

Grzegorz Radzki
Grzegorz Bocewicz
Henryk Budzisz
Wydział Elektroniki i Informatyki
Politechnika Koszalińska

Problem marszrutyzacji floty dronów

Słowa kluczowe: optymalizacja, drony, marszrutyzacja i harmonogramowanie

1. Wstęp

Od momentu rozpoczęcia świadczenia usług transportowych, przedsiębiorstwa codziennie stają przed wyzwaniem w jaki sposób dostarczyć towary do klientów, aby wkład finansowy był jak najmniejszy, a klienci zadowoleni. Wsparcie decyzji w tym zakresie wielokrotnie sprowadza się do rozwiązania odpowiedniego problemu marszrutyzacji [1].

Zauważalny w ostatnich latach dynamiczny rozwój technologii bezzałogowych statków powietrznych (w skrócie dronów) pozwolił na wykorzystywanie tego typu maszyn do transportu towarów. Bardzo szybko zorientowano się, że dostarczanie towarów do klientów za pośrednictwem dronów niesie ze sobą korzyści w postaci: niewielkiego czasu realizacji zamówienia, łatwości dostarczania produktów (np. brak utrudnień związanych z ruchem ulicznym) oraz niższych kosztów energii. Zauważono również, że takie rozwiązania wpływają korzystnie na środowisko [5]. Zastosowanie dronów do zadań transportowych generuje jednak nowe wyzwania związane z organizacją transportu. Typowymi ograniczeniami wynikającymi z wdrożenia systemów transportu powietrznego bazujących na bezzałogowych statkach powietrznych są: konieczność okresowej (częstej) wymiany baterii, niewielki zasięg limitowany pojemnością baterii, niewielka ładowność, możliwości występowania kolizji między dronami realizującymi swoje misje itp. [6].

W tym ujęciu rozważany problem jest rozszerzeniem klasycznego problemu marszrutyzacji pojazdów [1] o możliwość uwzględniania nierównomiernego zużycia energii wynikającego z panujących w danym momencie warunków pogodowych [1]. W ogólności tego typu problem należy do klasy problemów

NP – trudnych [6]. Opracowany model problemu marszrutyzacji, implementowany w środowiskach programowania z ograniczeniami (IBM ILOG), zakłada, że zużycie energii jest funkcją nieliniową, która zależy od warunków pogodowych, „geometrii” drona [13] oraz przyjętej trajektorii (marszrutu) lotu [10]. Poszukiwane są takie plany lotów (marszrutu i harmonogramy), które gwarantują brak kolizji oraz nie prowadzą do wyczerpania baterii przy jednoczesnej maksymalizacji ilości towarów dostarczanych do klientów.

Struktura artykułu jest następująca. W rozdziale drugim przedstawiono przegląd literatury przedmiotu. Rozdział trzeci zawiera przykład ilustrujący problem marszrutyzacji bezzałogowych statków powietrznych. Rozdziały czwarty i piąty zawierają opracowany model oraz sformułowanie problemu. W szóstym rozdziale opisane zostały eksperymenty weryfikujące poprawność opracowanego modelu, wykonane w środowisku programowania deklaratywnego IBM ILOG. Eksperymenty ilustrują możliwości praktycznego wykorzystania proponowanego rozwiązania. Ważniejsze wnioski i kierunki przyszłych badań sformułowano w rozdziale siódmym.

2. Przegląd literaturowy

Problem transportu towarów za pośrednictwem dronów sprowadza się do znanego w literaturze problemu marszrutowania pojazdów – VRP (*ang. Vehicle Routing Problem*) [1]. W najprostszej wersji VRP zakłada, że dostarczany jest jeden rodzaj towaru z wykorzystaniem jednorodnych pojazdów. Poszukiwane są rozwiązania minimalizujące całkowity koszt podróży [2]. Rozszerzenie problemu o założenie, że towary powinny być dostarczone do klientów w określonych przedziałach czasu prowadzi do tzw. Problemu marszrutyzacji z oknami czasowymi – VRPTW (*ang. Vehicle Routing Problem with Time Window*) [1]. Tego typu problemy są najczęściej spotykane w praktyce. Problemy marszrutyzacji bezzałogowych statków powietrznych klasy VRPTW znajdują swoje zastosowania w zarówno rozwiązaniach militarnych jak i cywilnych [1, 3, 4].

Według literatury [6, 14, 15] problem wyznaczania tras dla bezzałogowych statków powietrznych modelowany jest zwykle jako standardowy problem VRP z dodatkowymi ograniczeniami odzwierciedlającymi specyfikę zastosowania. Pierwsze prace w tym zakresie dotyczyły opracowania metod pozwalających na uzyskanie akceptowalnych rozwiązań w zadanym przedziale czasu. Ze względu na specyfikę zagadnienia wykorzystania dronów w problemie VRP oprócz minimalizacji kosztu podróży można wyodrębnić inne kryteria związane z: zmniejszeniem indywidualnych kosztów pracy drona (zużycie baterii), skrócenie czasu operacji, zwiększenie bezpieczeństwa operacji [7]. Kolejnym aspektem odróżniającym rozważany problem od standardowej wersji VRP jest środowisko, w którym planowane są marszrutu. Przy transporcie z wykorzystaniem pojazdów

lądowych lub statków morskich trasy wyznaczone są w przestrzeni 2D [8]. Środowisko pracy bezałogowego statku powietrznego należy do przestrzeni trójwymiarowej, stąd też, wyznaczanie tras dla tego typu obiektów należy rozpatrywać w przestrzeni 3D [9]. W pracy [10] przedstawiony został model matematyczny opisujący wyznaczanie marszrut bezałogowych statków powietrznych w przestrzeni 3D. Należy zwrócić uwagę, że spotykane w literaturze podejścia koncentrują się głównie na wyznaczaniu marszrut dronów bez uwzględniania zmienności warunków pogodowych oraz wynikającego z nich nieliniowego zużycia energii [11]. Stosowanie w praktyce takich rozwiązań wymusza, w trakcie lotu, ciągle dostosowywanie wcześniej wyznaczonych marszrut. Proces ten jest bardzo złożony i nie zabezpiecza planu misji przed jej ewentualnym niepowodzeniem np. spowodowanym wyczerpaniem baterii [6].

Alternatywą dla takiego postępowania może być podejście umożliwiające uwzględnianie niepewności/zmienności warunków pogodowych i wynikającej z niej poziomu zużycia energii, już na etapie planowania misji lotów. Tego typu problem stanowi rozszerzenie VRPTW o elementy związane z zużyciem energii zależnej od warunków pogodowych oraz przyjętej marszruty lotu [10]. W pracach [12, 13] zostały zaproponowane wstępne heurystyki umożliwiające wyznaczenie tego typu rozwiązań. Przedstawiona praca stanowi rozszerzenie prowadzonych badań o możliwość wykorzystania środowisk programowania deklaratywnego (IBM ILOG).

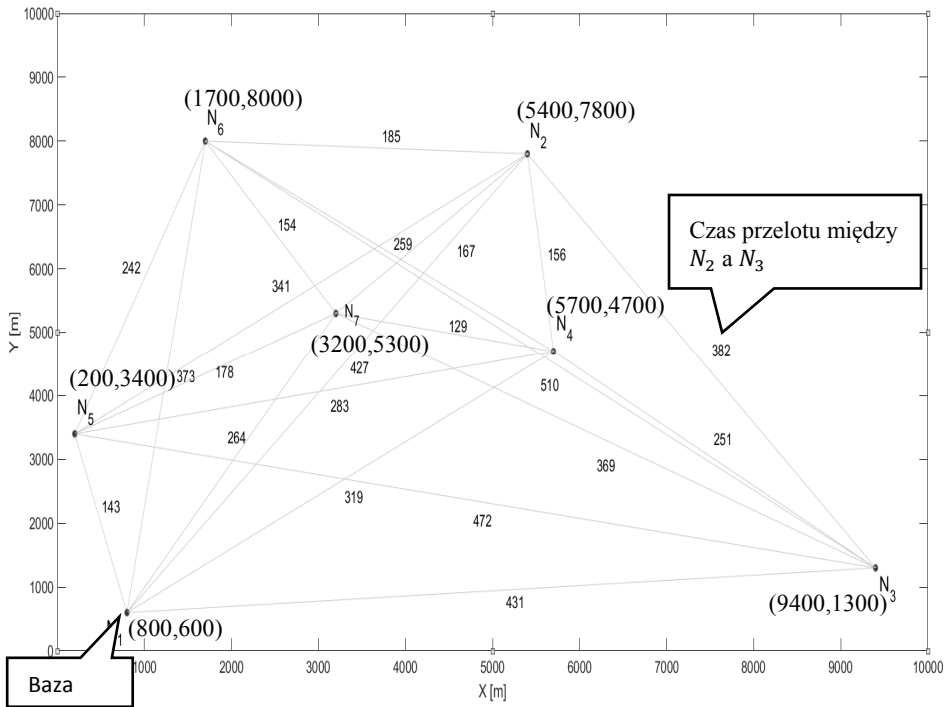
3. Przykład motywacyjny

Rozważany problem można scharakteryzować następująco. Dane jest przedsiębiorstwo, które prowadzi usługi transportu powietrznego za pośrednictwem floty dronów. W rozważanym przypadku w skład floty wchodzi trzy drony o jednakowych parametrach technicznych – tab.1. Drony dostarczają towar do 6 klientów rozlokowanych na powierzchni 10 km^2 – sieć połączeń została zilustrowana na rys. 1. Wierzchołek N_1 określa pozycję przedsiębiorstwa (bazy, z której startują/lądują drony), wierzchołki $N_2 - N_7$ określają pozycję poszczególnych klientów. Przyjęto, że drony przemieszczają się ze stałą prędkością $v = 20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Wynikające z tego założenia czasy przelotów wzdłuż krawędzi $\{N_i, N_j\}$ grafu zostały przedstawione na rys. 1. Przykładowo czas przelotu pomiędzy węzłem N_6 , a węzłem N_2 wynosi 185 sekund.

Znane są zapotrzebowania poszczególnych klientów na transportowany towar – tab. 2. Zakłada się, drony muszą dostarczyć dokładnie taką ilość towaru jaka jest wymagana przez danego klienta.

Tab. 1. Parametry techniczne drona

Parametry techniczne drona	Wartość	Jednostka
Udźwign Q	100	kg
Pojemność baterii CAP	6000	kJ
Prędkość przelotu v	20	m/s
Aerodynamiczny współczynnik oporu C_D	0,54	-
Powierzchnia czołowa drona A	1,2	m
Szerokość drona b	8,7	m



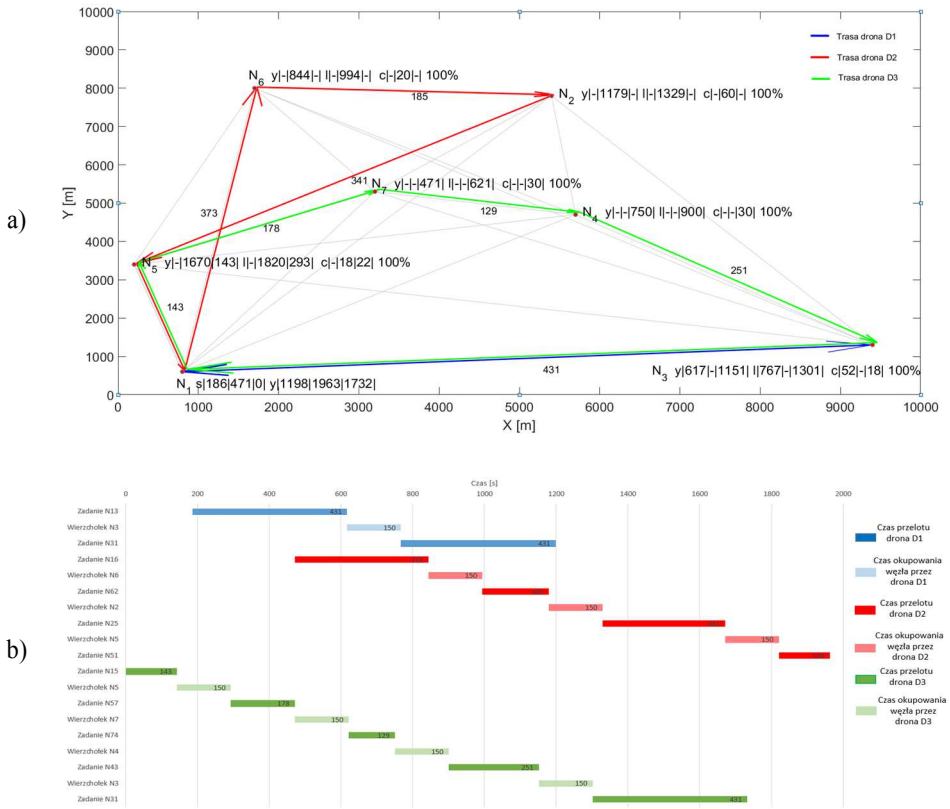
Tab. 2. Zapotrzebowanie klientów na transportowany towar

Węzeł	Zapotrzebowanie na towar [kg]
N1	0
N2	60
N3	70
N4	30
N5	40
N6	20
N7	30

Tab. 3. Warunki pogodowe

Warunki pogodowe	Wartość	Jednostka
Prędkość wiatru v_w	10	m/s
Kierunek wiatru θ	30	°
Gęstość powietrza D	1,225	kg/m ³

Dodatkowo zakłada się, że transport towarów odbywa się w różnych warunkach pogodowych, które wpływają na tempo rozładowania baterii (uwzględnia się prędkość i kierunek wiatru – tab. 3). Zakłada się, że każdy z dronów musi utrzymać zadaną stałą prędkość lotu ($v = 20 \frac{m}{s}$) bez względu na panujące warunki pogodowe. Oznacza to, że przyjęcie stałych, niezmiennych w czasie, planów dostaw (obejmujących marszruty dronów i harmonogram lotów) może skutkować różnym stopniem wykorzystania baterii, a w szczególnych przypadkach ich całkowitym wyczerpaniem. Na rys. 2 przedstawiono przykład marszrut i harmonogramu lotów dronów gwarantujących dostarczenie do klientówżądanego towaru (100% satysfakcji klientów) w zadanych warunkach pogodowych (tab. 3). Jak łatwo zauważyć w proponowanym rozwiązaniu towar zostanie dostarczony w czasie nie przekraczającym 2000 s.

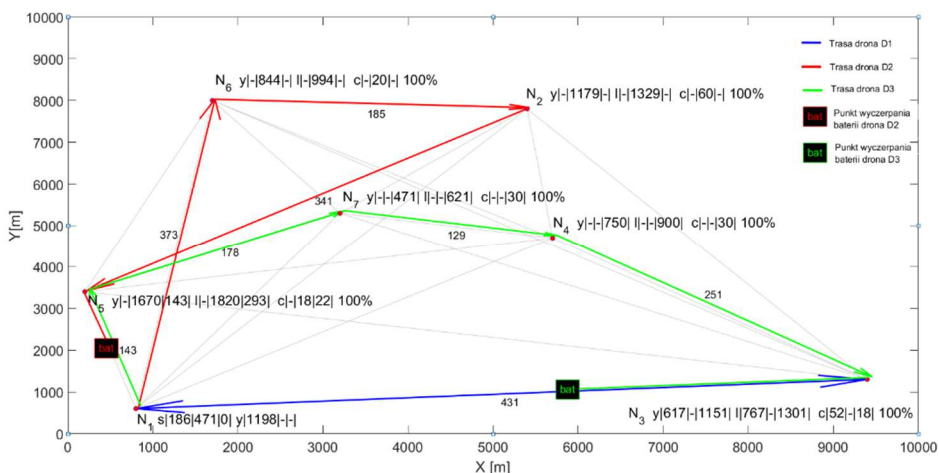


Rys. 2. Marszruty a) i harmonogram lotu b) floty dronów które gwarantują dostarczenie do klientów żdanego towaru (warunki pogodowe: prędkość wiatru = 10 m/s, kierunek wiatru = 30°)

W przyjętym rozwiązaniu drony przemieszczają się odpowiednio wzdłuż marszrut $\Pi_1 = (N_1, N_3, N_1)$, $\Pi_2 = (N_1, N_6, N_2, N_5, N_1)$, $\Pi_3 = (N_1, N_5, N_7, N_4, N_3, N_1)$. Przykładowo dron D_1 (kolor niebieski) przemieszcza się z bazy N_1 do węzła N_3 , gdzie dostarcza 52 kg towaru, a następnie wraca do bazy. Dron numer D_2 (kolor czerwony) przemieszcza się z bazy N_1 przez wierzchołki N_6 , N_2 , N_5 po czym wraca do bazy N_1 , zostawiając kolejno 20, 60 i 18 kg towaru. Dron D_3 (kolor zielony) dostarcza towar do klientów w węzłach: N_5 - 22 kg, N_7 - 30 kg, N_4 - 30 kg, N_3 - 18 kg, a następnie wraca do bazy.

Taka organizacja planu lotów nie prowadzi do kolizji (drony nie wykorzystują współdzielonych krawędzi jednocześnie -np. krawędź łącząca wierzchołki N_3 i N_1) oraz gwarantuje dodatni poziom baterii na koniec misji. Stopień wykorzystania baterii dla każdego z dronów wynosi odpowiednio 77,58%, 88,93% oraz 97,53%.

Przedstawione rozwiązanie nie jest jednak dopuszczalne w każdych warunkach pogodowych. Przykładowo gdy kierunek wiatru ulegnie zmianie z 30° na 60° , a prędkość wiatru zmieni się z $10 \frac{m}{s}$ na $12 \frac{m}{s}$ zastosowanie planu lotów z rys. 2 doprowadzi do całkowitego wyczerpania baterii drona D_2 jak i D_3 zanim jeszcze powrócą one do bazy. Sytuację tę ilustruje rys. 3. Jak łatwo zauważyć D_2 zakończy swój lot w trakcie przelotu lotu z wierzchołka N_5 do N_1 , zaś dron D_3 w trakcie przelotu z wierzchołka N_3 do N_1 . W takiej sytuacji należy poszukiwać innych, dedykowanych dla zadanych warunków pogodowych, planów lotów.



Rys. 3. Wyniki symulacji, gdy: prędkość wiatru = 12 m/s, kierunek wiatru = 60°

Biorąc pod uwagę, że przyjęte warunki pogodowe mogą wpływać na możliwość realizacji danego planu lotów rozważany problem sprowadza się do poszukiwania odpowiedzi na następujące pytanie:

Czy zadana flota dronów umożliwia zaspokojenie potrzeb klientów (dostarczenie żądanych ilości towarów) w zadanej sieci transportowej w określonych warunkach pogodowych ?

Inaczej mówiąc rozważany problem sprowadza się do problemu marszrutyzacji i harmonogramowania floty dronów dla zadanych zmiennych warunków pogodowych (prędkość i kierunek wiatru). Poszukiwane są rozwiązania maksymalizujące satysfakcje klientów (funkcja określająca stopień zaspokojenia potrzeb klientów) w zadanych warunkach pogodowych i ograniczonych poziomach baterii.

4. Model deklaracyjny

W rozważanym problemie zakłada się, że znana jest struktura sieci dystrybucji dostaw (liczba, lokalizacja i zapotrzebowanie klientów). Transport towaru odbywa się za pomocą bezałogowych statków powietrznych. Znany jest również przedział czasu tzw. horyzont, w którym powinny być zakończone wszystkie loty. W tym kontekście uwzględnia się następujące założenia:

- Warunki pogodowe są znane (prędkość v_w i kierunek wiatru θ).
- Warunki pogodowe są niezmiennie w całym horyzoncie czasowym.
- Wszystkie drony znajdują się w bazie przed rozpoczęciem misji transportu towaru do klientów.
- Do klientów dostarczany jest ten sam rodzaj ładunku.
- Podczas lotu masa całkowita drona jest stała (tzn. nie uwzględnia się zmniejszenia masy na wskutek pozostawienia części ładunku).
- Drony przemieszczają się ze stałą prędkością $v = 20 \frac{m}{s}$.
- Poszukiwane są plany lotów, które nie powodują kolizji.
- Poszukiwane są marszruty gwarantujące najwyższy poziom satysfakcji klienta.

Opracowany model definiowany jest następująco:

Parametry

Sieć

I – liczba węzłów

$t_{i,j}$ – czas przelotu pomiędzy węzłami N_i , a N_j

m_i – zapotrzebowanie na towar w i -tym węźle $i = 1..I$, $m_1 = 0$

w_i – priorytet i -tego węzła $i = 1..I$, $w_1 = 0$

TN – czas okupowania węzła przez drona (czas rozładowania towaru)

TS – odstęp czasu z jakim drony mogą startować z bazy

$block_{\{i,j\};\{a,b\}}$ – zmienna binarna odpowiadająca przecinającym się krawędziom

$$block_{\{i,j\};\{a,b\}} = \begin{cases} 1 & \text{gdy krawędzie } \{i,j\} \text{ i } \{a,b\} \text{ się przecinają} \\ 0 & \text{w innych przypadkach} \end{cases}$$

Parametry techniczne floty dronów

K – liczebność floty dronów

Q – maksymalna ładowność drona

CAP – pojemność baterii drona

$e_{i,j}$ – zużycie energii przez drona podczas lotu z węzła N_i do N_j

C_D – aerodynamiczny współczynnik oporu

A – powierzchnia czołowa drona

b – szerokość drona

W – masa całkowita drona

$va_{i,j}$ – prędkość generowanego ciągu silnika

Parametry środowiska

H – horyzont planowania $H = [0, t_{max}]$

D – gęstość powietrza

v_w – prędkość wiatru

θ – kierunek wiatru

Zmienne decyzyjne

$x_{i,j}^k$ - zmienna binarna opisująca, czy k -ty dron przemieszcza się z węzła N_i do węzła N_j

$$x_{i,j}^k \begin{cases} 1 & \text{gdy } k - \text{ty dron przemieszcza się z węzła } N_i \text{ do węzła } N_j \\ 0 & \text{w innych przypadkach} \end{cases}$$

s^k – moment startu k -tego drona

y_i^k – moment, w którym k -ty dron przybywa do węzła N_i

c_i^k – masa ładunku dostarczonego do węzła N_i przez k -tego drona

cp_i – łączna masa ładunku dostarczona do węzła N_i

bat^k – poziom baterii k -tego drona

Zbiory

Y^k – zbiór momentów y_i^k - harmonogram k -tego drona

Y – rodzina Y^k – harmonogram floty dronów

C^k – zbiór c_i^k – masa ładunku dostarczona przez k -tego drona

C – rodzina C^k

Π – zbiór marszrut floty dronów

Ograniczenia

Wyznaczenie marszrut. Relacje między zmiennymi opisującymi czasy rozpoczęcia oraz kolejność zadań.

$$s^k \geq 0, k = 1 \dots K \tag{1}$$

$$(k \neq q) \Rightarrow (|s^k - s^q| \geq TS), k, q = 1 \dots K \tag{2}$$

$$\sum_{j=1}^I x_{1,j}^k = 1, k = 1 \dots K \quad (3)$$

$$(x_{1,j}^k = 1) \Rightarrow y_j^k = s^k + t_{1,j}, j = 1 \dots I, k = 1 \dots K \quad (4)$$

$$(k \neq q \wedge y_i^k \neq 0 \wedge y_i^q \neq 0) \Rightarrow (|y_i^k - y_i^q| \geq TN), i = 1 \dots I, k, q = 1 \dots K \quad (5)$$

$$(x_{i,j}^k = 1) \Rightarrow y_j^k = y_i^k + t_{i,j} + TN, j = 1 \dots I, i = 2 \dots I, k = 1 \dots K \quad (6)$$

$$y_i^k \geq 0, i = 1 \dots I, k = 1 \dots K \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^I x_{i,j}^k = \sum_{j=1}^I x_{j,i}^k, i = 1 \dots I, k = 1 \dots K \quad (8)$$

$$y_i^k \leq H * \sum_{j=1}^I x_{i,j}^k \quad \forall i \in I, \forall k \in K \quad (9)$$

Unikanie kolizji. Przecinające się krawędzie ($b_{\{i,j\};\{a,b\}} = 1$) nie mogą być zajęte w tym samym czasie przez drony ($x_{i,j}^k = 1, x_{i,j}^q = 1$)

$$\begin{aligned} & (block_{\{i,j\};\{a,b\}} \wedge x_{i,j}^k = 1 \wedge x_{a,b}^q = 1) \\ & \Rightarrow (y_b^q \leq y_j^k - t_{i,j}) \vee (y_j^k \leq y_b^q - t_{a,b}) \\ & i, j = 1 \dots I, k, q = 1 \dots K, k \neq q \end{aligned} \quad (10)$$

Dostarczanie ładunków. Relacje między zmiennymi opisującymi ilość dostarczonego ładunku do węzłów przez drony, a zapotrzebowaniem na towar w danym węźle.

$$c_i^k \geq 0, i = 1 \dots I, k = 1 \dots K \quad (11)$$

$$c_i^k \leq Q * \sum_{j=1}^I x_{i,j}^k, i = 1 \dots I, k = 1 \dots K \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^I c_i^k \leq Q, k = 1 \dots K \quad (13)$$

$$(x_{i,j}^k = 1) \Rightarrow c_j^k \geq 1, k = 1 \dots K, i = 1 \dots I, j = 2 \dots I \quad (14)$$

$$x_{i,i}^k = 0, i = 1 \dots I, k = 1 \dots K \quad (15)$$

$$cp_i \leq m_i, i = 1 \dots I \quad (16)$$

$$\sum_{k=1}^K c_i^k = cp_i, i = 1 \dots I \quad (17)$$

$$\sum_{j=1}^I x_{1,j}^k = 1, k = 1 \dots K \quad (18)$$

Zużycie baterii. Ilość potrzebnej energii do wykonania zadania nie może przekraczać maksymalnej pojemności baterii drona.

$$bat^k \leq CAP, k = 1 \dots K \quad (19)$$

$$\sum_{i=0}^I \sum_{j=0}^I x_{i,j}^k * t_{i,j} * e_{i,j}, k = 1 \dots K \quad (20)$$

$$e_{i,j} = \frac{1}{2} C_D A D (v a_{i,j})^3 + \frac{W^2}{D b^2 v a_{i,j}}, i, j = 1 \dots I \quad (21)$$

$$v a_{i,j} = \sqrt{(v \cos \theta - v_w \cos \theta)^2 + (v \sin \theta - v_w \sin \theta)^2}, \quad (22)$$

$$i, j = 1 \dots I$$

Funkcja celu. Maksymalizacja zadowolenia klienta. Zadowolenie klienta wyrażone jest w postaci sumy iloczynu zmiennej w_i oraz cp_i . Satisfakcję klienta należy rozumieć jako stosunek ilości dostarczonego towaru do jego zapotrzebowania w danym węźle wyrażoną w procentach.

$$CS = \max \sum_{i=0}^I w_i * cp_i \quad (23)$$

5. Sformułowanie problemu

W kontekście wprowadzonego modelu rozważany problem wiąże się z odpowiedzią na następujące pytanie:

Czy dla floty K-dronów, przemieszczających się w sieci transportowej składającej się z I wierzchołków, istnieją takie marszruty Π , które gwarantują maksymalny poziom satysfakcji klienta CS przy spełnieniu ograniczeń związanych z unikaniem kolizji (10), dostarczeniem wymaganej ilości ładunku (11) - (18) oraz zużyciem energii (19)-(22)?

Badany problem można rozpatrywać jako optymalizacyjny problem z ograniczeniami (*COP*, ang. *Constraint Optimization Problem*) [12]:

$$COP = (V, D, C, CS) \quad (24)$$

gdzie: $\mathcal{V} = \{\Pi, Y, C\}$ – zbiór zmiennych decyzyjnych: Π – zmienne opisujące marszruty dronów, Y – zmienne opisujące harmonogram zadań floty dronów, C – zmienne opisujące ilości towarów dostarczanych przez drony.

\mathcal{D} – skończony zbiór opisów zmiennych decyzyjnych,

\mathcal{C} – zestaw ograniczeń opisujących relację między trasami, harmonogramem dronów oraz transportowanymi ładunkami (1)-(22),

CS – funkcja celu reprezentująca poziom satysfakcji klienta.

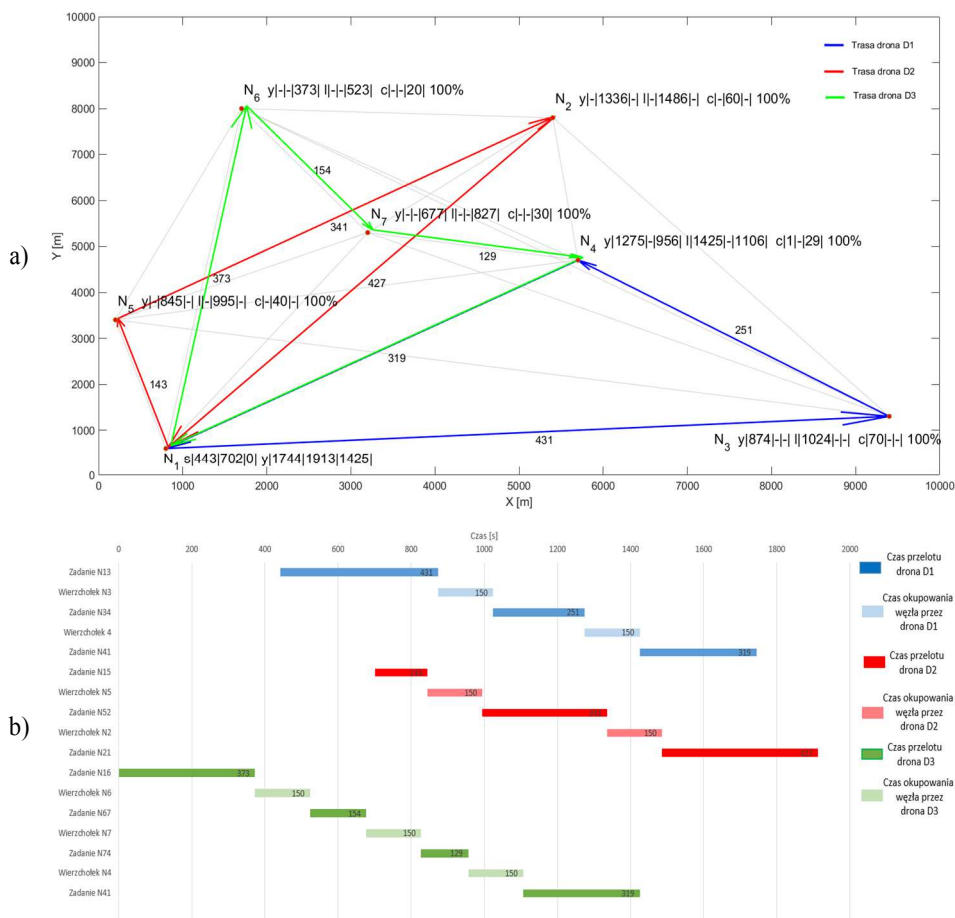
Rozwiązywanie problemu optymalizacji z ograniczeniami polega na określeniu takich wartości zmiennych decyzyjnych, dla których spełnione są dane ograniczenia, a funkcja celu osiąga maksimum. Implementacja COP w środowisku programowania z ograniczeniami np. IBM ILOG pozwala na zbudowanie silnika obliczeniowego, który może być wykorzystany w systemach wspomagania decyzji (DSS).

6. Eksperymenty obliczeniowe

W rozdziale 3. zauważono, że dla rozważanej sieci dostaw marszruta z rys. 2, w przypadku warunków pogodowych: $v_w = 12 \frac{m}{s}$; $\theta = 60^\circ$, nie sprawdza się - skutkuje wyczerpaniem baterii dronów D_2 oraz D_3 . Opracowany model może zostać wykorzystany w próbie wyznaczenia misji lotów gwarantującej powrót wszystkich dronów do bazy przy zadanych warunkach pogodowych, przy jednoczesnej maksymalizacji poziomu zadowolenia klienta. Inaczej mówiąc, poszukiwana jest odpowiedź na następujące pytanie:

Czy dla floty 3-dronów, przemieszczających się w sieci transportowej z rys. 1, istnieją takie marszruty Π , które gwarantują najwyższy poziom satysfakcji klienta w określonych warunkach pogodowych ($v_w = 12 \frac{m}{s}$; $\theta = 60^\circ$)?

Odpowiedź na tak postawione pytanie wiąże się z rozwiązaniem problemu (23). Problem ten został zaimplementowany i rozwiązany w środowisku programowania deklaratywnego IBM ILOG (Intel Core i7-M4800MQ 2.7 GHz, 32 GB RAM). Rozwiązanie otrzymane zostało w czasie 5,14 s. Na rys. 4. przedstawiono otrzymane marszruty i harmonogram lotów dronów. Przyjęcie takiego rozwiązania gwarantuje dostarczenie do klientów żadanego towaru w zadanych warunkach pogodowych. Satysfakcja klientów we wszystkich węzłach wyniosła 100%. Zużycie baterii dla każdego z dronów przy danej marszrucie oraz warunkach pogodowych wynosi odpowiednio: 94,86%, 98,12% oraz 99,5%.



Rys. 4. Marszruty a) i harmonogram lotu b) floty dronów, które gwarantują dostarczenie do klientów żądanego towaru (warunki pogodowe: prędkość wiatru = 12 m/s, kierunek wiatru = 60°)

Wykorzystując opracowany model przeprowadzono serie eksperymentów mających na celu ocenę wpływu pogody na otrzymywane rozwiązania oraz skali problemów, które można efektywnie rozwiązywać (w trybie online: czas obliczeń < 300 s).

W pierwszym przypadku dla zadanej sieci (rys. 1) i stałej floty dronów (3 drony – tab. 1) wyznaczone zostały misje lotów przy zmiennych warunkach pogodowych tj. $v_w = 5 - 15 \frac{m}{s}$; $\theta = 30^\circ - 360^\circ$. Wyniki badań zostały przedstawione w tab. 4 oraz tab. 5.

Tab. 4. Wyniki symulacji przy stałej prędkości wiatru =10 m/s oraz zmiennym kierunku wiatru

Kierunek wiatru [°]	Satysfakcja klienta [%]	Czas symulacji [s]
30	100	6,03
60	100	5,33
90	100	6,39
120	100	6,27
150	100	6,52
180	100	6,82
210	100	5,47
240	100	5,31
270	100	6,32
300	100	5,29
330	100	5,3
360	100	6,33

Tab. 5. Wyniki symulacji przy zmiennej prędkości wiatru oraz stałym kierunku wiatru = 30°

Prędkość wiatru [m/s]	Satysfakcja klienta [%]	Czas symulacji [s]
5	100	5,91
6	100	6,25
7	100	26,83
8	100	6,42
9	100	6,11
11	100	7,62
12	100	5,02
13	83,3	21,73
14	66,6	23,59
15	66,6	12,03

Na podstawie tab. 4 łatwo zauważyć, że przy prędkości wiatru $v_w = 10 \frac{m}{s}$ oraz kierunku zakresie 30°-360° możliwe jest wyznaczenie marszrut gwarantujących satysfakcję klientów na poziomie 100%. W przypadku, gdy kierunek wiatru jest stały, a zmienia się wartość prędkości wiatru zgodnie z tab. 5, to przy prędkościach wiatru większej niż $13 \frac{m}{s}$ znalezienie rozwiązania gwarantującego 100% zadowo-

lenia klientów nie jest już niemożliwe. Innymi słowy zadana flota dronów pozwala na zaspokojenie wszystkich potrzeb klientów tylko w sytuacji gdy prędkość wiatru nie przekracza $12 \frac{m}{s}$.

Kolejnym etapem badań była ocena efektywności opracowanego podejścia. Podczas eksperymentów założono, że maksymalny udźwig drona Q jest zbilansowany względem łącznej masy zapotrzebowania na towar we wszystkich węzłach. Wyniki zostały przedstawione w tab. 6. Jak łatwo zauważyć uzyskanie odpowiedzi na postawione pytanie w czasie < 300 s jest możliwe dla sieci, w których liczba dronów ≤ 4 liczby klientów ≤ 8 .

Tab. 6. Wyniki poszukiwań maksymalnej złożoności sieci, przy prędkości wiatru = 10 m/s oraz kierunku wiatru = 30°

Lp.	Liczba klientów	Liczba dronów	Satysfakcja klientów = 100%	Czas obliczeń [s]
1	6	2	tak	7,46
2	6	3	tak	6,03
3	6	4	tak	10,18
4	6	5	tak	113,93
5	6	6	brak rozwiązania	300
6	7	2	tak	5,6
7	7	3	tak	11,05
8	7	4	tak	187,57
9	7	5	nie	300
10	7	6	nie	300
11	8	2	tak	15,82
12	8	3	nie	28,81
13	8	4	tak	253,22
14	8	5	brak rozwiązania	300
15	8	6	nie	300
16	9	2	nie	300
17	9	3	brak rozwiązania	300
18	9	4	nie	300
19	9	5	brak rozwiązania	300
20	9	6	brak rozwiązania	300

7. Wnioski

Zaproponowany model deklaratywny (zaimplementowany w środowisku IBM ILOG) pozwala na wyznaczenie marszrut floty dronów gwarantujących maksymalny poziom satysfakcji klienta dla różnych warunków pogodowych. Jak pokazały wyniki eksperymentów, dopuszczalny rozmiar sieci, dla których możliwe jest poszukiwanie tego typu rozwiązań to 8 węzłów przy flocie zawierającej 4 drony. Oznacza to, że zaproponowane podejście może być wykorzystane w metodach zakładających dekompozycje sieci na wiele niewielkich klastrów. W tym ujęciu opracowane podejście może stanowić element heurystyk prezentowanych w pracach [12], [13].

Przyszłe prace będą się koncentrować na rozszerzeniu opracowanego modelu o możliwość uwzględnienia zmiennej masy drona oraz na poszukiwaniu tzw. marszrut „odpornych” na zadane warunki pogodowe.

Bibliografia

1. Abdelhafiz, M., Mostafa, A., Girard, A.: Vehicle Routing Problem Instances: Application to Multi-UAV Mission Planning. In: AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics (2010)
2. Golden, B.L., Raghavan, S., Wasil, E.A.: The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges. Springer Science + Business Media, New York (2010)
3. Yakici, E.: Solving location and routing problem for UAVs. In: Computers & Industrial Engineering. Vol. 102. 294-301 (2016) doi.org/10.1016/j.cie.2016.10.029
4. Ullah, S., Kim, K.I., Kim, K.H., Imran, M., Khan, P., Tovar, E., Ali, F.: UAV enabled healthcare architecture: Issues and challenges. In: Future Generation Computer Systems. Vol. 97. 425-432 (2019). doi.org/10.1016/j.future.2019.01.028
5. Wen-Chyuan, C., Yuyu, L., Shang, Urban, T.L.: Impact of drone delivery on sustainability and cost: Realizing the UAV potential through vehicle routing optimization. In: Applied Energy. Vol. 242. 1164-1175 (2019). doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.117
6. Bocewicz, G., Nielsen, P., Banaszak, Z., Thibbotuwawa, A.: Routing and scheduling of unmanned aerial vehicles subject to cyclic production flow constraints. In: Proceedings of 15th International Conference on Distributed Computing and Artificial Intelligence. Advances in Intelligent Systems and Computing. Vol. 801. 75-86 (2019), doi.org/10.1007/978-3-319-99608-0_9

7. Enright, J.J., Frazzoli, E., Pavone, M., Savla, K.: Handbook of Unmanned Aerial Vehicles (2015). doi.org/10.1007/978-90-481-9707-1
8. Karpenko, S., Konovalenko, I., Miller., et al.: UAV control on the basis of 3D landmark bearing-only observations. *Sensors (Switzerland)* 15, 29802-29820 (2015), doi.org/10.3390/s151229768
9. Goerzen, C., Kong, Z., Mettler, B.: A survey of motion planning algorithms from the perspective of autonomous UAV guidance. In: *Journall of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Application*. Vol. 57. 65-100 (2010). doi.org/10.1007/s10846-009-9383-1
10. Guerriero, F., Surace, R., Loscrí, V., Natalizio, E.: A multi-objective approach for unmanned aerial vehicle routing problrmeith soft time windows constraints. In: *Applied Mathematical Modeling*. Vol 38. 839-852 (2014), doi.org/10.1016/j.apm.2013.07.002
11. Wang, X., Poikonen, S., Golden, B.: The Vehicle Routing Problem with Drones : A Worst-Case Analysis Outline Introduction to VRP Introduction to VRPD, pp. 1–22 (2016)
12. Thibbotuwawa, A., Nielsen, P., Banaszak Z., Bocewicz, G.: Energy Consumption in Un-manned Aerial Vehicles: A Review of Energy Consumption Models and Their Relation to the UAV Routing. In: *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Vol. 853. 173–184 (2019). doi.org/10.1007/978-3-319-99996-8_16
13. Thibbotuwawa, A., Nielsen, P., Zbigniew, B., Bocewicz, G.: Factors affecting Energy consumption of unmanned aerial vehicles: an analysis of how energy consumption changes in relation to UAV routing. In: *Advances in Intelligent Systems and Computing*, pp. 228–238. Springer International Publishing (2018)
14. Dai, R., Fotebar, S., Radmanesh, M., Kumar, K.: Quality-aware UAV coverage and path planning in geometrically complex environments. In: *Ad Hoc Network*. Vol.73.95-105 (2018), doi.org/10.1016/j.adhoc.2018.02.008
15. Chauchan, D., Unnikrishnan, A., Figliozzi, M.: Maximum coverage capacitated facility location problem with range constrained drones. In: *TransportationResearch Part C: Emerging Technologies*. Vol. 99. 1-18 (2019). doi.org/10.1016/j.trc.2018.12.001

Streszczenie

W artykule rozważany jest problem dostarczania towarów w sieci dystrybucyjnej, w której operacje transportu realizowane są przez flotę bezałogowych statków powietrznych (BSP). Szczególny nacisk położony jest na możliwość uwzględniania warunków pogodowych, w których odbywa się transport.

Rozważany problem sprowadza się do wyznaczenia marszruty gwarantującej bezkolizyjne dostarczenie towaru do węzła, przy uwzględnieniu warunków pogodowych oraz poziomu baterii dronów. Zaproponowany został deklaracyjny model, którego implementacja w środowisku programowania IBM ILOG pozwala na rozwiązywanie tego typu problemów w trybie on-line. Przedstawione eksperymenty obliczeniowe, potwierdzają poprawność opracowanego modelu.

Abstract

A problem of delivering goods in a distribution network is considered in which, transport operations are carried out by a fleet of unmanned aerial vehicles (UAV). The weather conditions in which a transport operations take place and a UAV battery level are taken into account. The above-mentioned weather conditions and the battery level affect the determination of the route guaranteeing collision-free delivery. The goods must be delivered to a specific node in a given time window. Specifying the route is the focus of this study. Solutions maximizing the level of customer satisfaction are sought. Computational experiments which show impact of the weather conditions to on route determination are presented.

Keywords: optimization, drones, routing and scheduling