аналогічно можна розрахувати ефективність проведення пошуку при перебуванні динамічного об'єкта в інших маскувальних областях (таблиця 5.9).

Таблиця 5.9 – Оптимізація маршрутів руху динамічного об’єкту до об’єкту №1

Номер ділянки	Приріст ступеня уразливості динамічного об’єкту (U_{jk}) на маршрутах руху							ΣU_{jk}
	1	2	3	4	5	6	7	
1	12,3	8,4	0	3,35	0	0	3,4	28,45
	12,3	0	2,34	3,35	3,2	0	0	21,19
	0	8,4	2,34	0	3,2	5,6	0	19,54
	0	8,4	2,34	0	3,2	5,6	3,4	22,94
	0	8,4	0	3,35	0	5,6	3,4	20,75

Ймовірність виявлення динамічного об’єкту за допомогою БПЛА методом “Паралельні галси” або “Гребінка” для площі в 1000 км² (за умови наявності інформації про первинне знаходження об’єкту) складає 0,1-0,2.

Таблиця 5.10 – Оптимізація маршрутів польоту безпілотної літальної апарату для пошуку динамічних об’єктів на відкритих ділянках всієї множини маршрутів їх руху

№ відкритої ділянки	Приріст математичного сподівання кількості виявлень для відкритих ділянок на маршрутах руху динамічних об’єктів (у загальній нумерації на карті району пошуку – рисунки 5.5, 5.6)											ΣAP
	4	1	3	5	2	6	8	7	10	11	9	
4	0,871	0,054	0,268	0,32	0,193	0,142	0,21	0,045	0,223	0,12	0,11	6,556
1		0,768	0,311	0,42	0,522	0,543	0,136	0,33	0,256	0,23	0,21	3,726
3			0,823	0,623	0,427	0,557	0,218	0,214	0,347	0,215	0,331	3,755
5				0,795	0,372	0,524	0,2	0,268	0,41	0,32	0,299	3,188
2					0,828	0,569	0,432	0,325	0,338	0,278	0,311	3,081
6						0,899	0,523	0,335	0,249	0,326	0,239	2,571
8							0,92	0,659	0,325	0,254	0,336	2,494
7								0,879	0,461	0,433	0,335	2,108
10									0,827	0,546	0,322	1,695
11										0,799	0,677	1,476
9											0,924	0,924

Результати чисельного експерименту дозволяють зробити висновок про збільшення ймовірності до 0,75-0,90% за умови застосування сучасних інформаційних технологій та методу планування маршрутів БПЛА для

пошуку динамічних об'єктів (рисунок 5.10), що свідчить про ефективність розробленого методу.

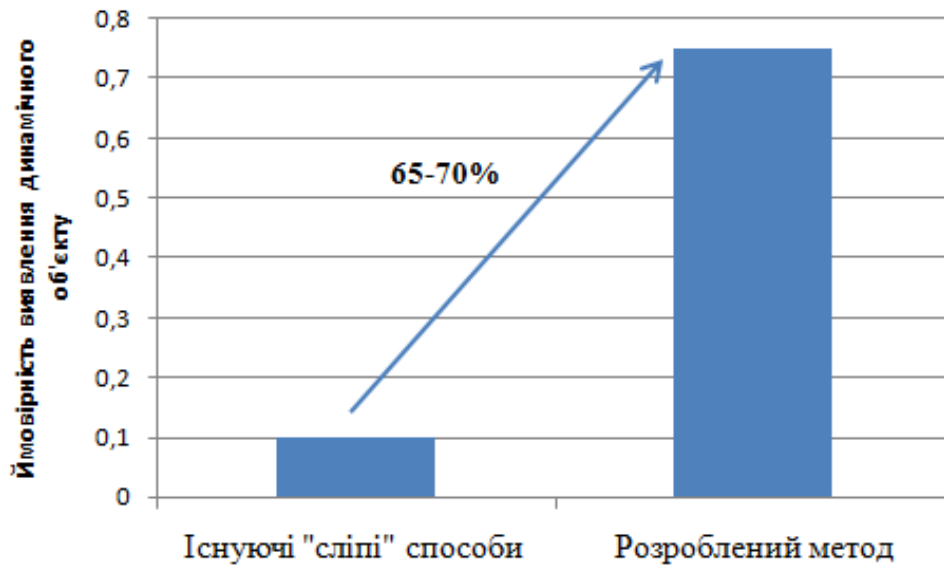


Рисунок 5.10 – Приріст ймовірності виявлення динамічного об'єкту з використанням розробленого методу

5.3 Оцінювання ефективності методу планування маршрутів польоту безпілотних літальних апаратів для пошуку стаціонарних об'єктів

Метод планування маршрутів польоту БПЛА для пошуку стаціонарних об'єктів оперує показником важливості об'єкту, який розраховується за допомогою поліедрального аналізу. В якості вихідних даних для оцінювання ефективності методу планування маршрутів польоту БПЛА використаємо граф, що приведено на рисунку 5.11. Кожна вершина графу позначена як s_i . Введемо наступне відношення між вузлами даної системи: i -та вершина належить j -му симплексу, якщо між i -ю та j -ю вершиною є зв'язок.

В структурі системи переважають симплекси розмірностей 3 та 4. Значення ексцентриситетів приблизно навіпіл розділилися на середні та незначні, що свідчить про те, що симплекси зв'язані один з одним у

середньому не більше половиною своїх вузлів і не здатні формувати компоненти великих розмірностей, що знижує її адаптаційні можливості до різких змін. Значення ступеня конкуренції для всіх симплексів, крім одного, є середніми, що свідчить про достатню кількість варіантів досяжності вузлів, отже, вихід з ладу одного з вузлів не спричинить критичних наслідків для системи.

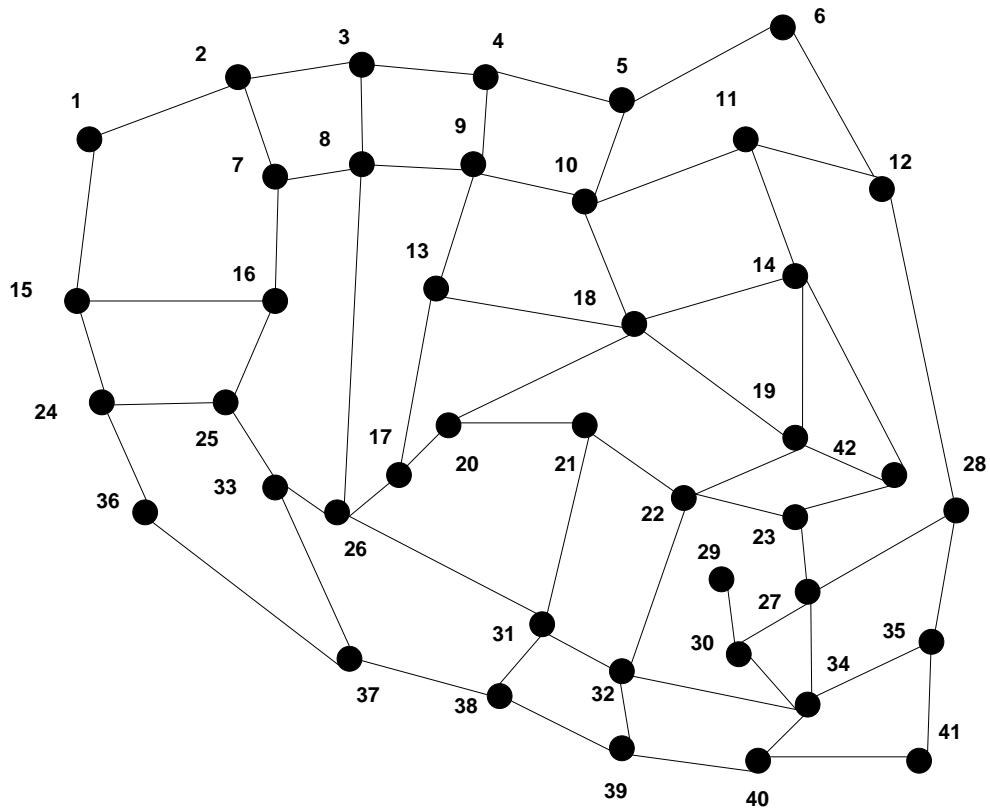


Рисунок 5.11 – Графова модель системи статичних об'єктів

Проведення поліедрального аналізу дозволило отримати такий структурний вектор – $Q(10, 37, 19, 1)$. Велика кількість q -компонентів на всіх рівнях зв'язаності, за винятком нульового, підтверджує припущення про нездатність системи формувати потоки великих розмірностей. Крім того, кількість симплексів розмірності 4 та 3 збігаються зі значеннями структурного вектора на рівнях 3 та 2, а саме 10 та 37. Це означає, що в розглянутій системі симплекси не здатні встановлювати один з одним зв'язок на цих двох рівнях зв'язаності і формувати компоненти навіть із двох симплексів.

Більш детальну інформацію про рівні зв'язаності отримуємо з аналізу q -компонентів. Значення оцінки складності, обчислене на основі структурного вектора, дозволяє віднести досліджувану систему статичних об'єктів до систем із середньою складністю структури.

На рівні зв'язаності 3 знайдено 10 q -компонент, що складаються з одного елемента (одиничні компоненти): $s_8, s_9, s_{10}, s_{18}, s_{19}, s_{22}, s_{26}, s_{31}, s_{32}, s_{34}$. У зв'язку зі значною їх чисельністю, значення коефіцієнта покриття [119] рівня та відносної провідності цих q -компонентів мало.

Результати аналізу рівня зв'язаності 2 абсолютно ідентичні результатам аналізу рівня зв'язаності 3. На цьому рівні розташовуються 37 одиничних q -компонентів на базі симплексів $s_2-s_5, s_7-s_{28}, s_{30}-s_{35}, s_{37}-s_{40}, s_{42}$. Кожний q -компонент характеризується малими значеннями коефіцієнта покриття рівня та відносної провідності.

На рівні зв'язаності 1 аналіз q -компонент дозволив одержати такий результат. Незважаючи на значну кількість q -компонент на цьому рівні - 19 тільки 12 з 41 симплексів ($s_1, s_6, s_{11}, s_{12}, s_{14}, s_{26}, s_{27}, s_{28}, s_{30}, s_{33}, s_{36}, s_{37}$) не зв'язані з жодним іншим симплексом, і формують 12 одиничних q -компонент з незначними величинами коефіцієнта покриття рівня та відносної провідності. Всі інші симплекси беруть участь у формуванні семи q -компонент. Перший q -компонент сформований шістьма симплексами $s_2, s_8, s_4, s_{10}, s_{13}, s_{20}$, причому два з них s_2 та s_{20} – є термінальними [119] і немає жодного симплекса перетину.

Такий поділ симплексів свідчить про досить просту внутрішню структуру q -компонента та вказує на те, що q -компонента не містить циклів і перетинань, і представлена одним симпліціальним ланцюгом, обмеженим симплексами s_2 і s_{20} . На це також вказує й досить мале значення складності q -компоненти. Середня величина коефіцієнта покриття рівня свідчить про відносно великий розмір q -компонента і її ролі серед інших компонентів. Незважаючи на те, що розмір досліджуваного q -компонента дозволяє підтримувати додаткову провідність на середньому рівні, її внутрішня організація зменшує ці можливості до малого значення.

Другий q -компонент сформований також шістьма симплексами – s_3 , s_7 , s_9 ; s_5 , s_{18} та s_{17} . Однак, уже три з них – s_7 , s_5 та s_{17} є термінальними та один – s_9 – симплексом перетинань. Очевидно, що структура цього q -компонента складніша. Розміри компонента дозволяють йому мати середнє значення коефіцієнта покриття рівня, що свідчить про те, що він здатний відігравати важливу роль у розподілі одномірних потоків.

Наступні три компоненти (3, 4 і 5) сформовані наборами із двох симплексів; $\{s_{15}, s_{25}\}$; $\{s_{16}, s_{24}\}$ і $\{s_{19}, s_{23}\}$ відповідно.

Шостий компонент подібний до розглянутого вище компоненту 2, з тією різницею, що до його складу входять не шість, а п'ять симплексів: s_{21} , s_{32} , s_{38} , s_{40} , s_{35} , три з яких є термінальними: s_{21} , s_{38} , s_{35} , а один – симплексом перетинань s_{32} . Незважаючи на меншу кількість симплексів, складність q -компонента залишається незначною. Структура q -компонента 7 збігається зі структурою q -компонента 1, розглянутого вище. У його склад входить набір з 6 симплексів – s_{22} , s_{31} , s_{42} , s_{39} , s_{34} , s_{41} , два з яких – s_{42} і s_{41} термінальні, а симплекси перетинань відсутні. Отримані характеристики компонента 7 збігаються з оцінками компонента 1: значення складності компоненти – мале, значення коефіцієнта покриття рівня – середнє, значення додаткової провідності – мале.

Підводячи підсумки аналізу рівня зв'язаності 1, можна відзначити, що, незважаючи на низьку зв'язаність симплексів, яка стала причиною великої кількості одиничних q -компонент, система може підтримувати одномірні потоки в межах невеликої кількості одномірних (неодиничних) q -компонент. Невеликий розмір і кількість цих компонентів сильно обмежує області, в яких додаткова провідність здатна себе виявити.

До того ж, всі знайдені q -компоненти демонструють досить простий зв'язок, що накладає обмеження на інтенсивність багатомірних потоків. Все це вказує на те, що досліджувана система слабо пристосована для адаптивного реагування на різкі зміни обстановки (втрати елемента, порушення зв'язків).

Нульовий рівень зв'язаності системи – це рівень фізичних зв'язків. Всі симплекси мають зв'язки (відсутні ізольовані вершини в графі), що свідчить про стійкість побудованої системи.

За результатами проведеного аналізу сформуємо ряд рекомендацій:

- приблизно однакове значення ексцентриситету симплексів в системі свідчить про стійкість побудованої системи статичних об'єктів;
- найбільш високий рівень зв'язаності 3 представлений незв'язними компонентами ($S_8, S_9, S_{10}, S_{18}, S_{19}, S_{22}, S_{26}, S_{31}, S_{32}, S_{34}$), що обмежують собою зони 3-мірної провідності, саме дані вузли є першочерговими для ведення повітряного спостереження об'єктів і підтвердження їх стану;
- оскільки система слабо пристосована для адаптивного реагування на різкі зміни обстановки, вплив на неї має бути не послідовним, а одночасним.

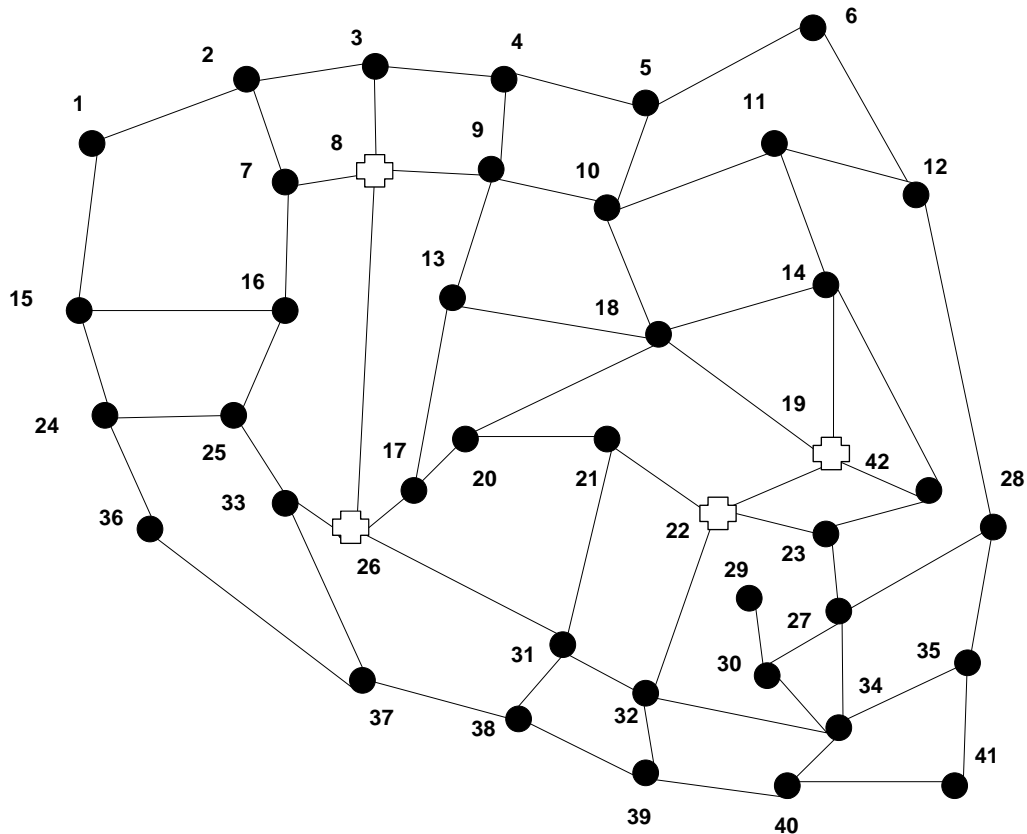


Рисунок 5.12 – Виділення прогнозних об'єктів, що визначають стійкість системи

Враховуючи вираз для отримання ваги об'єктів (3.26) та розв'язуючи задачу пошуку оптимальних маршрутів в постановці (2.13) – (2.17), отримаємо сумарне значення ваги стаціонарних об'єктів пошуку. Проведемо

чисельний експеримент пошуку з урахуванням ваги елементів системи стаціонарних об'єктів та без урахування його (існуючими методами). Розв'язання задачі будемо виконувати методом оптимізації генетичним алгоритмом рішення задачі комівояжера з обмеженням на час руху (довжину маршруту) (див. додаток Г).

Елементи 8, 19, 22, 26 є прогнозними об'єктами (рисунок 5.12), що визначають стійкість системи (рисунок 5.11).

В таблиці 5.11 наведено розрахунок важливості об'єктів за формулою (3.26). Значення коефіцієнтів обрані: $a_1 = 0,4$; $a_2 = 0,3$; $a_3 = 0,4$.

Таблиця 5.11 – Розрахунок важливості стаціонарних об'єктів

№	Час підтвердження, діб	k_t	Card(s)	k_e	k_o	w_i
1	2	3	4	5	6	7
1	3	0,393	2	0,2	0,5	0,367
2	4	0,487	3	0,35	0,5	0,450
3	3	0,393	3	0,35	0,5	0,412
4	3	0,393	3	0,35	0,5	0,412
5	4	0,487	3	0,35	0,5	0,450
6	5	0,565	2	0,2	0,5	0,436
7	10	0,811	3	0,35	0,5	0,579
8	-	1	-	1	1	1
9	4	0,487	4	0,2	0,5	0,405
10	5	0,565	4	0,2	0,5	0,436
11	2	0,283	3	0,2	0,5	0,323
12	3	0,393	3	0,2	0,5	0,367
13	4	0,487	3	0,35	0,5	0,450
14	5	0,565	3	0,2	0,5	0,436
15	12	0,865	3	0,35	0,5	0,601
16	2	0,283	3	0,35	0,5	0,368
17	3	0,393	3	0,35	0,5	0,412
18	4	0,487	4	0,2	0,5	0,405
19	-	1	-	1	1	1
20	2	0,283	3	0,35	0,5	0,368
21	5	0,565	3	0,35	0,5	0,481
22	-	1	-	1	1	1
23	4	0,487	3	0,35	0,5	0,450

Продовження таблиці 5.11

1	2	3	4	5	6	7
24	2	0,283	3	0,35	0,5	0,368
25	3	0,393	3	0,35	0,5	0,412
26	-	1	-	1	1	1
27	4	0,487	3	0,2	0,5	0,405
28	3	0,393	3	0,2	0,5	0,367
29	3	0,393	1	0,5	0,5	0,457
30	2	0,283	3	0,2	0,5	0,323
31	3	0,393	4	0,2	0,5	0,367
32	4	0,487	4	0,2	0,5	0,405
33	5	0,565	3	0,2	0,5	0,436
34	6	0,632	4	0,2	0,5	0,463
35	3	0,393	3	0,35	0,5	0,412
36	1	0,154	2	0,2	0,5	0,271
37	2	0,283	3	0,2	0,5	0,323
38	2	0,283	3	0,35	0,5	0,368
39	2	0,283	3	0,35	0,5	0,368
40	3	0,393	3	0,35	0,5	0,412
41	3	0,393	3	0,35	0,5	0,412
42	4	0,487	3	0,35	0,5	0,450

Порівняння результатів моделювання пошуку оптимальних маршруту на графі (з використанням генетичного алгоритму) за заданими обмеженнями польоту при зважених вершинах та незважених приведено на рисунку 5.13.

Незважаючи на більшу кількість точок маршруту при незважених вершинах ($N=8$) проти $N=6$ при зважених вершинах, вага виявлених об'єктів для другого маршруту, виявлена вага вершин для другого маршруту вища.

Зважування вершин дозволяє не тільки оптимізувати маршрут за критерієм (2.13), але і знайти оптимальні точки старту маршруту, а також обґрунтувати доцільність групового застосування БПЛА для пошуку (підтвердження стану) стаціонарних об'єктів.

Унормуємо вагу статичних об'єктів пошуку.

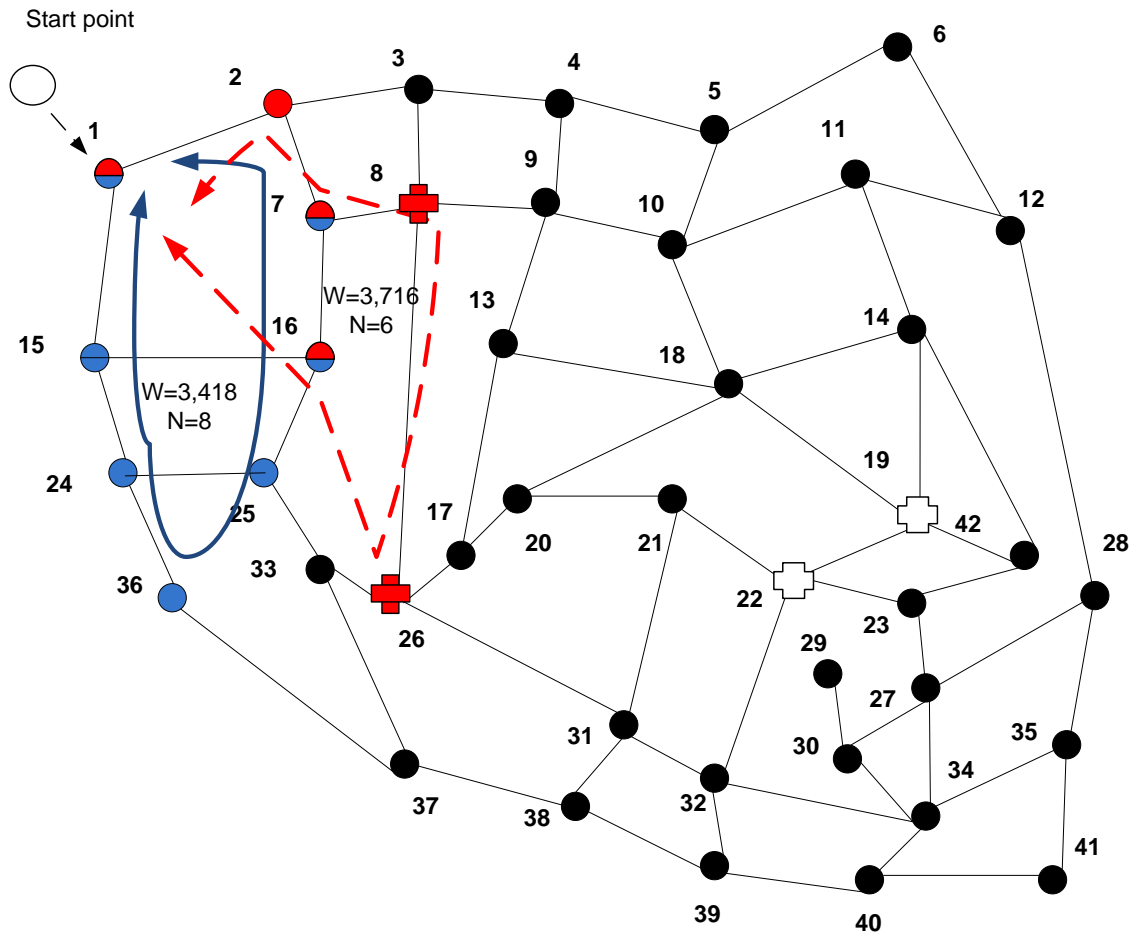


Рисунок 5.13 – Моделювання маршрутів

Приріст ваги виявлених об’єктів для системи статичних об’єктів для двох методів представлено на рисунку 5.14.

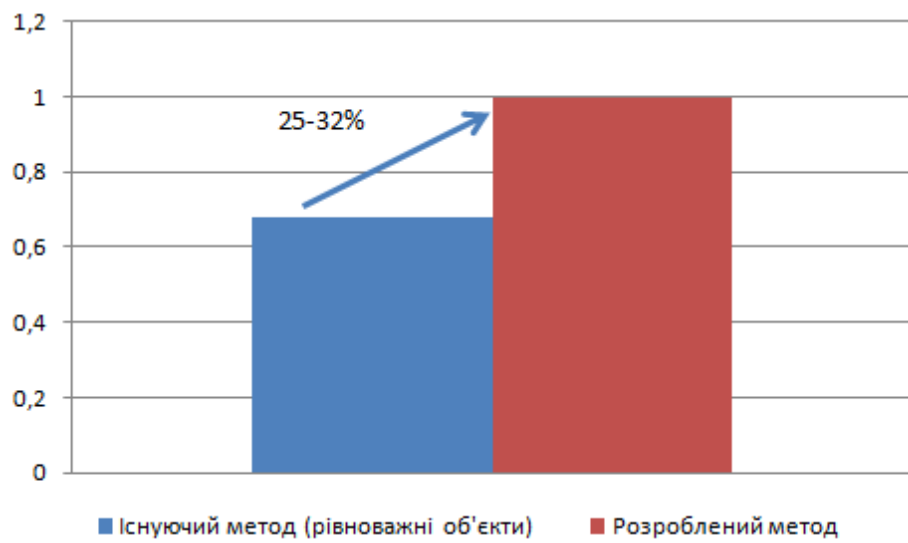


Рисунок 5.14 – Приріст ваги виявлених стаціонарних об’єктів з використанням розробленого методу

Висновки до п'ятого розділу

1. Розроблене інтегроване середовище СППР забезпечує підтримку всіх етапів по створенню інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень і адаптації їх для рішення прикладних задач для планування дій БПЛА. СППР забезпечує рішення завдання аналізу, діагностики, оцінювання і розпізнавання ситуацій, прогнозування розвитку подій, допомагають вибрати найкращі рішення в залежності від виниклої ситуації, супроводжують етапи реалізації рішень, формують управляючі впливи.

2. Розроблена структура комплексу задач планування маршрутів польоту БПЛА, яку доцільно застосувати при створенні автоматизованої системи управління розрахунками БПЛА.

3. Оцінена ефективність методу автоматизованого планування маршрутів польотів БПЛА для пошуку динамічних об'єктів, що дозволило підвищити ефективність виявлення таких типів об'єктів на 65-70% (порівняно з існуючими способами "сліпого" пошуку) за результатами чисельного експерименту.

4. Оцінена ефективність методу автоматизованого планування маршрутів БПЛА для пошуку стаціонарних об'єктів за показником ваги виявлених (підтверджених) об'єктів, що дозволило підвищити ефективність пошуку на 25-32% (за результатами моделювання).

ВИСНОВКИ

У результаті дисертаційних досліджень, виконаних автором, вирішена актуальне науково-технічне завдання розробки методів та інформаційної технології автоматизованого планування маршрутів польотів БПЛА для підвищення ефективності пошуку об'єктів.

У дисертації одержані такі основні результати:

1. Удосконалений метод автоматизованого планування маршруту польоту БПЛА для пошуку динамічного об'єкту, який на відміну від існуючих враховує невизначеність в діях протилежної сторони, формує варіанти прогнозу руху, оцінює вразливість динамічного об'єкту на кожному з варіантів можливих маршрутів їх руху, що дозволяє знизити невизначеність інформації про дані маршрути і сформувати раціональний маршрут моніторингу об'єктів спостереження;

2. Удосконалений метод автоматизованого планування маршруту польоту БПЛА для пошуку стаціонарних об'єктів, що на відміну від існуючих враховує зв'язаність структури стаціонарних об'єктів на різних топологічних рівнях та дозволяє оцінити важливість даного типу об'єктів в загальній структурі;

3. Отримала подальший розвиток інформаційна технологія автоматизованого планування дій БПЛА, яка, на відміну від існуючих враховує результати розпізнавання об'єктів, що дозволяє в реальному часі змінювати маршрут польоту при виконанні місії БПЛА..

4. Розроблені й вдосконалені моделі та методи мають якісно нові властивості і дозволяють вирішити поставлене наукове завдання.

5. Достовірність результатів досліджень, сформульованих в дисертаційній роботі, підтверджуються експериментальними дослідженнями, які досить близькі з результатами теоретичних досліджень. Обґрунтованість отриманих результатів досліджень забезпечується коректним використанням

математичного апарату, аналізом умов та факторів, які впливають на процес планування дій БПЛА, сучасним станом безпілотної авіації, ретельним аналізом результатів основних теоретичних досліджень як вітчизняних, так і закордонних авторів. Основні наукові результати мають чітке практичне застосування, що підтверджується актами.

6. Реалізація удосконаленого методу автоматизованого планування маршруту польоту БПЛА для пошуку динамічного об'єкту в системі підтримки прийняття рішення дозволила підвищити ймовірність виявлення об'єктів в лісисто-степовій місцевості на 65-70%.

7. Реалізація методу автоматизованого планування маршруту польоту БПЛА для пошуку стаціонарних об'єктів в системі підтримки прийняття рішення дозволяє отримати прогноз розташування стаціонарних об'єктів по критерію стійкості складної системи, обґрунтувати вагу об'єктів та провести оптимізацію, що підвищує вагу виявлених об'єктів на 25-32%.

8. Реалізація інформаційної технології автоматизованого планування дій БПЛА дозволяє оперативно змінювати маршрут в процесі виконання місії за розпізнаними зображеннями, сформувати архітектуру перспективної інтелектуальної СППР для планування застосування БПЛА.

9. Результати проведених досліджень доцільно використовувати для рішення науково-практичних задач планування маршрутів польоту БПЛА для пошуку динамічних та стаціонарних об'єктів, розвитку систем підтримки прийняття рішення та автоматизованих систем управління авіацією.

10. Напрямами подальших досліджень є розробка моделей та методів інтелектуального управління колективами БПЛА.

Отже, сукупність одержаних у дисертації наукових результатів, позитивна оцінка їх достовірності, наукової та практичної значущості дозволяють вважати сформульоване науково-технічне завдання *вирішеним*, а поставлену мету, яка полягала у підвищенні ефективності пошуку динамічних та стаціонарних об'єктів безпілотними літальними апаратами, – *досягнутою*.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Настоящее и будущее беспилотной авиации. Часть 1. Военное обозрение. 2016. 25 янв. URL: <https://topwar.ru/89642-nastoyaschee-i-budushee-bespilotnoy-aviacii-chast-1.html> (дата обращения: 14.01.2020).
2. Настоящее и будущее беспилотной авиации. Часть 2. Военное обозрение. 2016. 28 янв. URL: <https://topwar.ru/89909-nastoyaschee-i-budushee-bespilotnoy-aviacii-chast-2.html> (дата обращения: 14.01.2020).
3. Полтавский А. В. Беспилотные летательные аппараты в системе вооружения. *Научный вестник МГТУ ГА*. 2011. № 163. С. 163-170.
4. Цимбалістова О. А. Розвиток ринку послуг безпілотних літальних апаратів як основний напрямок інноваційного прогресу сучасної авіації. *Економічний аналіз* : зб. наук. пр. 2015. Т. 19, № 1. С. 116-122.
5. Станкевич С. А., Васько А. В. Застосування сучасних технологій аерокосмічного знімання в аграрній сфері. *Наукові аспекти геодезії, землеустрою та інформаційних технологій* : матеріали наук.-практ. конф. Київ, 2011. С. 44–50.
6. Chen J., Zongjian L., Xiaojing W., Yongrong L. Application of UAV system for low altitude photogrammetry in Shanxi. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* : XXII ISPRS Congress, Melbourne, 25.08.2012-01.09.2012. Melbourne, 2012. P. 351–354.
7. Радецький В. Г., Руснак І. С., Даник Ю. Г. Безпілотна авіація в сучасній збройній боротьбі : монографія. Київ : НАОУ, 2008. 224 с.
8. Королюк Н. А., Еременко С. Н. Интеллектуальная система поддержки принятия решений при управлении беспилотными летательными аппаратами на наземном пункте управления. *Системы обработки информации*. 2015. № 8 (133). С. 31–36.
9. Бурый А. С., Шевкунов М. А. Подход к построению систем поддержки принятия решений при управлении беспилотными летательными аппаратами. *Транспортное дело России*. 2015. № 6. С. 22–26.

10. Чернавина О. Е. Методика обоснования рационального решения на ведение воздушной разведки незаконных вооруженных формирований в лесистой местности. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2010. № 2 (4). С. 49–54.

11. Yan Jin, Yan Liao, Minai A. A., Polycarpou M. M. Balancing Search and Target Response in Cooperative Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Teams. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*. 2006. Vol. 36, № 3. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1634650/citations?tabFilter=papers#citations> (Date of access: 15.01.2020).

12. Shreyamsh Kamate, Nuri Yilmazer. Application of Object Detection and Tracking Techniques for Unmanned Aerial Vehicles. *Procedia Computer Science*. 2015. № 61. P. 436–441.

13. Plastiras G., Kyrkou C., Theocharides T. Efficient ConvNet-based Object Detection for Unmanned Aerial Vehicles by Selective Tile Processing. *ICDSC '18 : Proceedings of the 12th International Conference on Distributed Smart Cameras*, Eindhoven, 2018. September 2018. № 3. P.1–6. URL: <https://doi.org/10.1145/3243394.3243692> (Date of access: 15.01.2020).

14. Таран И. А., Тристан А. В., Паталаха В. Г. Методика определения рационального маршрута полета летательного аппарата с использованием динамического программирования. *Вестник военного института Национальной гвардии Республики Казахстан*. 2015. № 3 (17). С. 34–42.

15. Jilkov V. P., Li X. R., DelBalzo D. Best combination of multiple objectives for UAV search & track path optimization. *10th International Conference on Information Fusion*, Quebec, 9-12 July 2007. Quebec, 2007. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4408202> (Date of access: 15.01.2020).

16. Інформаційно-аналітична система тестування та оцінювання студентів факультету ІТС в системі дистанційного навчання : звіт про НДР (проміжний) / Харків. нац. ун-т Повітряних Сил; кер. І.В. Ільїна ; викон.: Ю.О. Семеренко [та ін.]. Шифр теми "Матриця". № 1116. Харків, 2019. 211 с.

17. Антонов А. В. Системный анализ. Москва : Высш. шк. 2004. 454 с.

18. Тарасенко Ф. П. Прикладной системный анализ. Москва : Кнорус, 2010. 224 с.
19. Роїк О. М., Шиян А. А, Нікіфорова Л. О. Системний аналіз. Вінниця : ВНТУ, 2015. 83 с.
20. Ким Д. П. Методы поиска и преследования подвижных объектов. Москва : Наука, 1989. 336 с.
21. Петросян Л. А., Рахсиев Б. Б. Преследование на плоскости. Москва : Наука, 1991. 96 с.
22. Черноусько Ф. Л., Меликян А. А. Игровые задачи управления и поиска. Москва : Наука, 1978. 270 с.
23. Романова С. С. Моделирование и оптимизация систем : учеб.-практ. пособие. Москва : МГСУ, 2012. 76 с.
24. Теоретичні основи формування та деградації складних організаційно-технічних систем : монографія / Є. Б. Смірнов. [та ін.] ; ХНУРЕ. Харків: ХНУРЕ, 2018. 162 с.
25. Casti J. L. Dynamical Systems and their Applications: Linear Theory. New York : Academic Press, 1977. 240 p.
26. Johnson R., Barton G. Structural analysis and the development of feedback control schemes. *Computers and chemical engineering*. 1985. Vol. 9. P. 547–555.
27. Шафаревич И. Р. Основы алгебраической геометрии. Москва : МЦНМО, 2007. 590 с.
28. Джон Касти. Большие системы, связность, сложность и катастрофы / пер. с англ. Ю. П. Гупало. Москва : Мир, 1982. 216 с.
29. Харари Ф. Теория графов. Москва : Либроком, 2009. 302 с.
30. Алексеев В. Е., Таланов В. А. Графы и алгоритмы. Структуры данных. Модели вычислений. Москва : Бином. Лаборатория знаний, 2006. 320 с.
31. Райгородский А. М. Экстремальные задачи теории графов и Интернет : учеб. пособие. Москва : Интеллект, 2012. 104 с.

32. Урубков А. Р., Федотов И. В. Методы и модели оптимизации управленческих решений : уч. пособие. Москва : Дело АНХ, 2011. 240 с.
33. Черноруцкий И. Г. Методы оптимизации и принятия решений : учеб. пособие. СПб. : Лань, 2001. 384 с.
34. Юдин Д. Б. Вычислительные методы теории принятия решений. Москва : Либроком, 2013. 320 с.
35. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход. Москва : Вильямс, 2006. 1408 с.
36. Сидоркина И. Г. Системы искусственного интеллекта. Москва : КноРус, 2011. 248 с.
37. Буч Г. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений на C++ / пер. с англ. Г. Буч. Москва : “Издательство Бином”, 2000. 560 с.
38. Буч Г. Язык UML. Руководство пользователя / пер. с англ. Буч Г., Рамбо Д., Джекобсон А. Москва : ДМК, 2000. 432 с.
39. Ипатова Э. Р. Методологии и технологии системного проектирования информационных систем. Москва : Флинта, 2008. 256 с.
40. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. Москва : Высш. шк. 2010. 480 с.
41. Абчук В. А., Суздаль В. Г. Поиск объектов. Москва : Советское радио, 1977. 336 с.
42. Stone L. D. Necessary and Sufficient Conditions for Optimal Search Plans for Moving Targets. *Mathematics of Operations Research*. 1979. Vol. 4, № 4. URL: <https://doi.org/10.1287/moor.4.4.431> (Date of access: 15.01.2020).
43. Stone L.D., Stanshine J. A. Persinger C. A. Optimal search in the presence of Poisson-distributed false targets. *SIAM J. on Appl. Math.* 1972. Vol. 23, № 1. P. 6–27.
44. Dobbie J. M. A Survey of Search Theory. *Operations Research*. 1968. Vol. 16, № 3. URL: <https://doi.org/10.1287/opre.16.3.525> (Date of access: 15.01.2020).

45. Dobbie J. M. A two-cell model of search for a moving target. *Operations Research*. 1974. Vol. 22, № 1. URL: <https://whatis.techtarget.com/search/query?q> (Date of access: 15.01.2020).
46. Koopman B. O. The Theory of Search: I Kinematic Bases. *Operations Research*. 1955. Vol. 4, № 3. P. 324–346.
47. Koopman B. O. The Theory of Search: II. Target Detection. *Operations Research*. 1956. Vol. 4, № 4. URL: <https://doi.org/10.1287/opre.4.5.503> (Date of access: 15.01.2020).
48. Koopman B. O. The Theory of Search III. The Optimum Distribution of Searching Efforts. *Operations Research*. 1957. Vol. 5, № 5. URL: <https://doi.org/10.1287/opre.5.5.613> (Date of access: 15.01.2020).
49. Миркин Б. Г. Методы кластер-анализа для поддержки принятия решений. Москва : изд. дом «Высшая школа экономики», 2011. 711 с.
50. Снитюк В. Е. Эволюционные технологии принятия решений в условиях неопределенности : дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.06. Киев, 2009. 305 с.
51. Мелехов А. Н., Берштейн Л. С., Коровин С. Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. Москва : Наука, 1990. 272 с.
52. Герасимов Б. М., Дивизинюк М. М., Субач И. Ю. Системы поддержки принятия решений: проектирование, применение, оценка эффективности. Севастополь : МО Украины, НАН Украины, НИЦ ВС Украины “Государственный океанариум”, 2004. 318 с.
53. Редько В. Г. Моделирование когнитивной эволюции. На пути к теории эволюционного происхождения мышления. Москва : Ленанд, 2015. 256 с.
54. Чернавина О. Е. Методика обоснования рационального решения на ведение воздушной разведки незаконных вооруженных формирований в лесистой местности. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2010. № 2(4). С. 49-54.
55. Тристан А. В., Бережний А. О. Метод автоматизованого планування маршруту польоту безпілотного літального апарату для пошуку динамічного

об'єкту. *Вісник інженерної академії України*. Київ, 2019. Вип. 4 (34). С. 67-72.

56. Бережний А.О., Крижанівський І.М., Барабаш О.В. Метод автоматизованого планування маршрутів безпілотних літальних апаратів з урахуванням виявлення стаціонарних об'єктів. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. Київ, 2019. Вип. 4(65). С. 90-98. DOI:10.31673/2412-4338.2019.049098.

57. Berezhnyi A., Trystan A., Lavrov O. Information technology of automatic detection and identification of stationary objects with unmanned aerial vehicles. *Сучасні інформаційні системи*. Харків, 2020. Вип. 4(1). С. 5-10. DOI:10.20998/2522-9052.2020.

58. Бережний А.О., Калачова В.В., Рожков М.І. Моделювання руху динамічних об'єктів в системі підтримки прийняття рішень планування маршрутів безпілотних літальних апаратів. *Системи обробки інформації*. Харків, 2019. Вип. 4(159). С. 44-49. DOI:10.30748/soi.2019.159.05.

59. Бережний А. О., Крижанівський І. М.. Комплекс задач системи підтримки прийняття рішення на планування маршрутів польотів безпілотних літальних апаратів. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*. Полтава, 2020. Вип. 1(59). С. 3-6. DOI:10.26906/SUNZ.2020.1.003.

60. Бережний А. О., Сорока М.Ю., Сало Н.А. Методи рішення завдань планування поведінки агентів в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. Харків, 2019. Вип. 4(62). С. 18-24. DOI:10.30748/zhups.2019.62.02.

61. Генев Б.А., Бережний А.О. Проблемні питання та можливі напрямки підвищення ефективності організації міжвидової взаємодії під час виконання завдань за призначенням. *Новітні технології – для захисту повітряного простору* : зб. тез доп. XIII міжнар. наук. конф., м. Харків, 12-13 квіт. 2017 р. Харків, 2017. С. 27.

62. Тристан А.В., Бережний А.О., Аркушенко П.Л. Сценарний аналіз в пошуку доцільних варіантів організації та здійснення взаємодії. *Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах* : зб. тез доп. XVIII наук.-тех. конф., м. Чернігів, 6-7 вер. 2018 р. Чернігів, 2018. С. 283.

63. Тристан А.В., Бережний А.О. Метод сценарного прогнозування та моделювання при обґрунтуванні доцільних варіантів проведення операції. *Актуальні питання забезпечення службово-бойової діяльності військових формувань та правоохоронних органів* : зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Харків, 31 жовт. 2018 р. Харків, 2018. С. 164.

64. Тристан А.В., Бережний А.О., Крижанівський І.М. Математичні моделі та методи планування повітряної розвідки рухомих й стаціонарних об'єктів з застосуванням безпілотних літальних апаратів. *Проблеми інформатизації* : тези доп. 7-ї міжнар. наук.-техн. конф., м. Черкаси, м. Харків, м. Баку, м. Бельсько-Бяла [у 3 т.], 13-15 лист. 2019. Черкаси – Харків – Баку – Бельсько-Бяла, 2019. Т. 3. С.41.

65. Перспективы развития и применения комплексов с беспилотными летательными аппаратами: доклады и статьи ежегодной научно-практической конференции, Коломна : 924 Государственный центр беспилотной авиации Министерства Обороны Российской Федерации, 2016. 274 с.

66. Павлушенко М., Евстафьев Г., Макаренко И. Беспилотные летательные аппараты: история, применение, угроза распространения и перспективы развития. Москва : Права человека, 2005. 611 с.

67. Кобрина Н. В., Ключко Т.А. Применение беспилотных авиационных комплексов для решения экологических задач. *Экология и промышленность*. 2014. № 1 (38). С. 88-90.

68. Unmanned vehicles. Handbook 2017. Burnham : Shephard press, 2017. 278 p.

69. Жарик О. М. Досвід використання безпілотних авіаційних комплексів для виконання бойових (спеціальних) завдань в арабо-

ізраїльських війнах та збройних конфлікта. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*. 2013. Вип. 1 (34). С. 5-15.

70. Carr E. *Unmanned Aerial Vehicles: Examining the Safety, Security, Privacy and Regulatory Issues of Integration into U.S. Airspace*. Dallas, 2012. 44 p.

71. Збруцький О. В., Масько О. М., Сухов В. В. Безпілотні літальні апарати контейнерного старту: сучасний стан і напрямки досліджень. *Вісник НТУУ "КПІ". Машинобудування* : зб. наук. пр. 2012. № 64. С. 47–55.

72. Гэри В., Джонсон Д. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи. Москва : Мир, 1982. 416 с.

73. Сигал И. Х., Иванова А. П. Введение в прикладное дискретное программирование: модели и вычислительные алгоритмы. Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2003. 240с.

74. Durbana Habib, Habibullah Jamal, Shoab A. Khan. Employing Multiple Unmanned Aerial Vehicles for Co-Operative Path Planning. *International Journal of Advanced Robotic System*. 2013. Vol. 1. URL: <https://doi.org/10.5772/56286> (Date of access: 15.01.2020).

75. Mustapha Bekhti, Marwen Abdennebi, Nadjib Achir, Khaled Boussetta. Path Planning of Unmanned Aerial Vehicles With Terrestrial Wireless Network Tracking. *Wireless Days (WD)*, Toulouse, 23-25 March 2016. Toulouse, 2016. P. 1–6.

76. Ceccarelli N., Enright J. J., Frazzoli E., Rasmussen S. J., Schumacher C. J. Micro UAV Path Planning for Reconnaissance in Wind. *2007 American Control Conference*, New York, 9-13 July 2007. New York, 2007. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4282479> (Date of access: 15.01.2020).

77. Беспилотные летательные аппараты. Основы устройства и функционирования / под ред. И. С. Голубева, И. К. Туркина. Москва : Изд-во МАИ, 2008. 656 с.

78. Дмитриевский А. А., Лысенко Л. Н. Прикладные задачи теории оптимального управления движением беспилотных летательных аппаратов. Москва : Машиностроение, 1978. 328 с.

79. Янкевич Ю. Применение беспилотных авиационных комплексов в гражданских целях. *Аэрокосмический курьер*. 2006. № 6. С. 55-57.

80. Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В. Интеллектуальные системы управления беспилотными летательными аппаратами на основе комплексного применения технологий нечеткой логики и ассоциативной памяти. // *Авиакосмическое приборостроение*. 2002. № 2. С. 29-36.

81. Моисеев В. С. Российская беспилотная авиационная техника: основные проблемы и пути решения : *X Научны чтения, посвященные памяти Н. Е. Жуковского* : материалы Всероссийской науч.-техн. конф. Москва : Изд-во Академии им. Н. Е. Жуковского, 2013. С. 554-559.

82. Моисеев В. С. Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами : монография. Казань : ГБУ РЦМКО, 2013. 768 с.

83. Гимадеев Р. Г., Моисеев В. С., Арутюнова Н. К. Обратные задачи управления беспилотными летательными аппаратами артиллерийской разведки. Казань : ГБУ РЦМКО, 2013. 245 с.

84. Башилов А. М., Королев В. А., Можаяев К. Ю. Перспективы использования дронов в реализациях новейших агротехнологий. *Вестник ВИЭСХ*. 2016. № 4 (25). С. 68–75.

85. Бикбулатова Г. Г., Гарагуль А. С., Громов М. О. Применение GNSS и беспилотных летательных аппаратов в точном земледелии. *Актуальные проблемы и перспективы развития геодезии, землеустройства и кадастра недвижимости в условиях рыночной экономики* : материалы Нац. науч.-практ. конф. ФГБОУ ВО Омский ГАУ. Омск : Изд-во ИП Макшеевой Е.А., 2017. С. 14–17.

86. Быков В. Л., Быков Л. В., Новородская М. В., Пушак О. Н., Шерстнева С. И. Применение данных дистанционного зондирования для информационного обеспечения системы точного земледелия. *Вестник Омского государственного аграрного университета*. 2016. № 1 (21). С. 146–154.

87. UAVs challenge to assess water stress for sustainable agriculture / J. Gago et al. *Agricultural Water Management*. 2015. Vol. 153. P. 9–19.

88. Застосування БПЛА для визначення стану врожайності полів при плануванні збиральних робіт / С. А. Шворов та ін. *Енергетика і автоматика*. 2018. № 4. С. 29–36.

89. Kemeny J. Two measures of complexity. *The journal of philosophy*. 1955. Vol. 52, № 24. P. 722–733.

90. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. Москва : Изд-во иностранной литературы, 1963. 830 с.

91. Рэндал У. Биард, Тимоти У. МакЛэйн. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика. Москва : Техносфера, 2015. 312 с.

92. Моисеев В. С., Гущина Д. С., Моисеев Г. В. Основы теории создания и применения информационных авиационных комплексов : монография. Казань : Изд-во МОиН РТ, 2010. 196 с.

93. Евдокименков В. Н., Красильщиков М. Н., Оркин С. Д. Управление смешанными группами пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов в условиях единого информационно-управляющего поля. Москва : Изд-во МАИ, 2015. 272 с.

94. Комплексы с беспилотными летательными аппаратами / К. А. Злотников и др. : в 2-х т. Москва : Радиотехника, 2016. Т. 1. 824 с.

95. Ефимов А. В. Планирование полета беспилотного летательного аппарата при мониторинге наземной обстановки в заданном регионе с учетом воздействия бокового ветра : дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.13.01 / МАИ. Москва, 2012. 118 с.

96. Моисеев Д. В., Чинь В. М. Маршрутизация полета легкого беспилотного летательного аппарата в поле постоянного ветра с учетом ограничения на продолжительность полета. *Мехатроника, Автоматизация, Управление*. 2016. № 3. С. 206–210.

97. Моисеев Д. В., Чинь В. М., Моисеева С. Г., Фам С. К. Маршрутизация облета легким беспилотным летательным аппаратом неравноценных объектов в поле постоянного ветра с учетом ограничения на время полета по маршруту. *Авиация и космонавтика* : тезисы докл. 14-ой междунар. конф. : 16–20 нояб. 2015 г. Москва, 2015. URL:

https://mai.ru/upload/iblock/897/tezis_aik_2015.pdf (Дата обращения: 15.01.2020).

98. Shreyamsh Kamate, Nuri Yilmazer. Application of Object Detection and Tracking Techniques for Unmanned Aerial Vehicles. *Procedia Computer Science*. 2015. Vol. 61, P. 436–441.

99. Крылов И. Г. Разработка информационной технологии организации согласованных действий группы беспилотных летательных аппаратов при поиске мобильных наземных объектов : дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук по спец. 05.13.01 / МАИ. Москва, 2012. 143 с.

100. Saif A. F. M. S., Prabuwno A. S., Mahayuddin Z. R. Moving Object Detection Using Dynamic Motion Modelling from UAV Aerial Images. *The Scientific World Journal*. 2014. Vol. 2014. 12 p. URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/890619> (Date of access: 15.01.2020).

101. Musab Coúkuna, Sencer Ünala. Implementation of Tracking of a Moving Object Based on Camshift Approach with a UAV. *Procedia Technology*. 2016. № 22. P. 556–561.

102. Waharte S., Symington A., Trigoni N. Probabilistic Search with Agile UAVs. *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Anchorage, 3-7 May 2010. Anchorage, 2010. DOI: 10.1109/ROBOT.2010.5509962 (Date of access: 15.01.2020).

103. Delle Fave F. M., Zhe Xu, Rogers A., Jennings N. R. Decentralised Coordination of Unmanned Aerial Vehicles for Target Search using the Max-Sum Algorithm. *AAMAS 2010 Workshop on Agents in Real Time and Environment*, Toronto, 10-14 May 2010. Toronto, 2010. P. 35–44.

104. Min-Hyuck Lee, Seokwon Yeom. Detection and Tracking of Multiple Moving Vehicles with a UAV. *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*. 2018. Vol. 18, № 3. P. 182–189.

105. Takahiro Miki, Popovic M., Gawel A., Hitz G., Siegwart R. Multi-agent Time-based Decision-making for the Search and Action Problem. *International Conference on Robotics & Automation*, Singapore, 2017. Singapore, 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1802.10147.pdf> (Date of access: 15.01.2020).

106. Coutinho W. P., Fliege J., Battarra M. The Unmanned Aerial Vehicle Routing and Trajectory Optimisation Problem. *Computers and Industrial Engineering*. 2018. Vol. 120, P. 116–128. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.04.037>(Date of access: 15.01.2020).

107. Норсеев С. А. Алгоритмы предполетного квазиоптимального определения маршрутов группы беспилотных летательных аппаратов : дис. ... канд. ... техн. наук: 05.13.01. Ковров, 2016. 182 с.

108. Joel G., Sujit P. B., Sousa J. B. Search Strategies for Multiple UAV Search and Destroy Missions. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2011. Vol. 61, Iss. 1–4. P. 355–367.

109. Teichmann D., Dorda M., Vitek J., Smrž V., Michalík V. Unmanned aerial vehicles routing problem. *Proceedings of the 2014 15th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, Velke Karlovice, 28-30 May 2014. Velke Karlovice, 2014. DOI: 10.1109/CarpathianCC.2014.6843676 (Date of access: 15.01.2020).

110. Pitre R. R., Li X. R., Delbalzo R. UAV Route Planning for Joint Search and Track Missions – An Information-Value Approach. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2012. Vol. 48, Iss. 3. P. 2551–2565. DOI: 10.1109/TAES.2012.6237608 (Date of access: 15.01.2020).

111. Il-Kyu Ha, You-Ze Cho. A Probabilistic Target Search Algorithm Based on Hierarchical Collaboration for Improving Rapidity of Drones. *Sensors*. 2018. Vol. 18, № 8. P. 2535. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6111375/> (Date of access: 15.01.2020).

112. Qiwang Huang, Jian Yao, Qun Li, Yifan Zhu. Cooperative Searching Strategy for Multiple Unmanned Aerial Vehicles Based on Modified Probability Map. *Theory, Methodology, Tools and Applications for Modeling and Simulation of Complex Systems: 16th Asian Simulation Conference and SCS Autumn Simulation Multi-Conference*, Beijing, 8-11 October 2016. P. 279-287. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-2666-9_27 (Date of access: 15.01.2020).

113. Выбор показателей и критериев для оценки эффективности ведения воздушной разведки по выявлению НВФ / В. П. Городнов та ін. *Наука і техніка Повітряних Сил*. 2012. Вип. 1 (7). С. 58-62.

114. Скобцов Ю. А., Федоров Е. Е. *Метаэвристики* : монографія. Донецк : Ноулідж, 2013. 426 с.

115. Чинь Ван Минь. Планирование маршрута полета легкого беспилотного летательного аппарата с учетом действия ветра, дис. ... канд. техн. наук: 05.13.0. Москва : МАИ, 2017. – 119 с.

116. Кочкаров А. А. Новые теоретико-графовые подходы в моделировании сложных систем : дис. ... канд. ф-м. наук: 05.13.18 / РГБ. Москва, 2005. 128 с.

117. Тристан А. В., Бережний А. О., Гурін О. М. Теоретико-графовий метод аналізу стійкості структури складних організаційно-технічних систем. *Честь і закон*. 2018. Вип. 3 (66). С.40-44.

118. Тристан А. В., Немченко С. В., Бусигін Ю. Г. До питання використання методу аналізу зв'язності структури складних систем для розв'язування задач планування вогневого ураження об'єктів противника. *Системи обробки інформації*. 2011. № 8. С. 102—105.

119. Кашаев О. Ю. Полиэдральный подход к анализу роли элементов структурно сложных систем. *Новые информационные технологии*. Москва : МГАПИ, 2001. 184 с.

120. Макаровских Т. А. Построение маршрутов с ограничениями на порядок обхода ребер в плоских графах: алгоритмы и программное обеспечение : дис. ... докт.. ф-мат. наук: 05.13.17 / Челябинск, 2016. 511 с.

121. Сообщество TSP. 06.09.2019. URL: <http://www.math.uwaterloo.ca/tsp/concorde/downloads/downloads.htm> (дата обращения: 15.01.2020).

122. Маторин С. И. Анализ и моделирование бизнес-систем: системологическая объектно-ориентированная технология. Харьков : ХНУРЭ, 2002. 322 с.

123. Тимочко А. И., Олизаренко С. А., Лавров О. Ю. Метод дешифрирования аэроснимков на основе признакового пространства. *Системи обробки інформації*. 2015. Вип. 1 (126). С. 84-87.

124. Олизаренко С. А., Лавров О. Ю., Капранов В. А., Методика формирования платформы для моделирования глубокого обучения в интересах разработки систем автоматизированного дешифрирования аэрофотоснимков. *Системи обробки інформації*. 2016. Вип. № 9 (146). С.41-43.

125. Олизаренко С. А. Розробка функціональної моделі процесу створення бази знань про розпізнавання об'єктів і дій противника на основі нейромереж та нечіткої логіки. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2017. № 1 (50). С. 58-62.

126. Сидоркина И. Г. Системы искусственного интеллекта. Москва : КноРус, 2011. 248 с.

ДОДАТОК А

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

А.1 Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

7. Бережний А.О., Крижанівський І.М., Барабаш О.В. Метод автоматизованого планування маршрутів безпілотних літальних апаратів з урахуванням виявлення стаціонарних об'єктів. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. Київ, 2019. Вип. 4(65). С. 90–98. DOI:10.31673/2412-4338.2019.049098.

8. Berezhnyi A., Trystan A., Lavrov O. Information technology of automatic detection and identification of stationary objects with unmanned aerial vehicles. *Сучасні інформаційні системи*. Харків, 2020. Вип. 4(1). С. 5–10. DOI:10.20998/2522-9052.2020.

9. Бережний А.О., Калачова В.В., Рожков М.І. Моделювання руху динамічних об'єктів в системі підтримки прийняття рішень планування маршрутів безпілотних літальних апаратів. *Системи обробки інформації*. Харків, 2019. Вип. 4(159). С. 44–49. DOI:10.30748/soi.2019.159.05.

10. Бережний А. О., Крижанівський І. М.. Комплекс задач системи підтримки прийняття рішення на планування маршрутів польотів безпілотних літальних апаратів. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*. Полтава, 2020. Вип. 1(59). С. 3–6. DOI:10.26906/SUNZ.2020.1.003.

11. Бережний А. О., Сорока М.Ю., Сало Н.А. Методи рішення завдань планування поведінки агентів в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. Харків, 2019. Вип. 4(62). С. 18–

24. DOI:10.30748/zhups.2019.62.02.

12. Тристан А. В., Бережний А. О. Метод автоматизованого планування маршруту польоту безпілотного літального апарату для пошуку динамічного об'єкту. *Вісник інженерної академії України*. Київ, 2019. Вип. 4 (34). С. 67–72.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

5. Генів Б.А., Бережний А.О. Проблемні питання та можливі напрямки підвищення ефективності організації міжвидової взаємодії під час виконання завдань за призначенням. *Новітні технології – для захисту повітряного простору* : зб. тез доп. XIII міжнар. наук. конф., м. Харків, 12-13 квіт. 2017 р. Харків, 2017. С. 27.

6. Тристан А.В., Бережний А.О., Аркушенко П.Л. Сценарний аналіз в пошуку доцільних варіантів організації та здійснення взаємодії. *Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах* : зб. тез доп. XVIII наук.-тех. конф., м. Чернігів, 6-7 вер. 2018 р. Чернігів, 2018. С. 283.

7. Тристан А.В., Бережний А.О. Метод сценарного прогнозування та моделювання при обґрунтуванні доцільних варіантів проведення операції. *Актуальні питання забезпечення службово-бойової діяльності військових формувань та правоохоронних органів* : зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Харків, 31 жовт. 2018 р. Харків, 2018. С. 164.

8. Тристан А.В., Бережний А.О., Крижанівський І.М. Математичні моделі та методи планування повітряної розвідки рухомих й стаціонарних об'єктів з застосуванням безпілотних літальних апаратів. *Проблеми інформатизації* : тези доп. 7-ї міжнар. наук.-техн. конф., м. Черкаси, м. Харків, м. Баку, м. Бельсько-Бяла [у 3 т.], 13-15 лист. 2019. Черкаси – Харків – Баку – Бельсько-Бяла, 2019. Т. 3. С.41.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

3. Інформаційно-аналітична система тестування та оцінювання студентів факультету ІТС в системі дистанційного навчання : звіт про НДР (проміжний) / Харків. нац. ун-т Повітряних Сил; кер. І.В. Ільїна ; викон.: Ю.О. Семеренко [та ін.]. Шифр теми “Матриця”. № 1116. Харків, 2019. 211 с.

4. Тристан А.В., Бережний А.О., Гурін О.М. Теоретико-графовий метод аналізу стійкості структури складних організаційно-технічних систем. *Честь і закон*. 2018. Вип. 3 (66). С.40–44.

А.2 Відомості про апробацію результатів дисертації

Апробація результатів дисертації була проведена на:

Тринадцятій науковій конференції "Новітні технології – для захисту повітряного простору" 12-13 квітня 2017 р. у Харківському національному університеті Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, участь з доповіддю.

Вісімнадцятій науково-технічній конференції Державного науково-випробувального центру ЗС України "Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах" 6-7 вересня 2018 р, м. Чернігів, доповідь та її тези подано дистанційно.

Міжнародній науково-практичній конференції "Актуальні питання забезпечення службово-бойової діяльності військових формувань та правоохоронних органів" 31 жовтня 2018 р. у Національному університеті Національної гвардії України, м. Харків, участь з доповіддю;

Сьомій міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми інформатизації" 13-15 листопада 2019 р., Черкаси – Харків – Баку – Бельсько-Бяла, доповідь та її тези подано дистанційно.

ДОДАТОК Б

Основні типи безпілотних літальних апаратів та їх тактико-технічні характеристики

Безпілотний авіаційний комплекс (БпАК) RQ-11A “Raven” – малий розвідувальний безпілотний авіаційний комплекс розроблений компанією “AeroVironment” (США).

Модифікації: “Flashlight” SUAV (дослідний зразок), Block I Raven , RQ-11A , RQ-11B, RQ-11B DDL, Solar Raven.



Рисунок Б.1 – Безпілотний авіаційний комплекс RQ-11A “Raven”

Таблиця Б.1 – Тактико-технічні характеристики безпілотного авіаційного комплексу RQ-11A “Raven”

Тактико-технічні характеристики	RQ-11A “Raven”
Довжина, мм	915
Розмах крила, мм	1500
Максимальна злітна маса, кг	1,9
Максимальна швидкість, км/год	95
Крейсерська швидкість, км/год	70
Максимальна висота, м	5000
Радіус дії, км	10
Тривалість польоту, хв.	60-90
Тип двигуна	електричний
Спосіб старту та посадки	ручний
Система навігації	GPS

БпАК PD-1 “TOP” призначений для ведення аерофото- і відеозйомки об’єктів противника та контролю над його переміщенням. Виробник: всеукраїнський центр волонтерів “Народний проект” та “UkrSpecSystems”. Комплекс розрахований на автономне функціонування з потребою виконання зльоту та посадки на спеціально підготовлених злітно-посадкових смугах.



Рисунок Б.2 – Безпілотний авіаційний комплекс PD-1 “TOP”

Таблиця Б.2 – Тактико-технічні характеристики безпілотного авіаційного комплексу PD-1 “TOP”

Тактико-технічні характеристики	PD-1 “TOP”
Довжина, мм	2540
Розмах крила, мм	3190
Максимальна злітна маса, кг	27
Максимальна швидкість, км/год	150
Крейсерська швидкість, км/год	90
Максимальна висота, м	2000
Радіус дії, км	80
Тривалість польоту, год.	4
Тип двигуна	двигун внутрішнього згорання MVVS 50IRS
Спосіб старту та посадки	по літаковому
Система навігації	GLONASS / GPS / інерціальна система

БпАК А1-СМ “Фурія” – багатоцільовий безпілотний авіаційний комплекс, призначений для ведення повітряної розвідки вдень та вночі, визначення координат об’єкту, коригування артилерії. Виробник ТОВ “НВП Атлон Авіа”. Склад безпілотного авіаційного комплексу А1-СМ “Фурія”: три безпілотні літальні апарати, змінні голівки із тепловізійними та оптико-електронними камерами, наземна станція керування і обробки інформації, антени, додаткове обладнання. Модифікації: А1-С, А1-СМ, КС-1.



Рисунок Б.3 – Безпілотний авіаційний комплекс А1-СМ “Фурія”

Таблиця Б.3 – Тактико-технічні характеристики безпілотного авіаційного комплексу А1-СМ “Фурія”

Тактико-технічні характеристики	А1-СМ “Фурія”	А1-С “Фурія”
Довжина, мм	654	654
Розмах крила, мм	2050	2000
Максимальна швидкість, км/год	120	110
Крейсерська швидкість, км/год	65-70	65
Максимальна висота, м	2500	2500
Радіус дії, км	30	30
Тривалість польоту, хв.	120	120
Тип двигуна	електричний	електричний
Спосіб старту та посадки	катапульта/ по-літаковому без шасі	катапульта/ по-літаковому без шасі
Система навігації	GPS / GLONASS / GALILEO	GPS
Корисне навантаження	денна, тепловізійна камери, фотокамера	денна, тепловізійна камери
Режим польоту	ручний, напівавтоматичний, автономний	ручний, напівавтоматичний

БпАК “Лелека-100” – програмно-апаратний комплекс, автономного дистанційно-керованого повітряного апарату для вирішення завдань з аеророзвідки, патрулювання, картографування місцевості із можливістю передачі оперативної інформації та отримання точних географічних координат у режимі реального часу наближеного до реального. Виробник: ТОВ “ДЕВІРО”.

Комплекс пристосований для роботи зоні радіоперешкод, що дозволяє його використовувати поблизу промислових об'єктів, ліній електропередач, станцій стільникового зв'язку.



Рисунок Б.4 – Безпілотний авіаційний комплекс “Лелека – 100”

Таблиця Б.4 – Тактико-технічні характеристики безпілотного авіаційного комплексу “Лелека – 100”

Тактико-технічні характеристики	“Лелека – 100”
Довжина, мм	1100
Розмах крила, мм	1980
Максимальна злітна маса, кг	4,5 – 5,5
Максимальна швидкість, км/год	97
Крейсерська швидкість, км/год	60-70
Максимальна висота, м	1500
Радіус дії, км	40-50
Тривалість польоту, год.	2
Тип двигуна	електродвигун
Спосіб старту та посадки	катапульты / парашут
Система навігації	GPS / GLONASS

Безпілотний авіаційний комплекс МП-1 “Spectator” призначений для ведення розвідки та моніторингу водних й лісових масивів, нафто- і газопроводів, державного кордону, здійснення аерофотозйомки та застосування у пошуково-рятувальних операціях. Виробник: “Укроборонпром” спільно з ВАТ Меридіан ім. С.П. Корольова, м. Київ.

Безпілотний авіаційний комплекс МП-1 “Spectator” складається з: 1-3 безпілотних літальних апаратів, наземної станції, панелі радіо управління, комплекту батарей, антен та рюкзака.



Рисунок Б.5 – Безпілотний авіаційний комплекс МП-1 “Spectator”

Таблиця Б.5 – Тактико-технічні характеристики безпілотного авіаційного комплексу МП-1 “Spectator”

Тактико-технічні характеристики	МП-1 “Spectator”
Довжина, мм	1295
Розмах крила, мм	3000
Максимальна злітна маса, кг	5,5
Максимальна швидкість, км/год	120
Крейсерська швидкість, км/год	70
Максимальна висота, м	2000
Радіус дії, км	30-50
Тривалість польоту, хв.	120
Тип двигуна	електричний
Спосіб старту та посадки	з руки / парашут
Система навігації	GPS
Маса корисного навантаження, кг	1,5

Безпілотний авіаційний комплекс ACS-3 (Raybird-3) призначений для ведення аерофотозйомки та відеоспостереження в день та вночі об'єктів земної та водної поверхні. Розроблений українською компанією АВК “Скаетон”.

Склад безпілотного авіаційного комплексу ACS-3: чотири безпілотні літальні апарати, дві наземні станції керування, дві пускові установки катапультної дії, дві транспортні бази (автомобіль), запасні частини, інструменти та приладдя, експлуатаційна документація



Рисунок Б.6 – Безпілотний авіаційний комплекс ACS-3 (Raybird-3)

Таблиця Б.6 – Тактико-технічні характеристики безпілотного авіаційного комплексу ACS-3 (Raybird-3)

Тактико-технічні характеристики	ACS-3 (Raybird-3)
Довжина, мм	1830
Розмах крила, мм	2985
Максимальна злітна маса, кг	20
Максимальна швидкість, км/год	160
Крейсерська швидкість, км/год	120
Максимальна висота, м	3000
Радіус дії, км	1000
Тривалість польоту, год.	15
Тип двигуна	внутрішнього згорання
Спосіб старту та посадки	катапульты/парашут
Маса корисного навантаження, кг	5

Безпілотний авіаційний комплекс “МАРА-2П” призначений для призначений, охорони, моніторингу та пошуку об’єктів земної та водної поверхні з повітря на відстані до 25 км. Виробник: ТОВ “Карболайн”, Україна.

Склад безпілотного авіаційного комплексу “МАРА-2П”: три безпілотні літальні апарати, наземна станція управління, стіл-кейс з персональним комп’ютером, антена, запасне приладдя, автоматизований слідкуючий пристрій.



Рисунок Б.7 – Безпілотний авіаційний комплекс “МАРА-2П”

Таблиця Б.7 – Тактико-технічні характеристики безпілотного авіаційного комплексу “МАРА-2П”

Тактико-технічні характеристики	“МАРА-2П”
Довжина, мм	1140
Розмах крила, мм	1950
Максимальна злітна маса, кг	2,2
Максимальна швидкість, км/год	100
Крейсерська швидкість, км/год	35-80
Максимальна висота, м	2000
Радіус дії, км	25
Тривалість польоту, хв.	90
Тип двигуна	електричний
Спосіб старту та посадки	з руки / на корпус
Маса корисного навантаження, кг	0,4
Режими польоту	автоматичний, напівавтоматичний

Безпілотний авіаційний комплекс “Fly Eye” – безпілотний авіаційний комплекс тактичного класу призначений для розвідки, цілевказання та коректування вогню артилерії в вдень та вночі.

Виробник: компанія WB Electronics Group, Польща.

Склад безпілотного авіаційного комплексу “Fly Eye”: три безпілотні літальні апарати, станція управління, дистанційний термінал спостереження, мобільна приймально-предавальна станція.



Рисунок Б.8 – Безпілотний авіаційний комплекс “Fly Eye”

Таблиця Б.8 – Тактико-технічні характеристики безпілотного авіаційного комплексу “Fly Eye”

Тактико-технічні характеристики	“Fly Eye”
Довжина, мм	1900
Розмах крила, мм	3600
Вага, кг	11
Максимальна швидкість, км/год	160
Крейсерська швидкість, км/год	70
Максимальна висота, м	4000
Радіус дії, км	50
Тривалість польоту, год.	2-4
Тип двигуна	електричний
Спосіб старту та посадки	з руки / парашут
Система навігації	GPS / інерціальна система
Маса корисного навантаження, кг	4

Безпілотний авіаційний комплекс “SPARROW” – безпілотний авіаційний комплекс призначений для ведення розвідки на відстані до 20 км. Оснащений гіростабілізованою камерою і тепловізором.

Виробник: компанія Sprai Tech, Україна.



Рисунок Б.9 – Безпілотний авіаційний комплекс “SPARROW”

Таблиця Б.9 – Тактико-технічні характеристики безпілотного авіаційного комплексу “SPARROW”

Тактико-технічні характеристики	“SPARROW”
Довжина, мм	600
Розмах крила, мм	980
Максимальна злітна маса, кг	3
Максимальна швидкість, км/год	110
Крейсерська швидкість, км/год	80
Максимальна висота, м	2000
Радіус дії, км	20
Тривалість польоту, хв.	60-85
Тип двигуна	електричний
Спосіб старту та посадки	катапульта/ парашут
Система навігації	GPS
Маса корисного навантаження, кг	3,3
Режими польоту	ручний / автоматичний

Безпілотний авіаційний комплекс “Spy Arrow” – розвідувальний безпілотний літальний апарат класу мікро, призначений для спостереження, цілевказання, коригування вогню, оцінки збитку в районі виконання завдань.

Виробник: корпорація “Thales”, Франція. Модифікації: Thales Spy Arrow LW, Thales Spy Arrow HC.

Склад безпілотного авіаційного комплексу “Spy Arrow”: два безпілотні літальні апарати, станція наземного контролю, ручна катапульта, рюкзак для транспортування, кейси для транспортування безпілотного літального апарату, футляр для станції керування.



Рисунок Б.10 – Безпілотний авіаційний комплекс “Spy Arrow”

Таблиця Б.10 – Тактико-технічні характеристики безпілотного авіаційного комплексу “Spy Arrow”

Тактико-технічні характеристики	“Spy Arrow”
Довжина, мм	525
Розмах крила, мм	670
Максимальна злітна маса, г	500
Максимальна швидкість, км/год	100
Крейсерська швидкість, км/год	50
Максимальна висота, м	300
Радіус дії, км	10
Тривалість польоту, хв.	30
Тип двигуна	електричний
Спосіб старту та посадки	з руки/ парашут
Маса корисного навантаження, г	100

Безпілотний авіаційний комплекс “Patriot RV010” – застосовується в сільському господарстві, охоронній сфері, нафто-газовій сфері, лісному господарстві та при виникненні надзвичайних ситуацій як інструмент моніторингу території і інфраструктурних об’єктів з повітря з метою отримання відеофіксації обстановки у віддалених районах та для передачі в режимі онлайн відео інформації про стан об’єктів моніторингу. Комплектація: денна камера та тепловізор в корпусі єдиного гіростабілізованого підвісу. Виробник: компанія ТОВ НВП “Айтек”, Україна.

Склад безпілотного авіаційного комплексу “Patriot”: два безпілотні літальні апарати, модуль керування та спостереження, приймально-передавальний пристрій, станція прийому телеметрії та обробки відеоматеріалу, комплект запасних частин.



Рисунок Б.11 – Безпілотний авіаційний комплекс “Patriot”

Таблиця Б.11 – Тактико-технічні характеристики безпілотного авіаційного комплексу “Patriot”

Тактико-технічні характеристики	“Patriot”
Довжина, мм	650
Розмах крила, мм	1600
Маса, кг	2,9
Максимальна швидкість, км/год	120
Крейсерська швидкість, км/год	70
Максимальна висота, м	200
Радіус дії, км	15
Тривалість польоту, хв.	120
Тип двигуна	електродвигун
Спосіб старту та посадки	з руки / парашут

Безпілотний авіаційний комплекс “Observer-S” – багатоцільовий розвідувальний безпілотний літальний апарат призначений для патрулювання виділених районів місцевості, виявлення стихійних лих, надзвичайних подій, здійснює зовнішній контроль справності протяжних шляхопроводів і виявлення пошкоджених ділянок, шляхів, нафтогазопроводів. А також для повітряної розвідки в умовах ведення бойових дій, виявлення і визначення координат бойової техніки, розташування військ, укріплених позицій супротивника.

Виробник: компанія ТОВ НВП “Def C”, Україна.

Склад безпілотного авіаційного комплексу “Observer-S”: три безпілотні літальні апарати, наземна станція керування, антенний комплекс, дві акумуляторні батареї.



Рисунок Б.12 – Безпілотний авіаційний комплекс “Observer-S”

Таблиця Б.12 – Тактико-технічні характеристики безпілотного авіаційного комплексу “Observer-S”

Тактико-технічні характеристики	“Observer-S”
Довжина, мм	1650
Розмах крила, мм	3400
Максимальна злітна маса, кг	5,5-6,5
Радіус дії, км	30
Тривалість польоту, хв.	90-300
Тип двигуна	електродвигун
Спосіб старту та посадки	з руки/ парашут
Система навігації	GSM / GPS / GLONASS
Режими польоту	автоматичний
Маса корисного навантаження, кг	1 – 1,5

Безпілотний літальний апарат “Skif” – призначений для здійснення повітряного моніторингу полів, лісів, лугів, кар’єрів та подальшого глибинного аналізу матеріалів. Використовується в роботі малих, середніх та великих за площею земельних угідь агрокомпаній, державних служб, підприємств. Виробник: компанія “Айтек”, Україна.

Модифікації: SKIF RTK, SKIF NDVI, SKIF MAPPER.



Рисунок Б.13 – Безпілотний літальний апарат “Skif”

Таблиця Б.13 – Тактико-технічні характеристики безпілотного літального апарату “Skif”

Тактико-технічні характеристики	“Skif”
Розмах крила, мм	1500
Максимальна злітна маса, кг	3,6
Радіус дії, км	100
Крейсерська швидкість км/год	65
Тривалість польоту, хв.	120
Максимальна висота, м	400
Тип двигуна	електродвигун
Спосіб старту та посадки	з руки/ парашут
Система навігації	GPS / GLONASS / BEIDOU
Режими польоту	автоматичний, маршрут польоту задається з ноутбуку

ДОДАТОК В

Використання спеціальних програмних засобів в ході проведення чисельного експерименту

В ході проведення чисельного моделювання використовувалися спеціальні програми для роботи на графах “Графоаналізатор”

Результати моделювання в процесі проведення численного експерименту.

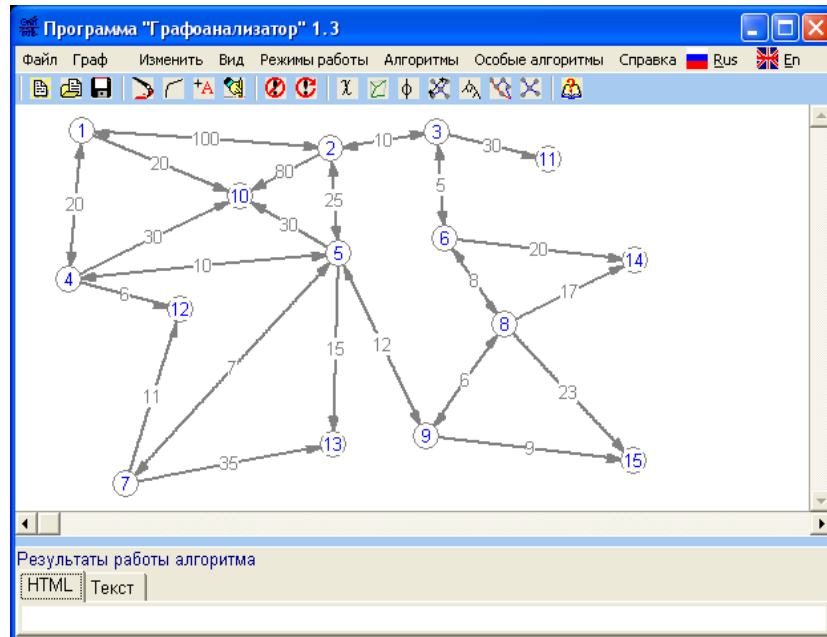


Рисунок В.1 – Граф району пошуку в програмі “Графоаналізатор” 1.3

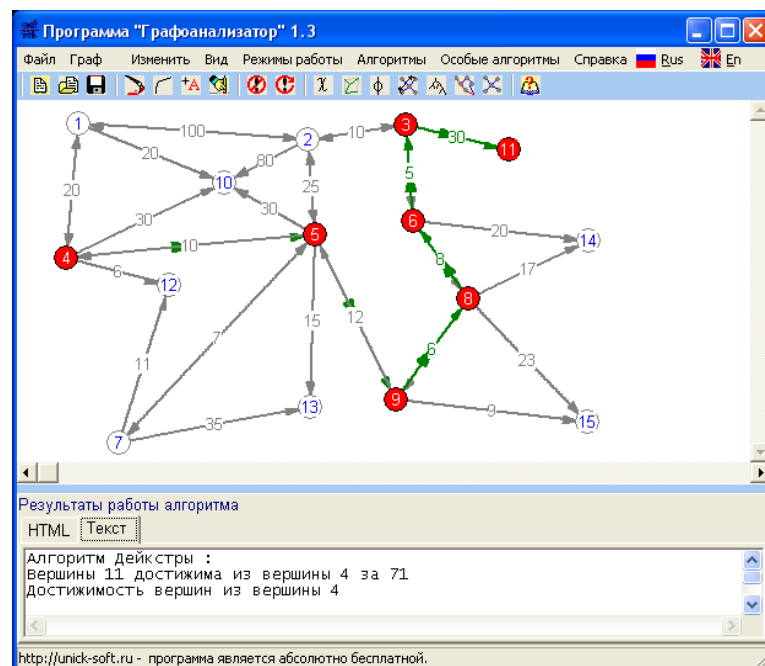


Рисунок В.2 – Результат пошуку найкоротшої відстані між вузлами графа

На рисунку В.3 показаний порядок розрахунку параметрів нормального розподілу - часу проходження ділянки маршруту групи з 4-х осіб в автоматизованому режимі.

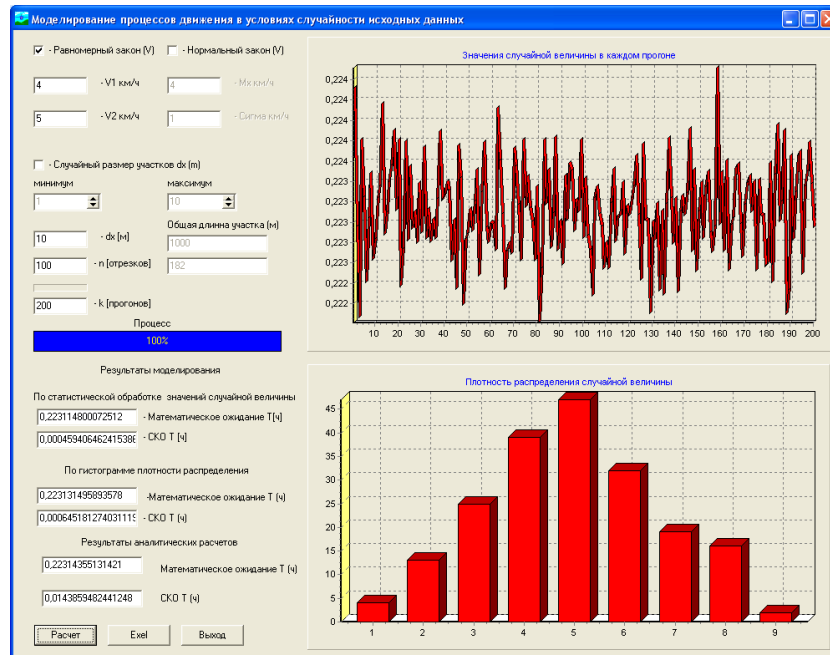


Рисунок В.3 – Автоматизований розрахунок параметрів моделі руху групи з 4-х осіб на ділянці 4-5

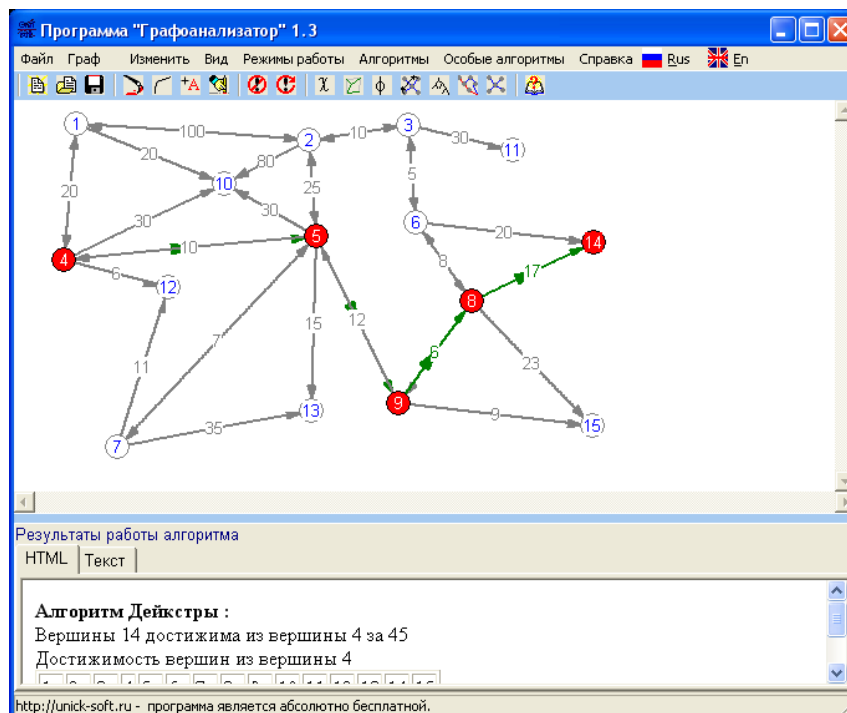


Рисунок В.4 – Найкоротший маршрут руху групи з 4-х осіб із 4-ої маскувальної ємності до 4-му об'єкту впливу (14-ій вершині графа)

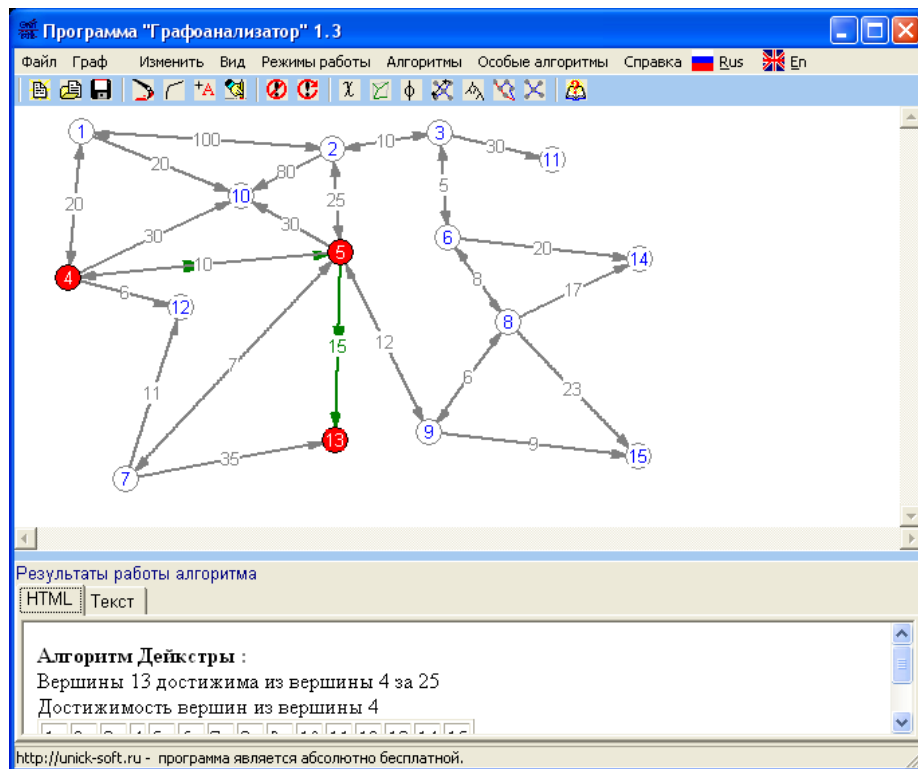


Рисунок В.5 – Найкоротший маршрут руху групи з 4-х осіб із 4-ої маскувальної ємності до 5-му об'єкту впливу (13 - ій вершині графа)

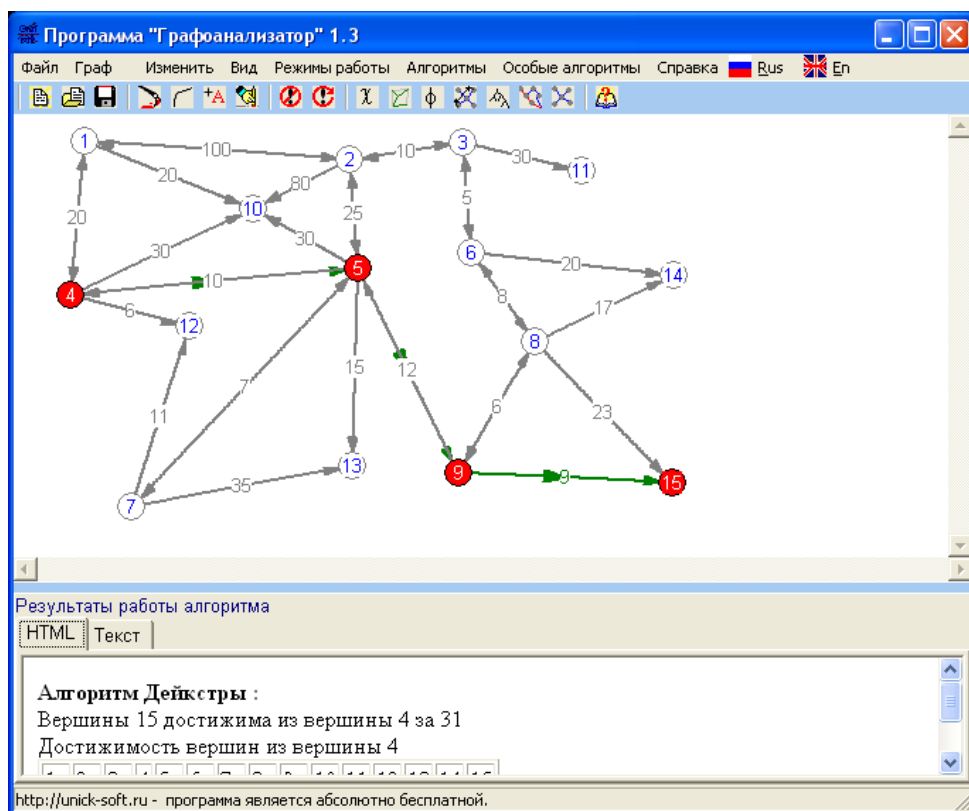


Рисунок В.6 – Найкоротший маршрут руху НВФ із 4-ої маскувальної ємності до 6-го об'єкту впливу (15 - ій вершині графа)

ДОДАТОК Г

Акти реалізації результатів дисертаційного дослідження



АКТ

реалізації результатів дисертаційних досліджень
БЕРЕЖНОГО Андрія Олександровича

Комісія у складі: голова комісії: начальник ГУП військової частини А4465 підполковник В. Буцинський, члени комісії старший штурман військової частини А4465 підполковник І. Строміло, заступник начальника ГУП військової частини А446 підполковник С. Терновський, розглянула окремі результати дисертаційних досліджень здобувача Бережного А.О. в ході проведення командно-штабних навчань та встановила:

1. Удосконалений метод автоматизованого планування маршруту польоту БПЛА для пошуку стаціонарних об'єктів дозволяє врахувати зв'язаність структури стаціонарних об'єктів противника та оцінити важливість кожного об'єкту в загальній структурі.

2. Застосування даного методу дозволило отримати прогноз розташування стаціонарних об'єктів по критерію стійкості складної системи, обґрунтувати вагу об'єктів та провести оптимізацію, що підвищує вагу виявлених об'єктів на 25-32%.

3. Представлена інформаційна технологія автоматизованого планування дій БПЛА дозволяє оперативно змінювати маршрут в процесі виконання місії за розпізнаними зображеннями, сформувати архітектуру перспективної інтелектуальної системи підтримки прийняття рішення для планування дій БПЛА.

4. Застосування представленого методу та інформаційної технології доцільно при плануванні розвідки (в частині повітряної розвідки з застосуванням БПЛА).

Голова комісії:
Начальник ГУП військової частини А4465
підполковник

В. БУЦИНСЬКИЙ

Члени комісії:
Старший штурман військової частини А4465
підполковник

І. СТРОМИЛО

Заступник начальника ГУП військової частини А4465
підполковник

С. ТЕРНОВСЬКИЙ



ЗАТВЕРДЖУЮ

Командир військової частини А4608
ПОЛКОВНИК



В. ПАЛАГУТА

АКТ


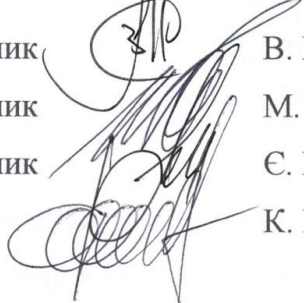
реалізації результатів дисертаційних досліджень
БЕРЕЖНОГО Андрія Олександровича

Комісія у складі: голова комісії: ТВО заступника командира військової частини А4608 підполковник Клачков В.С., члени комісії: ТВО начальника штабу – першого заступника командира військової частини А4608 підполковник Гомельський М.М.; командир дивізіону військової частини А4608 підполковник Поліщук Є.М.; начальник командного пункту – заступник начальника штабу з бойового управління військової частини А4608 майор Матвієнко К.Г. розглянула окремі результати дисертаційних досліджень Бережного А.О. під час проведення заходів оперативної підготовки в частині планування дій безпілотних авіаційних комплексів, встановила:

1. Удосконалений метод автоматизованого планування маршруту польоту БПЛА для пошуку груп незаконних збройних формувань (НЗФ) дозволив врахувати невизначеність в діях противника, сформувані варіанти прогнозу їх руху, оцінити динамічні характеристики груп НЗФ на кожному з варіантів можливих маршруті його руху, що дозволяє знизити невизначеність інформації про дані маршрути і сформувані раціональний маршрут пошуку.

2. Застосування удосконаленого методу дозволило підвищити ймовірність виявлення рухомих об'єктів (груп НЗФ) в лісисто-степовій місцевості на 65-70%.

3. Реалізація даного методу доцільна при створенні автоматизованої системи управління в частині розрахункових задач планування повітряної розвідки з використанням безпілотних літальних апаратів.

Голова комісії:	підполковник		В. КЛАЧКОВ
Члени комісії:	підполковник		М. ГОМЕЛЬСЬКИЙ
	підполковник		Є. ПОЛЩУК
	майор		К. МАТВИЄНКО