

Матющенко О.Г., Самсонов В.С., Лавров О.Ю., Сізон Д.О. Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

### ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ВИЗНАЧЕННЯ ДІЛЯНОК МОНІТОРИНГУ ПРИ ПЛАНУВАННІ МАРШРУТУ ПОЛЬОТУ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ ДЛЯ ПОШУКУ ДИНАМІЧНОГО ОБ'ЄКТУ

*В статті представлено інформаційну технологію визначення ділянок моніторингу при плануванні польоту безпілотної літальної апарату з метою пошуку динамічного об'єкту. Робота інформаційної технології визначення ділянок моніторингу полягає у відсіюванні ділянок моніторингу із низькою вагою, дозволяє врахувати місце перебування БпЛА та час прибуття на ділянку. Для визначення пріоритетної ділянок моніторингу використано усереднене значення ваги ділянок, яке враховує вагу пропорційну часу моніторингу та доцільність польоту до неї. В основі інформаційної технології покладено комбінацію методів жадібного алгоритму, алгоритму сортування та повного перебору.*

*Розроблена інформаційна технологія може бути включена до науково-методичного апарату та інструментарію планування польоту БпЛА, в тому числі групи БпЛА, при виконанні місії з пошуку динамічного об'єкту.*

*Для проведення експерименту розроблено програму планування польоту БпЛА в середовищі розробки Embarcadero Builder XE8 мовою програмування C++. Проведено експеримент, в результаті якого отримано маршрут польоту безпілотної літальної апарату.*

*Розроблена в роботі інформаційна технологія визначення ділянок моніторингу дозволить скоротити час при плануванні виконання місії та підвищити ефективність повітряної розвідки.*

**Ключові слова:** *планування маршруту, безпілотний літальний апарат, відбір ділянок моніторингу, усереднена вага.*

**Matiushchenko O., Samsonov V., Lavrov O., Sizon D.** *Kharkov National Air Force University  
Named Ivan Kozhedub, Kharkov*

### INFORMATION TECHNOLOGY FOR DETERMINING MONITORING AREAS WHEN PLANNING A FLIGHT ROUTE FOR UNMANNED AERIAL VEHICLE TO SEARCH A DYNAMIC OBJECT

*The article presents an information technology for determining monitoring areas when planning an unmanned aerial vehicle flight in order to find a dynamic object. The job of site identification information technology is to screen out low-weight sites based on the UAV's current location and time of arrival at the site. To determine the priority monitoring point, the averaged value of the section weight was applied, which takes into account the section weight proportional to the monitoring time and the expediency of the flight to it. The information technology for site determination is based on a combination of greedy, sorting and brute-force algorithms. The developed information technology can be included in the scientific and methodological apparatus and flight planning tools for an unmanned aerial vehicle, including a group, when performing a mission to find a dynamic object.*

*For the experiment, a program for planning an unmanned aerial vehicle was developed on the Embarcadero Builder XE8 platform in the C++ programming language. An experiment was carried out as a result of which the flight route of an unmanned aerial vehicle was obtained.*

*The information technology developed in the article for determining the monitoring sites will*

*reduce the time when planning missions and increase the efficiency of air reconnaissance in general.*

**Keywords:** *route planning, unmanned aerial vehicle, selection of monitoring sites, average weight.*

**Матющенко О.Г., Самсонов В.С., Лавров О.Ю., Сизон Д.А.** *Харьковский национальный университет Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба, Харьков*

## **ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УЧАСТКОВ МОНИТОРИНГА ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ МАРШРУТА ПОЛЕТА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ДЛЯ ПОИСКА ДИНАМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА**

*В статье представлена информационная технология определения участков мониторинга при планировании полета беспилотного летательного аппарата с целью поиска динамического объекта. Работа информационной технологии определения участков мониторинга заключается в отсеивании участков с низким весом учитывая текущее место беспилотного летательного аппарата и время прибытия на участок. Для определения приоритетной точки мониторинга применено усредненное значение веса участка, которое учитывает вес участка пропорциональный времени мониторинга и целесообразности полета к ней. Информационная технология определения участков основана на комбинации методов жадного алгоритма, алгоритме сортировке и полного перебора. Разработанная информационная технология может быть включена в научно-методический аппарат и инструментарий планирования полета беспилотного летательного аппарата, в том числе группы, при выполнении миссии по поиску динамического объекта.*

*Для проведения эксперимента разработана программа планирования полета беспилотного летательного аппарата в среде разработки Embarcadero Builder XE8 на языке программирования C++. Проведен эксперимент, в результате которого получен маршрут полета беспилотного летательного аппарата.*

*Разработанная в статье информационная технология определения участков мониторинга позволит сократить время при планировании выполнения миссий и повысить эффективность воздушной разведки в целом.*

**Ключевые слова:** *планирование маршрута, беспилотный летательный аппарат, отбор участков мониторинга, усредненный вес.*

### **1. Вступ**

Аналіз останніх воєнних конфліктів свідчить, що роль безпілотних літальних апаратів (БпЛА) при виконанні місій різного характеру постійно зростає. Широке застосування БпЛА у завданнях різного роду (розвідувальних, атакуючих місіях) пов'язана із відсутністю ризику втрати живої сили та стрімким розвитком та інтеграцією в системи БпЛА сучасних інформаційних технологій.

Застосування БпЛА зводиться до планування маршруту польоту та пов'язане із відбором ділянок моніторингу (обльоту) найбільш корисних з точки зору виконання завдання. Ділянки моніторингу доцільно представити у вигляді точок, які містять координати та інтервал часу.

При плануванні виконання завдання з пошуку об'єкту необхідно врахувати:

- 1) варіанти місцевості (закрита / відкрита ділянка);
- 2) заборонені зони;
- 3) об'єкти прикриття;
- 4) тип об'єкту противника (динамічний / стаціонарний);
- 5) характеристики об'єктів (кількість, швидкість пересування).

Застосовуючи метод математичного моделювання запропонованого в роботі [1], отримаємо ймовірні маршрути досягнення динамічним об'єктом об'єктів прикриття та час

перебування об'єктів противника на ділянках моніторингу, які є найбільш сприятливі для виявлення засобами повітряної розвідки. Оскільки дії противника є непередбачуваними, виникає п'ять ймовірних маршрутів та відповідно ділянок моніторингу, які перетинаються у часі.

В статті розроблено інформаційну технологію відбору ділянок моніторингу при плануванні польоту БпЛА для пошуку динамічного об'єкту, який дозволяє відібрати пріоритетні ділянки моніторингу на основі усередненої ваги із врахуванням часу її моніторингу.

Завдання планування маршруту польоту БпЛА є інтелектуальним завданням та вимагає від оператора ситуативної обізнаності та часу на планування. Інтеграція розробленої інформаційної технології до науково-методичного апарату та інструментарію планування маршруту польоту БпЛА дозволить автоматизувати процес планування, знизити когнітивне навантаження на оператора та скоротити час при плануванні виконання місії загалом.

## 2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Аналіз останніх досліджень і публікацій в області застосування БпЛА свідчить про зацікавленість розробників в розробці нових інформаційних технологій, які б покращували роботу існуючих методів, в тому числі методів планування польоту. Основними напрямками розвитку методів застосування БпЛА є:

1) інтеграція в системи управління технологій комп'ютерного зору та розпізнавання зображень;

2) автоматизація управління БпЛА;

3) навігація та комунікація;

4) планування маршрутів та групове застосування.

Як правило, роботи, присвячені плануванню польоту БпЛА, розглядають середовище польоту як безперервну місцевість із дружнім або нейтральним середовищем, а об'єкти пошуку стаціонарні.

В роботі [1] розроблено метод планування маршруту БпЛА з метою пошуку динамічного об'єкта в умовах лісостепової місцевості. Запропоновані показники та критерії ефективності ведення пошуку динамічного об'єкту, які задовольняють меті та задачам пошуку.

В роботі [2] розроблено метод планування маршруту польоту БпЛА із врахуванням ваги об'єктів пошуку та ресурсу БпЛА.

Планування маршруту БпЛА в безперервній місцевості представлено в роботі [3]. Представлений еволюційний алгоритм на основі контрольних точок дозволяє мінімізувати загальну відстань польоту та знизити ризик виявлення БпЛА.

В роботі [4] представлено методику планування маршруту тактичного БпЛА малої дальності при здійсненні розвідки, що полягає у визначенні розкладу польоту із врахуванням розпізнавання об'єктів та специфіки датчиків на борту.

В роботі [5] розроблено модифікований алгоритм визначення оптимальної траєкторії польоту БпЛА при пошуку та спостереженні за об'єктом.

В роботі [6] запропоновано метод планування траєкторій руху групи БпЛА у міських умовах на платформі ROS. Для визначення оптимального маршруту використовується алгоритм A-star.

Робота [7] присвячена розробці методу планування маршруту БпЛА при виконанні місій пошуку одиночного стаціонарного об'єкту із врахуванням розподілу ймовірності важливості району пошуку. Розроблений метод дозволяє максимізувати загальну ймовірність виявлення об'єкту в заданий інтервал часу.

В роботі [8] розроблена ієрархічна структура оптимізації задач планування маршруту БпЛА для проведення аерофотозйомки.

В роботі [9] для вирішення задачі планування маршруту польоту БпЛА запропоновано використовувати алгоритм диференційної еволюції з обмеженнями. Розроблений в роботі алгоритм дозволяє визначити оптимальний маршрут враховуючи кут повороту БпЛА, рельєф місцевості та заборонені зони.

В роботі [10] розроблений метод планування маршруту БПЛА з метою пошуку динамічного об'єкту – терористичного угруповання в умовах лісостепової місцевості. Розроблено метод обґрунтування оптимального маршруту ведення повітряної розвідки, запропоновані показники і критерій ефективності ведення пошуку динамічного об'єкту.

В основі удосконаленого методу покладені роботи [1,2,4,7,10].

### 3. Мета дослідження

Метою статті є розробка інформаційної технології відбору ділянок моніторингу при плануванні польоту БПЛА для підвищення ефективності виконання завдань повітряної розвідки.

### 4. Основні наукові результати

**Математичний опис задачі вибору оптимальної ділянки моніторингу.**

Нехай область пошуку (карта місцевості) це двовимірний простір, що містить  $N$  – точок, які відображають відкриті ділянки моніторингу (рисунок 1).

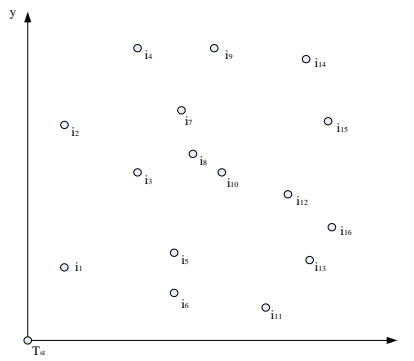


Рис. 1. Область пошуку із визначеними перспективними ділянками моніторингу

Кожна ділянка описується вектором із п'яти елементів  $i_n(x_i; y_i; t_{beg_i}; t_{end_i}; w_i)$ , де  $x_i, y_i$  – координати  $i$  – точки,  $t_{beg_i}, t_{end_i}$  час початку та завершення моніторингу  $i$  – точки, а  $w_i$  її вага. Часові інтервали початку та завершення моніторингу різних точок можуть перетинатись.

БПЛА знаходиться на початку координат в точці старту  $T_{st}(x_z, y_z)$  в нульовий момент часу. Відома швидкість польоту ( $V$ ) та максимальний час перебування у повітрі ( $T_{max}$ ). У разі необхідності  $T_{max}$  може бути зменшене, проте не може бути збільшене, що обумовлено тактико-технічними характеристиками БПЛА.  $T_{max}$  визначає час повернення БПЛА на точку старту  $T_{st}$ . БПЛА має  $P$  – кількість вильотів із затримкою  $\tau$ .

Якщо БПЛА знаходиться в  $i$  – точці на інтервалі часу  $[t_{beg_i}; t_{end_i}]$ , система отримує вагу даної точки –  $w_i$ , якщо БПЛА знаходиться в  $i$  – точці менше часу визначеного інтервалом  $[t_{beg_i}; t_{end_i}]$ , то отримує вагу пропорційну часу перебування в заданій точці з урахуванням  $w_i$ .

Таким чином задача полягає у визначенні маршруту моніторингу точок з метою максимізації ваги системи із врахуванням обмежень кількості вильотів  $P$ .

Вибір оптимальної ділянки моніторингу із множини можливих варіантів є задачею багатокритеріальної оптимізації. Проте із врахуванням обмежень, а саме – часові інтервали початку та завершення моніторингу відкритої ділянки не можуть бути зміщені у часі; на момент часу  $[t_{beg_i}; t_{end_i}]$  потрапляють  $N$  ділянок; час моніторингу обмежений часом перебування БПЛА в повітрі  $T_{max}$  та кількістю вильотів  $P$ , що ускладнює математичний опис моделі, не знайдено відомого оптимізаційного методу який задовольняв визначеним обмеженням. Опис алгоритму вибору оптимальної ділянки на момент часу  $t_n$  побудований на основі комбінації жадібного алгоритму, алгоритму сортування та повного перебору. Структура алгоритму наведена на рисунку 2.

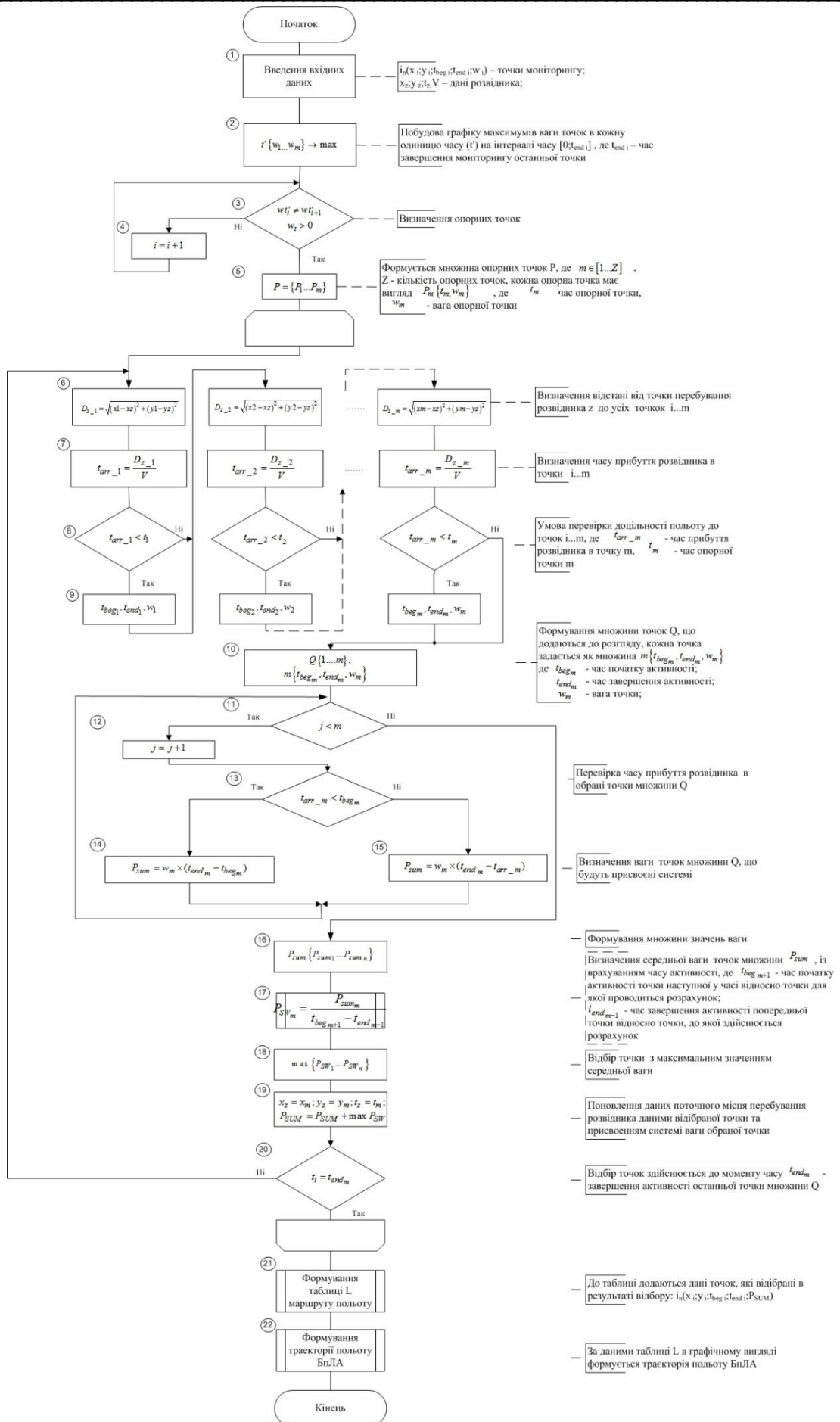


Рис. 2. Алгоритм побудови маршруту польоту БПЛА

Вхідними даними роботи алгоритму є:

1. Дані ділянок моніторингу у вигляді таблиці, що містить: номер, координати, час початку та завершення активності ділянки та її вагу (таблиця 1).
2. Дані БПЛА: координати  $x_z, y_z$ , час  $t_z$  та швидкість польоту ( $V$ ).

Таблиця 1.

Точки моніторингу

№ точки моніторингу	x	y	t <sub>beg</sub>	t <sub>end</sub>	w
1	45	33	2	6	4
2	55	37	5	13	10
...	...	...	...	...	...
n	...	...	...	...	...

Після введення початкових даних отримаємо набір точок моніторингу з інтервалами часу та вагою (рис. 3), де вісь x – час, а y – вага ділянок.

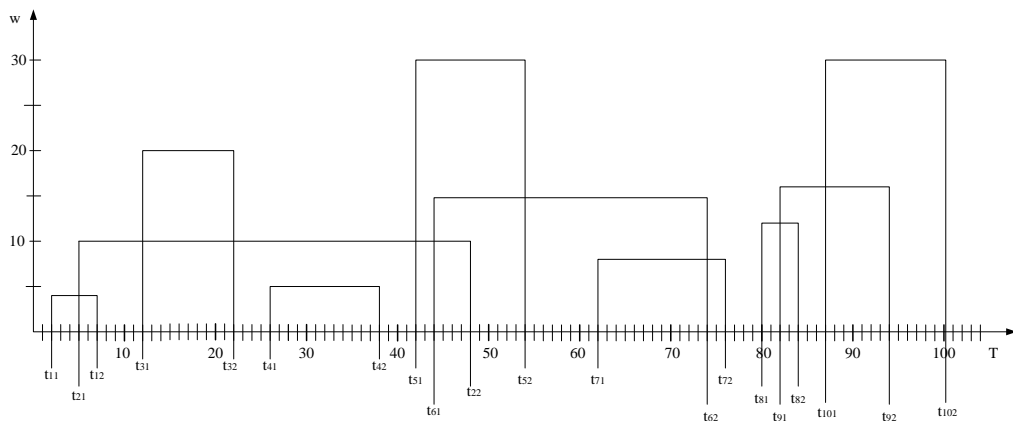


Рис. 3. Часовий графік точок моніторингу

Аналізуючи графік (рис.3), можна зробити висновок, що деякі ділянки мають низький коефіцієнт важливості (вагу) та повністю поглинаються ділянками із більшою вагою. Таким чином доцільна трансформація графіку, яка полягає у визначенні максимумів ваги ділянок в кожен одиницю часу та опорних точок. Як наслідок менш важливі точки відсіюються.

Опорні точки – це точки, які відображають зміну ваги в наступний момент часу та використовуються для визначення доцільності перельоту до іншої ділянки моніторингу. Кожна опорна точка задається як двомірний масив  $P_m \{t_m, w_m\}$ , де  $t_m$  – час опорної точки  $m$ , який відображає зміну ваги в наступний момент часу,  $w_m$  – її вага.

На рисунку 4 зображено графік максимумів ваги точок моніторингу на кожен одиницю часу, які потрапляють до розгляду при плануванні.

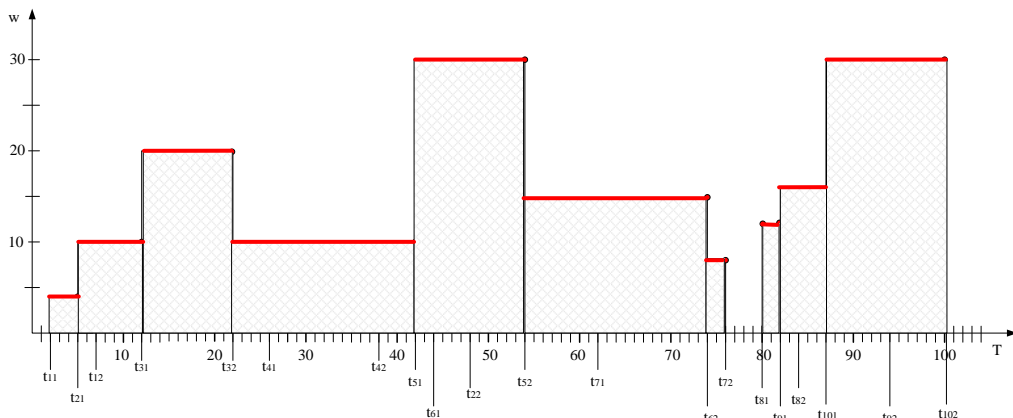


Рис. 4. Графік максимумів ваги точок моніторингу

Для визначення відстані між поточною точкою моніторингу та всіма перспективними точками використано формулу 1.

$$D_{z\_m} = \sqrt{(xm - xz)^2 + (ym - yz)^2} \quad (1)$$

Час прибуття БпЛА в перспективну точку інтересу  $t_{arr\_m}$  визначається формулою 2.

$$t_{arr\_m} = \frac{D_{z\_m}}{V} \quad (2)$$

де  $D_{z\_m}$  - відстань від точки моніторингу до точки перебування БпЛА,  $V$  - швидкість БпЛА.

Наступним етапом є визначення часу прибуття БпЛА у кожен точку моніторингу за умовою  $t_{arr\_m} < t_m$ , де  $t_{arr\_m}$  - час прибуття БпЛА на точку моніторингу  $m$ ,  $t_m$  - час опорної точки  $m$ .

Таким чином, формується множина точок моніторингу  $Q$ , які потрапляють до розгляду за умови, що час прибуття БпЛА не перевищує часу активності точки. В результаті отримаємо новий набір точок моніторингу  $Q$ , кожна точка моніторингу множини має вигляд  $m \{t_{beg\_m}, t_{end\_m}, w_m\}$ , де  $m$  - номер точки моніторингу,  $t_{beg\_m}$  - час початку активності та час її завершення  $t_{end\_m}$ ,  $w_m$  - вага точки.

Оскільки час прибуття БпЛА може потрапити в інтервал часу  $[t_{beg\_m}, t_{end\_m}]$ , необхідним є визначення ваги, яка буде присвоєна системі в результаті моніторингу ділянки. Для визначення ваги в результаті моніторингу ділянки  $m$ , розглядається умова  $t_{arr\_m} < t_{beg\_m}$ , яка відображає два варіанти подій:

час прибуття БпЛА  $t_{arr\_m}$  менший за час початку активності точки  $t_{beg\_m}$ ;

час БпЛА більший за час початку активності точки.

Якщо умова  $t_{arr\_m} < t_{beg\_m}$  виконується, вага визначається формулою 3, якщо ні, то формулою 4.

$$P_{sum} = w_m \times (t_{end\_m} - t_{beg\_m}) \quad (3)$$

$$P_{sum} = w_m \times (t_{end\_m} - t_{arr\_m}) \quad (4)$$

де  $w_m$  - вага точки  $m$ ,  $t_{end\_m}$  - час завершення активності точки  $m$ .

В результаті обчислень отримано множину значень ваги точок  $P_{sum}$ .

Оскільки значення  $P_{sum}$  для декількох точок моніторингу може бути однаковим, то для визначення пріоритетної точки інтересу із множини  $Q$  використовується усереднена вага, яка визначається формулою:

$$P_{SW_m} = \frac{P_{sum_m}}{t_{beg_{m+1}} - t_{end_{m-1}}} \quad (5)$$

де  $P_{sum_m}$  - вага точки моніторингу, із врахуванням часу перебування БпЛА на ній,  $t_{beg_{m+1}}$  - час початку активності точки наступної у часі відносно точки, до якої здійснюється розрахунок;  $t_{end_{m-1}}$  - час завершення активності попередньої точки відносно точки, до якої здійснюється розрахунок.

Обирається точка з максимальним значенням  $P_{SW_m}$ , що додається до таблиці маршруту.

Дані відібраної точки моніторингу поновлюються як поточні координати та час БПЛА, а вага ділянки присвоюється системі. В результаті циклу отримаємо набір точок моніторингу. Часом завершення циклу відбору точок є час завершення активності останньої точки  $t_{end_m}$  із множини Q.

### 5. Аналіз результатів численного експерименту з планування маршруту польоту БПЛА

З метою доведення ефективності інформаційної технології планування маршруту польоту БПЛА для пошуку динамічного об'єкту в середовищі розробки Embarcadero Builder XE8 мовою програмування C++ розроблена програма. Інтерфейс програми планування оптимального маршруту польоту БПЛА наведено на рисунку 5.

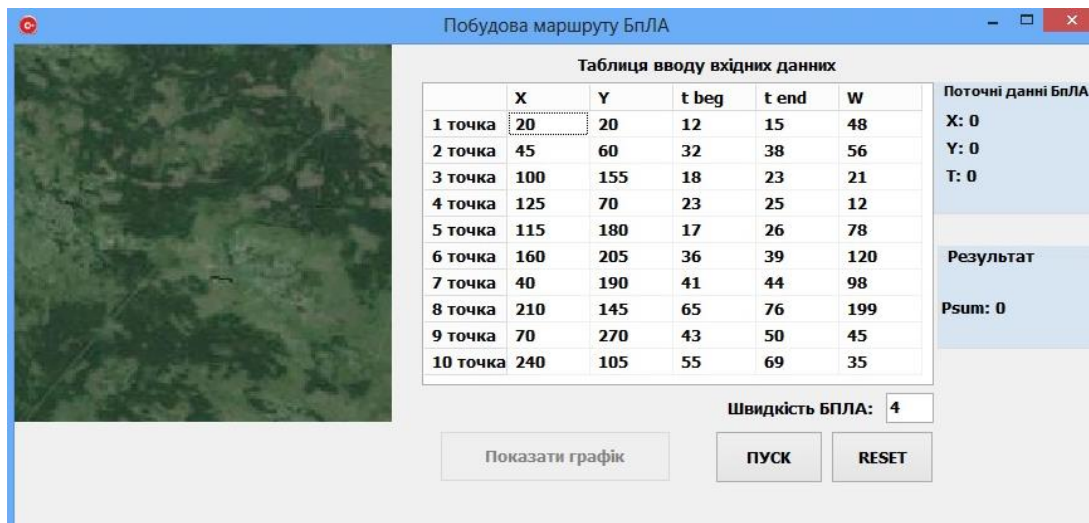


Рис. 5. Інтерфейс програми планування оптимального маршруту польоту БПЛА

До програми завантажується карта місцевості – район виконання місії з пошуку динамічного об'єкту. Після визначення маршрутів та моделювання проходження динамічним об'єктом відкритих ділянок [1] отримаємо початкові дані, які вводяться до таблиці.

Для проведення експерименту використано місцевість, яка містить 10 точок моніторингу.

Після запуску програми отримаємо графік максимумів ваги точок в кожний момент часу наведено на рисунку 6. Вісь x – значення ваги точок моніторингу, вісь y – загальний час моніторингу.

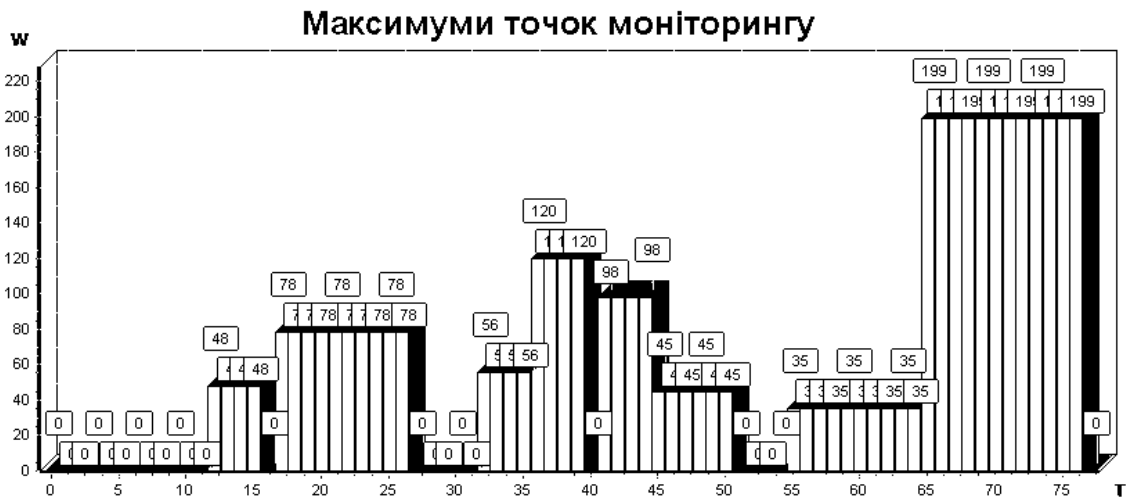


Рис. 6. Графік максимумів ваги точок моніторингу



В результаті експерименту отримано таблицю маршруту (рис.7) БПЛА, за якою побудована траєкторія польоту (рис.8).

Таблиця розрахунків								
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
W	48	78	56	120	98	45	35	199
№ точки	1	5	2	6	7	9	10	8
t beg	12	17	32	36	41	43	55	65
t end	15	26	35	39	44	50	64	76
X	20	115	45	160	40	70	240	210
Y	20	180	60	205	190	270	105	145
D	227	101	185	78	175	187	50	0
t arr	56	25	46	19	43	46	12	0
P Sum	0	156	0	480	196	225	350	238
P sw	0	4	0	11	4	4	5	31

Рис. 7. Таблиця маршруту польоту БПЛА

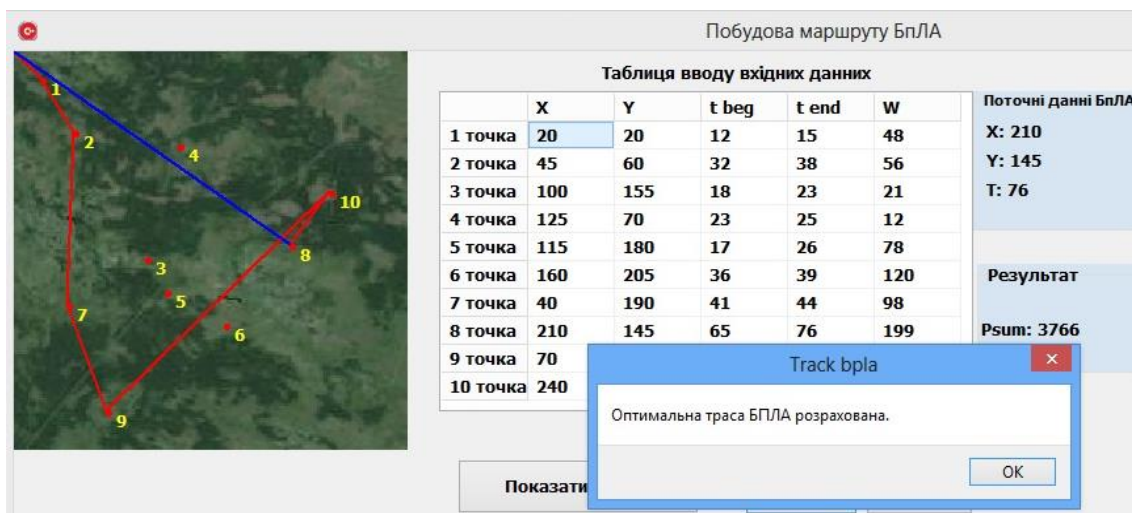


Рис. 7. Траєкторія польоту БПЛА

В програмі швидкість БПЛА задається умовним значенням від 1 до 10, яке відображає усереднені характеристики швидкості польоту БПЛА, від мінімального значення та максимального відповідно до типу та технічних характеристик БПЛА.

В результаті роботи програми відібрано 6 точок моніторингу, сума ваги в результаті моніторингу обраних точок становить 3766, при швидкості БПЛА – 4. Загальний час виконання завдання 76 хв.

## 6. Висновки

В статті розроблено інформаційну технологію відбору ділянок моніторингу при плануванні польоту безпілотного літального апарату з метою пошуку динамічного об'єкту. Експериментально доведено, що розроблена інформаційна технологія дозволяє обрати пріоритетні точки моніторингу, враховуючи усереднену вагу точок та вагу точок пропорційну до часу моніторингу.

Розроблену інформаційну технологію доцільно використовувати при розробці та модернізації автоматизованих методів планування маршруту руху БПЛА. В складі науково-методичного апарату та інструментарію планування маршруту польоту, розроблена інформаційна технологія може бути реалізована на борту БПЛА та використовуватись при автоматичному переплануванні маршруту.

Враховуючи невелику частку участі оператора при плануванні маршруту (введення вхідних даних), розроблена інформаційна технологія забезпечить автоматизацію процесу

планування, знизить навантаження на оператора та скоротить час при плануванні маршруту польоту БПЛА та час виконання місії загалом.

Розроблена інформаційна технологія відбору ділянок моніторингу передбачає використання БПЛА з великою тривалістю польоту, як варіант Bayraktar TB2 або ACS-3M.

Подальшим напрямком вдосконалення розробленої інформаційної технології є впровадження компоненти контролю використання ресурсу БПЛА (часу перебування в повітрі), ресурсу безпілотного авіаційного комплексу (кількість БПЛА та час на підготовку до виконання завдання) та відбір точок моніторингу для виконання місії в складі групи.

### References

1. O. Tymochko, A. Trystan, A. Berezhnyi, O. Sotnikov, O. Matiushchenko, I. Kryzhanivskiy Vehicles while Monitoring Behavior of Dynamic Objects in a Forest-Steppe Area. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*. 2020. Vol.8, No 7. P. 3208 – 3215.
2. O. Tymochko, O. Timochko, A. Trystan, O. Matiushchenko and A. Berezhnyi Method of Automated Flight Route Planning for Unmanned Aerial Vehicles to Search for Stationary Objects. 2020 IEEE 11th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), Kyiv, Ukraine, 2020. P. 242 – 246.
3. E. Dasdemir, M. Köksalan, D. T. Öztürk A flexible reference point-based multi-objective evolutionary algorithm: An application to the UAV route planning problem. *Computers & Operations Research*. 2020. Vol. 114. pp. 104811.
4. W. Stecz, K. Gromada UAV mission planning with SAR application. *Sensors*. 2020. Vol.20, No 4. P. 1080.
5. Pitre, Ryan R., X. Rong Li and R. Delbalzo. UAV route planning for joint search and track missions—An information-value approach. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2012. P. 2551 – 2565.
6. Madridano, Ángel, Abdulla Al-Kaff and David Martín. 3D Trajectory Planning Method for UAVs Swarm in Building Emergencies. *Sensors*. 2020. Vol.20, No 3. P. 642.
7. P. Yao, Z. Xie and P. Ren Optimal UAV Route Planning for Coverage Search of Stationary Target in River. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 27, no. 2, pp. 822-829.
8. Liu, Hong, Mu Lin, and Luyan Deng UAV route planning for aerial photography under interval uncertainties. *Optik*. 2016. P. 9695 – 9700.
9. Zhang, Xiangyin, and Haibin Duan. An improved constrained differential evolution algorithm for unmanned aerial vehicle global route planning. *Applied Soft Computing*. 2015. P. 270 – 284.
10. O. Tymochko, A. Trystan, O. Chernavina and A. Berezhnyi The method of planning the flight route of unmanned aerial vehicles while monitoring the behavior of dynamic objects in the forest-steppe area *Information Processing Systems*. 2020, 3(162). P. 95 – 110.