

POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA



WYDZIAŁ ELEKTRONIKI I INFORMATYKI

mgr inż. Grzegorz Radzki
Numer albumu D-198

Metoda planowania misji lotów bezzałogowych
statków powietrznych odpornych na zmienne
warunki pogodowe

Rozprawa napisana pod kierunkiem
dr hab. inż. Grzegorza Bocewicza, prof. PK

Koszalin 2022

Grzegorz Radzki
Nr albumu: D-198
Wydział: Elektroniki i Informatyki

Koszalin, dn.11.07.2022

Spis Treści

SPIS TREŚCI	3
SPIS SYMBOLI	5
SPIS SKRÓTÓW	7
STRESZCZENIE	9
ABSTRACT	11
1. WSTĘP	13
1.1 WPROWADZENIE	13
1.2 CEL I TEZA	15
1.3 ZAKRES	17
2 PRZEGLĄD LITERATURY	18
2.1 PROBLEM MARSZRUTYZACJI VRP	18
2.2 ODMIANY VRP	20
2.2.1 <i>Problem planowania odpornych misji BSP</i>	20
2.2.2 <i>Stochastyczny problem marszrutyzacji pojazdów</i>	23
2.2.3 <i>Problem marszrutyzacji pojazdów z uwzględnieniem okien czasowych</i>	23
2.2.4 <i>Problem marszrutyzacji pojazdów z uwzględnieniem podziału dostaw na kilka marszrut</i>	24
2.2.5 <i>Problem marszrutyzacji pojazdów z uwzględnieniem wielu baz</i>	24
2.2.6 <i>Problem marszrutyzacji pojazdów z uwzględnieniem ładowności pojazdu</i>	25
2.2.7 <i>Podsumowanie</i>	25
2.3 METODY	26
2.3.1 <i>Metody dokładne</i>	26
2.3.2 <i>Metody aproksymacyjne</i>	27
2.3.2.1 <i>Metody heurystyczne</i>	27
2.3.2.2 <i>Metody metaheurystyczne</i>	30
2.3.3 <i>Podsumowanie</i>	33
2.4 PROBLEMY MARSZRUTYZACJI BSP	35
2.4.1 <i>Zastosowanie BSP</i>	35
2.4.2 <i>Planowanie misji BSP</i>	36
2.4.2.1 <i>Strategie wyznaczania bezkolizyjnych marszrut i harmonogramów</i>	37
2.4.2.2 <i>Czynniki wpływające na zużycie energii przez BSP</i>	38
2.4.3 <i>Modele zużycia energii BSP</i>	40
2.5 PODSUMOWANIE	42
3 REFERENCYJNY MODEL PROBLEMU PLANOWANIA ODPORNYCH MISJI LOTU FLOTY BSP	43
3.1 PROAKTYWNO-REAKTYWNE PLANOWANIE MISJI LOTÓW	43
3.2 PROBLEM SPEŁNIANIA OGRANICZEŃ	51
3.3 RELAKSACJA OGRANICZEŃ	56
3.3.1 <i>Odporność na zakłócenia</i>	56
3.3.2 <i>Relaksacja ograniczeń</i>	61
3.4 PODSUMOWANIE	62

4	METODA PROAKTYWNO-REAKTYWNEGO WYZNACZANIA ODPORNICH PLANÓW MISJI LOTÓW FLOTY BSP	64
4.1	OPIS METODY	64
4.2	ALGORYTM PLANOWANIA PROAKTYWNEGO	66
4.3	ALGORYTM PLANOWANIA REAKTYWNEGO	69
4.4	PODSUMOWANIE	73
5	WERYFIKACJA METODY	75
5.1	PLANOWANIE PROAKTYWNO-REAKTYWNE	75
5.1.1	<i>Planowanie proaktywne</i>	77
5.1.2	<i>Planowanie reaktywne</i>	80
5.1.2.1	Zmiana warunków pogodowych	80
5.1.2.2	Wprowadzenie nowych odbiorców do sieci transportowej	82
5.1.2.3	Zmiana zleceń	84
5.1.3	<i>Podsumowanie</i>	86
5.2	EKSPERYMENTY OBLICZENIOWE	87
5.2.1	<i>Ocena skalowalności</i>	87
5.2.2	<i>Metody przybliżone i dokładne</i>	88
5.2.3	<i>Podsumowanie</i>	94
6	PODSUMOWANIE	95
6.1	REZULTATY	96
6.2	KIERUNEK PRZYSZŁYCH BADAŃ	97
	BIBLIOGRAFIA	98
	SPIS ILUSTRACJI	110
	SPIS TABEL	112

Spis symboli

lG	graf sieci transportowej dla podmisji lS
lU	podzbiór floty ${}^lU \subseteq U$ realizujących podmisję lS
$Y_{k,l}(\theta)$	wartość funkcji odporności misji lotu u_k , dla podmisji lS , dla zadanego kąta θ
$\overline{{}^l\lambda p_l}$	łączna masa towaru dostarczonego do węzła v_i po wystąpieniu zakłócenia $IS(t^*)$ w trakcie realizacji podmisji lS
$\overline{{}^l\pi_k}$	Marszruta u_k po wystąpieniu zakłócenia $IS(t^*)$ w trakcie realizacji podmisji lS ,
$\overline{{}^lY}$	sekwencja harmonogramów $\overline{{}^ly_i^k}$
$\overline{{}^lbat^k}$	całkowite zużycie energii u_k po wystąpieniu zakłócenia $IS(t^*)$ w trakcie realizacji podmisji lS
${}^lS^k$	moment startu u_k dla podmisji lS przed wystąpieniem zakłócenia $IS(t^*)$
${}^lx_{j,i}^k$	zmienna binarna opisująca przelot (1) brak przelotu (0) między węzłami v_j, v_i przed wystąpieniem zakłócenia $IS(t^*)$
${}^ly_i^k$	moment przybycia u_k do węzła v_i przed wystąpieniem zakłócenia $IS(t^*)$
$\overline{{}^l\Lambda}$	sekwencja transportowanych towarów $\overline{{}^l\lambda_i^k}$
$\overline{{}^l\Pi}$	zbiór marszrut $\overline{{}^l\pi_k}$
${}^l\lambda_i^k$	waga towaru dostarczonego do węzła v_i przez u_k przed wystąpieniem zakłócenia $IS(t^*)$
$\overline{{}^lP_{j,i}^k}$	zużycie energii, na jednostkę czasu u_k w trakcie przelotu między węzłami v_j, v_i po wystąpieniu zakłócenia $IS(t^*)$ w trakcie realizacji podmisji lS
$\overline{{}^lS}$	plan podmisji po wystąpieniu zakłócenia $IS(t^*)$
$\overline{{}^lf_{j,i}^k}$	waga towaru transportowanego przez u_k między węzłami v_j, v_i po wystąpieniu zakłócenia $IS(t^*)$ w trakcie realizacji podmisji lS
$\overline{{}^lS^k}$	moment startu u_k po wystąpieniu zakłócenia $IS(t^*)$ w trakcie realizacji podmisji lS
$\overline{{}^lx_{j,i}^k}$	zmienna binarna opisująca przelot (1) brak przelotu (0) między węzłami v_j, v_i , który miał miejsce po wystąpieniu zakłócenia $IS(t^*)$ w trakcie realizacji podmisji lS
$\overline{{}^ly_i^k}$	moment przybycia u_k do węzła v_i po wystąpieniu zakłócenia $IS(t^*)$ w trakcie podmisji lS
$\overline{{}^l\lambda_i^k}$	waga towaru dostarczonego do węzła v_i przez BSP u_k po wystąpieniu zakłócenia $IS(t^*)$ w trakcie realizacji podmisji lS
C_D	współczynnik oporu
$d_{j,i}$	odległość między węzłami v_j, v_i
$t_{j,i}$	czas przelotu między węzłami v_j, v_i
u_k	pojazd należący do floty pojazdów U
$va_{j,i}$	prędkość u_k względem powietrza dla lotu między węzłami v_j, v_i
$vg_{j,i}$	prędkość u_k względem powierzchni ziemi dla lotu między węzłami v_j, v_i
y_i	marszruta
z_i	zapotrzebowanie na towar w węzle v_i
\hat{C}	rodzina zbiorów ograniczeń uwzględniająca podzbiory: marszrut $\overline{{}^l\Pi}$, harmonogramów $\overline{{}^lY}$ oraz zakłóceń $IS(t^*)$
\mathcal{U}^i	zbiór BSP przydzielonych do bazy $v_i \in \mathcal{V}_B$
\mathcal{V}_{DTW_i}	okno czasowe węzła v_i
$\mathcal{V}_{DTW_i}^{down}$	dolna granica przedziału okna czasowego \mathcal{V}_{DTW_i}
$\mathcal{V}_{DTW_i}^{up}$	górną granicę przedziału okna czasowego \mathcal{V}_{DTW_i}
$\hat{\mathcal{V}}$	zbiór zmiennych decyzyjnych
\mathcal{V}_B	zbiór wierzchołków reprezentujących bazy
\mathcal{V}_B	zbiór wierzchołków reprezentujących bazy

\mathcal{V}_D	zbiór wierzchołków reprezentujących punkty dostaw
\mathcal{V}_D	zbiór wierzchołków reprezentujących punkty dostaw
$\mathbb{Y}_{k,l}$	zbiór wierzchołków wielokąta $\mathbb{Y}_{k,l}^*(\theta)$
μ_i	szerokość geograficzna pozycji punktu dostaw v_i
$\varphi_{j,i}$	kąt kursu dla lotu między węzłami v_j, v_i
$\vartheta_{j,i}$	kąt wektora $\overrightarrow{v_{g_{j,l}}}$
ϕ_i	długość geograficzna pozycji punktu dostaw v_i
A	powierzchnia czołowa u_k
CAP	pojemność energetyczna u_k
CK	koszt podróży floty U
D	gęstość powietrza
E	zbiór krawędzi (łuków)
G	skierowany graf reprezentujący sieć transportową
H	horyzont czasowy
$IS(t)$	stan misji lotu S w chwili t
L	wartość określająca liczbę podmisji lS w misji lotu floty BSP S
$M(t)$	alokacja BSP w chwili t
Q	ładowność pojazdu
S	plan misji lotu floty BSP
U	zbiór pojazdów - flota
UB	flota rezerwowych BSP
UR	flota BSP zawrócona do bazy
Z	zbiór wielkości zapotrzebowania na towar w węźle v_i
b	szerokość u_k
ep	ciężar własny u_k
g	przyciąganie ziemskie
l	numer podmisji
m	rozmiar floty U
pn_i	współrzędne geograficzne punktu dostaw v_i $pn_i = (\phi_i, \mu_i)$
ts	przedział czasowy, w którym u_k mogą startować z bazy
wv	prędkość wiatru
w	czas spędzony przy startowaniu i lądowaniu pojazdu
C	wartość łuku (koszt)
\mathcal{D}	skończony zbiór zmiennych decyzyjnych $\overline{{}^l x_{i,j}^k} \in \{0,1\}, \overline{{}^l y_i^k} \in \mathbb{N}, \overline{{}^l \lambda_i^k} \in \mathbb{N}$;
\mathcal{V}	zbiór wierzchołków
$\mathcal{W}(\theta)$	maksymalna prognozowana prędkość wiatru, dla zadanego kąta θ
S	zbiór planów misji S lotów BSP
W	zbiór maksymalnych prognozowanych prędkości wiatru
θ	kierunek wiania wiatru
λy_i	koszt marszruty y_i
f_0	wartość funkcji celu

Spis skrótów

ACO	mrówkowy algorytm optymalizacyjny (ang. Ant Colony Optimization)
AI	metody sztucznej inteligencji (ang. Artificial Intelligence)
AVRP	asymetryczny problem marszrutyzacji pojazdów (ang. Asymmetric Vehicle Routing Problem)
B&B	metoda podziału i ograniczeń (ang. Branch and Bound)
B&C	metoda podziału i odcięć (ang. Branch and Cut)
BC&P	metoda podziału, odcięć i kosztu (ang. Branch, Cut and Price)
BPP	problem pakowania (ang. Bin Packing Problem)
BSP	bezzałogowy statek powietrzny
CLP	skondensowany problem lokalizacji (ang. Capacitated Location Problem)
COP	optymalizacyjny problem spełnienia ograniczeń (ang. Constraints Optimization Problem)
CP	programowanie z ograniczeniami (ang. Constraint Programming)
CS	problem spełniania ograniczeń (ang. Constraints Satisfaction Problem)
CVRP	problem marszrutyzacji pojazdów z uwzględnieniem pojemności pojazdu (ang. Capacitated Vehicle Routing Problem)
DRVRP	problem marszrutyzacji pojazdów odporny na zakłócenia (ang. Disruption-Robust Vehicle Routing Problem)
EFV	elektryczne pojazdy towarowe (ang. Electric Freight Vehicles)
GA	algorytm genetyczny (ang. Genetic Algorithm)
GAP	uogólniony problem przydziału (ang. Generalized Assignment Problem)
GVRP	problem marszrutyzacji pojazdów typu „Green” (ang. Green Vehicle Routing Problem)
HVRP	problem marszrutyzacji pojazdów z uwzględnieniem różnorodności floty (ang. Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem)
ICT	technologie informacyjno-komunikacyjne (ang. Informations nad Communication Technologies)
ILS	iteracyjne przeszukiwanie lokalne (ang. Iterated Local Search)
IoT	internet rzeczy (ang. Internet of Things)
ITS	inteligentne systemy transportowe (ang. Intelligent Transport System)
LP	programowanie liniowe (ang. Linear Programming)
MA	algorytm memetyczny (ang. Memetic algorithm)
MDVRP	problem marszrutyzacji pojazdów z uwzględnieniem wielu baz (ang. Multi Depot Vehicle Routing Problem)
MLP	mieszane programowanie liniowe (ang. Mixed Linear Programming)
MTSP	problem wielu komiwojazerów (ang. Multi Travelling Salesman Problem)
OVRP	otwarty problem marszrutyzacji pojazdów (ang. Open Vehicle Routing Problem)
PSO	problem spełniania ograniczeń
PVRP	periodyczny problem marszrutyzacji pojazdów (ang. Periodic Vehicle Routing Problem)
RO	„odporna” optymalizacja (ang. Robust Optimization)
RVRP	bogaty problem marszrutyzacji pojazdów (ang. Rich Vehicle Routing Problem)
SA	symulowane wyżarzanie (ang. Simulated Annealing)
SDVRP	problem marszrutyzacji pojazdów z uwzględnieniem podziału dostaw na kilka marszrut (ang. Split Delivery Vehicle Routing Problem)
SVRP	stochastyczny problem marszrutyzacji pojazdów (ang. Stochastic Vehicle Routing Problem)
TS	przeszukiwanie z zabronieniami (ang. Tabu Search)
TSP	problem komiwojazera (ang. Travelling Salesman Problem)
UAV	bezzałogowy statek powietrzny (ang. Unmanned Aerial Vehicle)
VRP	problem marszrutyzacji pojazdów (ang. Vehicle Routing Problem)

- VRPTW problem marszrutyzacji pojazdów z uwzględnieniem okien czasowych (ang. Vehicle Routing Problem with Time Windows)
- VRPHTW problem marszrutyzacji pojazdów z uwzględnieniem „twardych” okien czasowych (ang. Vehicle Routing Problem with Hard Time Windows)
- VRPSTW problem marszrutyzacji pojazdów z uwzględnieniem „miękkich” okien czasowych (ang. Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows)

Streszczenie

Zwiększenie jakości usług przy jednoczesnej dekarbonizacji transportu staje się w ostatnich latach zagadnieniem priorytetowym organizacji świadczących usługi transportowe. Obserwowany trend wskazuje, że kluczem do osiągnięcia ww. celu jest wykorzystanie w transporcie bezzałogowych statków powietrznych (BSP). Wyzwania z zakresu logistyki transportu towarów (planowanie misji, marszrutyzacja, harmonogramowanie) należą do zagadnień problemu marszrutyzacji pojazdów (ang. Vehicle Routing Problem, VRP). Literatura przedmiotu obfituje w opracowania dotyczące odmian klasycznego ujęcia problemu VRP, metod rozwiązywania zagadnienia, jak również zastosowania innych niż tradycyjne pojazdy (w tym BSP). Wspólnymi elementami dostępnych rozwiązań jest niezmienność środowiska, w którym odbywa się transport (np. stałe parametry sieci transportowej), jak również nieuwzględnienie indywidualnych cech rozpatrywanej klasy pojazdów.

Dynamiczne środowisko planowania misji floty BSP wymusza przewidywanie zakłóceń tj. zmiany warunków pogodowych, wprowadzenie nowego odbiorcy do sieci transportowej, zmiany terminów dostaw. Pominięcie zdarzeń tego typu może skutkować przerwaniem lub co najmniej opóźnieniem realizacji wyznaczonego planu misji (straty finansowe, wizerunkowe). Praktyka pokazuje, że zarówno decydenci, jak i planiści nie są w stanie przewidzieć chwili wystąpienia tego typu zakłóceń. Z przeprowadzonego przeglądu literatury wynika, że zagadnienia związane z zabezpieczeniem wyznaczonych planów misji floty BSP należą do rzadkości. W tym obszarze należy wyróżnić metody zakładające przyjęcie najgorszych możliwych przypadków na etapie planowania misji (opracowany plan winien być realizowalny przy warunkach nie gorszych niż na etapie jej planowania). W tym obszarze wciąż brakuje rozwiązań wspomagających decydentów w planowaniu misji tj. przed jej realizacją (planowanie proaktywne, jak również reharmonogramowania misji w sytuacji wystąpienia zakłócenia (planowanie reaktywne).

Dysertacja zawiera autorską koncepcję metody proaktywno-reaktywnego planowania misji floty BSP. W konsekwencji sformułowano nowy problem planowania odpornych na wybrane zakłócenia misji floty BSP. W szczególności opracowano referencyjny model planowania misji floty BSP odpornej na trzy rodzaje zakłóceń: zmiana warunków pogodowych, wprowadzenie nowych odbiorców do sieci transportowej, jak również zmiana terminów dostaw. Podstawowym elementem opracowanego modelu jest autorska miara odporności misji BSP, wyrażona funkcją odporności, której wartość określa granicę (maksymalna prędkość wiatru) realizowalności wyznaczonej misji.

Rozważany problem należy do klasy *NP – trudnych*. Oznacza to, że czas wyznaczenia rozwiązania rośnie wykładniczo wraz z jego rozmiarem. Spotykane w praktyce instancje problemów planowania odpornej misji floty BSP zakładają sieci transportowe złożone z kilku/kilkudziesięciu punktów dostaw oraz kilku pojazdów. Wyznaczenie rozwiązania dla takiej skali problemów może zająć kilka godzin/dni lub więcej. W wielu przypadkach zbiór rozwiązań dopuszczalnych dla problemu planowania odpornych misji floty BSP jest zbiorem pustym. Wiąże się to z uwzględnieniem indywidualnych dla każdego punktu dostaw terminów dostaw (okna czasowe) oraz warunków pogodowych, w których dana misja będzie realizowana. W związku z tym wykorzystano metodykę programowania deklaratywnego (programowanie z ograniczeniami). Modele deklaratywne są łatwe do modyfikacji i/lub rozbudowy. Uwzględnienie specyfiki rozważanego zagadnienia (dane, ograniczenia) np. poprzez wyznaczenie nadmiarowych ograniczeń pozwalają na efektywne/szybkie przeszukiwanie przestrzeni potencjalnych rozwiązań. Występowanie nieliniowych ograniczeń w opracowanym modelu (relacje opisujące zużycie energii BSP) skutkuje niewielką skalą rozwiązywalnych w trybie online problemów. W celu zwiększenia tej skali opracowano relaksację ograniczeń zużycia energii. Jej zastosowanie redukuje rozmiar przeszukiwanej przestrzeni potencjalnych rozwiązań, skutkując 70 krotnym zmniejszeniem czasu obliczeń.

Bazując na opracowanym modelu referencyjnym przedstawiono autorską metodę proaktywno-reaktywnego planowania misji floty BSP oraz wskazano możliwości jej wykorzystania. Efektywność opracowanej metody zweryfikowano w serii eksperymentów zakładających reakcję on-line dla różnych wariantów sieci transportowej. Dokonano również porównania jakości rozwiązań oraz czasu wyznaczenia rozwiązania dla metody dokładnej (zaimplementowanej w środowisku programowania deklaratywnego IBM ILOG CPLEX) z autorską wersją algorytmu genetycznego.

Zaproponowana w niniejszej dysertacji metoda proaktywno-reaktywnego planowania misji floty BSP może stanowić podstawę systemu decyzyjnego, którego celem jest wsparcie planisty w wyznaczaniu odpornych misji dla floty BSP. Dzięki zaprezentowanym badaniom możliwym jest opracowanie pochodnych metod planowania misji floty BSP, uwzględniających np. nowe rodzaje zakłóceń, jak również losowości danych w strukturze misji.

Słowa kluczowe:

bezzałogowe statki powietrzne, proaktywno-reaktywne planowanie misji BSP, marszrutyzacja, harmonogramowanie, odporność, zakłócenie, stan misji, misja, wspomaganie decyzji, model deklaratywny, programowanie z ograniczeniami.

Abstract

Increasing the quality of services while decarbonising transport has become a priority issue for organizations providing transport services in recent years. The observed trend indicates that the key to achieving the above-mentioned purpose is to use unmanned aerial vehicles (UAVs) in the transport. Elements of freight transport logistics (mission planning, routing, scheduling) belong to the Vehicle Routing Problem (VRP). The literature on the subject is rich in studies on the varieties of the classical approach to the VRP problem, methods of solving the problem, as well as applications other than traditional vehicles (including UAV). The common elements of the presented solutions are the immutability of the environment in which the transport takes place (e.g. constant parameters of the transport network), as well as not taking into consideration the individual characteristics of the considered vehicle class.

The dynamic environment of planning the UAV fleet mission forces the anticipation of disruptions, i.e. changes in weather conditions, introducing a new recipient to the transport network, changing delivery dates. The omission of such events may result in the interruption or at least delay in the implementation of the designated mission plan (financial and reputational losses). Practice shows that both decision-makers and planners are not able to predict when this kind of disruption will occur. The literature study shows that the issues related to securing the designated plans for the UAV fleet missions are rare. In this area, methods assuming the adoption of the worst possible cases at the stage of planning the mission (the developed plan should be implemented under conditions not worse than at the stage of its planning) should be distinguished. In this area, there is still a lack of solutions supporting decision-makers in planning the mission, i.e. before its implementation (proactive planning, as well as re-scheduling the mission in the event of a disruption (reactive planning).

The dissertation contains the original concept of the proactive-reactive method of planning the UAV fleet missions. As a consequence, a new problem of planning the missions of the UAV fleet resilient to selected disruptions has been formulated. In particular, there has been developed a reference model for planning a UAV fleet mission resistant to three types of disruptions: changing weather conditions, introducing new customers to the transport network, as well as changing delivery times. The basic element of the developed model is the proprietary measure of the robustness of the UAV mission, expressed as the resistance function, the value of which determines the limit (maximum wind speed) of the feasibility of the assigned mission.

The considered problem belongs to the NP-hard class. This means that the time to determine the solution grows exponentially with its size. The practical issues of planning a robust UAV fleet mission assume transport networks consisting of several / several dozen delivery points and several vehicles. It may take hours / days or more to find a solution to this magnitude of problems. In many cases, a set of solutions acceptable to the problem of planning robust UAV fleet missions is an empty set. This is related to taking into account individual delivery dates for each delivery point (time windows) and the weather conditions in which a given mission will be carried out. Therefore, the methodology of declarative programming (Constraints Programming) was used. Declarative models are easy to modify and / or extend. Taking into account the specificity of the issue under consideration (data, constraints), e.g. by designating redundant constraints, allows for an effective / quick search of the space of potential solutions. The occurrence of non-linear constraints in the developed model (relations describing UAV energy consumption) results in a small scale of problems that can not be solved online. In order to expand this scale, the relaxation of energy consumption constraints has been developed. Its use reduces the size of the searched space of potential solutions, resulting in a 70-fold reduction in computation time.

Based on the developed reference model, the proprietary method of proactive-reactive planning of the UAV fleet mission has been presented and the possibilities of its use have been indicated. The

effectiveness of the developed method has been verified in a series of experiments assuming an online response for various variants of the transport network. The quality of solutions and the time of determining the solution for the exact method (implemented in the IBM ILOG CPLEX declarative programming environment) with the proprietary version of the genetic algorithm have also been compared.

The method of proactive-reactive planning of UAV fleet missions proposed in this dissertation can form the basis of a decision-making system, the purpose of which is to support the planner in determining robust missions for the UAV fleet. Thanks to the presented research, it is possible to develop derivative methods of planning a UAV fleet mission, taking into consideration e.g. new types of disruptions, as well as randomness of data in the mission structure.

Key words:

unmanned aerial vehicles, proactive-reactive UAV mission planning, routing, scheduling, robustness, disruption, mission status, mission, decision support, declarative model, constrained programming.

1. Wstęp

1.1 Wprowadzenie

Systemy komunikacji miejskiej i dystrybucji towarów odpowiedzialne za rosnący poziom kongestii stanowią główne źródła zanieczyszczenia środowisk zurbanizowanych, w szczególności zanieczyszczenia powietrza i zanieczyszczenia hałasem. Jakość tych systemów warunkuje zrównoważony rozwój aglomeracji miejskich w wymiarach środowiskowym i społecznym oraz ekonomicznym [1].

Analiza logistyczna najczęściej stosowanych rozwiązań problemów dystrybucji pozwala wyróżnić następujące czynniki decydujące o skuteczności implementowanych strategii zrównoważonego rozwoju [2, 3]:

- rosnące koszty dostawy towarów,
- uciążliwość, w tym wypadki i korki,
- emisja gazów cieplarnianych,
- zmniejszenie powierzchni terenów zielonych na skutek rozwoju infrastruktury drogowej,
- rosnąca liczba odpadów związanych z utrzymaniem tradycyjnych systemów dostaw tj. opony, oleje,
- hałas oraz wibracje.

75% ludności Unii Europejskiej żyje w miastach. Rosnąca liczba mieszkańców miast wymusza stosowny wzrost zapotrzebowania na dostawy. Transport towarowy na obszarach miejskich generuje 25% emisji CO_2 (EC UTF, 2012). Ze względu na topografię infrastruktury miejskiej, transport towarów wiąże się z licznymi przystankami pojazdów transportowych - jednorazowo pokonywane są krótsze dystanse, co skutkuje większym zanieczyszczeniem środowiska niż ma to miejsce w przypadku transportu dalekobieżnego [4]. Kwestie związane z logistyką miejską dotyczą różnych interesariuszy, tj.: władz lokalnych, mieszkańców, konsumentów, spedytorów, odbiorców, firm transportowych oraz operatorów transportu publicznego [5, 6]. Rozwój usług z zakresu e-commerce powoduje, że znaczna część dostaw realizowana jest bezpośrednio do klientów końcowych [3]. Metoda dostarczania paczek w trybie „ostatniej mili” (ang. the last mile) obejmująca dostawę towaru do klienta końcowego przez kuriera, wykorzystywana jest w terenach wysoce zurbanizowanych, w których wykorzystanie tradycyjnych samochodów ciężarowych jest nieefektywne [7]. Słaba współpraca partnerów w łańcuchu dostaw oraz niska efektywność systemów transportowych implikują negatywne skutki dostaw towarów na terenach miejskich [8]. Niska efektywność operacji dostarczania przesyłek/towarów wykorzystujących tradycyjne środki transportu (np. ciężarówki) wynika z przestrzennego rozmieszczenia punktów odbioru, różnych okien czasowych dostaw oraz ad hoc wprowadzanych zmian zamówień np. spowodowanych nieobecnością odbiorcy. Aktualnie stosowane rozwiązania negatywnie oddziałują na otoczenie. W odpowiedzi na ten stan rzeczy podejmowane są działania, w skali lokalnej jak i globalnej, mające na celu ograniczenie negatywnego wpływu dostaw kurierskich na środowisko [8]. Warto również zauważyć, że procentowy udział usług kurierskich bezpośrednio do klienta we wszystkich metodach dostaw wzrasta za sprawą rozwoju usług e-commerce. Wymusza to szybko rosnące zapotrzebowanie na innowacyjne rodzaje dostaw w terenach zurbanizowanych.

W ostatnich latach dużą uwagę poświęca się wykorzystaniu pojazdów napędzanych paliwami alternatywnymi np. elektrycznym pojazdom towarowym (ang. Electric Freight Vehicles, EFV) [7] oraz rozwiązaniom zeroemisyjnym [9, 10]. Pozwala to na wprowadzenie innowacyjnych rozwiązań bazujących na wykorzystaniu [11]:

- technologii informacyjno-komunikacyjnych (ang. Information and Communication Technologies, ICT),

- inteligentnych systemów transportowych (ang. Intelligent Transport System, ITS),
- internetu rzeczy (ang. Internet of Things, IoT),
- metod sztucznej inteligencji (ang. Artificial Intelligence, AI),
- robotów transportowych np. bezzałogowych statków powietrznych (ang. Unmanned Aerial Vehicle, UAV).

Szczególnie popularnym staje się wykorzystanie bezzałogowych statków powietrznych (BSP). Ich stosowanie pozwala na dekarbonizację transportu, zmniejszenie zanieczyszczenia powietrza oraz zwiększenie efektywności transportu na terenach miejskich [12, 13, 14]. W porównaniu z samochodami dostawczymi, bezzałogowe statki powietrzne zużywają mniej energii w przeliczeniu na kilometr [15]. Obecnie, skala wykorzystania BSP w dystrybucji miejskiej jest stosunkowo niewielka [16, 17].

Istniejące, praktyczne rozwiązania systemów transportowych wykorzystujących BSP umożliwiają świadczenie usług dla niewielkiej skali. W związku z tym istnieje potrzeba prowadzenia badań mających na celu zwiększenie tej skali przy uwzględnieniu dynamicznie zmieniających się parametrów [18, 19, 20]. Typowe zakłócenia planów dostaw realizowanych przez BSP wiążą się ze:

- zmianą warunków realizacji zamówień (zmiana terminu dostawy, ilości zamówionego towaru, rezygnacja, itp.), które wpływają na strukturę realizowanych marszrut,
- zmianą warunków pogodowych (np. gwałtowny spadek temperatury, oblodzenie śmigieł, turbulencje), które wpływają na zużycie energii przez BSP, co z kolei przekłada się na krótszy zasięg spowodowany wyczerpaniem baterii [21, 22, 23].

Liczba występujących w praktyce zakłóceń sprawia, że planowanie misji floty BSP wymusza potrzebę szybkiej reakcji na losowo zmieniające się warunki środowiska. Inaczej mówiąc, proces planowania powinien umożliwiać adaptację realizowanych proaktywnych planów do nowych warunków w trybie on-line – tzn. uwzględniać potrzeby planowania reaktywnego. Dostępne w literaturze przedmiotu podejścia skupiają się na trzech obszarach marszrutyzacji floty BSP związanych odpowiednio z:

- kryteriami optymalizacji (np. zużycie paliwa [24], czas dostawy [25], koszt dostawy [26]),
- zastosowaniami (np. rozpoznanie i mapowanie, dostarczanie przesyłek [27]),
- planowaniem i harmonogramowaniem floty (np. planowanie wolne od zatorów komunikacyjnych [22, 28, 29], przydział floty [30]).

Celem planowania misji floty BSP jest znalezienie sekwencji punktów orientacyjnych, które łączą punkt początkowy z lokalizacją docelową dla każdego pojazdu we flocie. Trasy BSP mogą być wyznaczone poprzez planowanie proaktywne (w trybie off-line) [31] lub reaktywne w (trybie on-line) [32, 33, 34, 35]. Trasy określone w planowaniu proaktywnym gwarantują osiągnięcie zaplanowanego celu misji przy zmieniających się, w ustalonych odstępach czasu, parametrach środowiska. Zdarza się, że wyznaczone plany proaktywne nie gwarantują osiągnięcia celu misji. Sytuacja ta ma miejsce, gdy scenariusze odpowiadające przyjętym regułom reakcji (adaptacji do zmian w środowisku/sieci transportowej podczas wykonywania misji) nie gwarantują istnienia ścieżek „end-to-end” wykorzystywanych w procesie marszrutyzacji [34].

Na proces planowania misji lotów floty BSP składa się analiza wielu składowych, w tym zmieniające się warunki pogodowe (tj. prędkość i kierunek wiatru), ładowność BSP, pojemność energetyczna BSP, wielkość floty, rozmiar sieci transportowej oraz wydajność dostaw [22, 28, 36, 37, 38, 39]. Ze względu na *NP – trudny* charakter rozważanych problemów, do ich rozwiązania wykorzystywane są metody dokładne: mieszane programowanie liniowe (ang. Mixed Linear Programming, MLP) [40, 41], modelowanie deklaratywne [21, 28, 31, 42, 43], jak i przybliżone: symulacje komputerowe [44], metody sztucznej inteligencji [45].

Stosunkowo niewiele prac poświęconych planowaniu misji lotu floty BSP uwzględnia czynniki techniczne i środowiskowe wpływające na możliwe rozwiązania [21]. Wśród czynników tych warto wymienić:

- parametry techniczne BSP (wymiary, pojemność baterii, limit udźwigu),
- zmieniające się warunki pogodowe (prędkość oraz kierunek wiatru, opady, oblodzenie, turbulencje oraz gęstość i temperatura powietrza),
- dynamicznie zmieniające się terminy dostaw oraz przeszkody statyczne lub ruchome (wycofywanie lub zmiana terminu i miejsca dostaw oraz ich objętości, unikanie kolizji).

Wymienione czynniki wpływają przede wszystkim na zużycie energii, determinując tym samym zasięg planowanych misji. W literaturze rzadko można spotkać opracowania, w których rozważany jest wpływ warunków atmosferycznych lub zmienna masa ładunku pojazdu na zużycie energii [21, 46].

Potrzeba planowania odpornych na ww. zakłócenia misji (np. w kontekście dystrybucji miejskiej), łącząca koncepcje proaktywnego planowania i reaktywnej adaptacji do nowych warunków [47] implikuje konieczność stosowania efektywnych czasowo metodyk. Badania podejmujące tego typu problematykę należą do rzadkości. Nieliczne publikacje z tego zakresu noszą raczej wstępny, koncepcyjny charakter [48, 49].

Inaczej mówiąc istnieje luka badawcza w zakresie badań nad metodami pozwalającymi na planowanie misji lotów flot BSP, które gwarantują ich „niewrażliwość” na wybrane rodzaje zakłóceń. Luka ta implikuje potrzebę badań koncentrujących się na reaktywnym planowaniu dostaw realizowanych przez floty BSP, odpornych na nagłe zmiany warunków atmosferycznych i/lub nieprzewidziane zmiany harmonogramów dostaw. W przedstawionym kontekście, rozważany w pracy problem sformułowany jest następująco.

Znane są:

- sieć transportowa o znanej strukturze i zapotrzebowaniach poszczególnych klientów,
- flota BSP realizująca dostawy (w szczególności znane są parametry techniczne każdego BSP),
- warunki pogodowe (prognoza pogody), w ramach których realizowane będą dostawy,
- zbiór potencjalnych zakłóceń obejmujących: zmianę pogody, zmianę warunków zamówienia określonych klientów.

Poszukiwane są decyzje w zakresie kształtowania odpornych (na wybrane zakłócenia) planów misji lotów floty BSP, które gwarantują terminową realizację dostaw.

1.2 Cel i teza

Przedstawiony problem badawczy implikuje główny cel badań, którym jest opracowanie metody planowania misji lotów floty BSP odpornych na wybrane zakłócenia (np. zmienne warunki pogodowe). Jego osiągnięcie determinują następujące cele szczegółowe związane z opracowaniem:

1. Bazującego na paradygmacie programowania deklaratywnego referencyjnego modelu syntezy misji lotów BSP odpornych na wybrane rodzaje zakłóceń.
2. Metody planowania misji lotów BSP uwzględniającej występowanie wybranych zakłóceń.
3. Empirycznej weryfikacji działania metody

Związana z tym problemem teza badawcza, wynikająca z przeprowadzenia studiów literaturowych zakłada, że:

Teza: Wykorzystanie technik obliczeniowych bazujących na paradygmacie programowania deklaratywnego pozwala na wyznaczanie planów misji lotów BSP odpornych na zmienne warunki pogodowe w trybie on-line.

Zastosowanie paradygmatu programowania deklaratywnego umożliwia sformułowanie problemu w postaci zbioru ograniczeń, czyli warunków jakie musi spełniać rozwiązanie np. poszukiwana jest misja lotu floty BSP, która gwarantuje wykonywalność misji tj. terminowe dostarczenie wymaganych towarów do wszystkich odbiorców:

- nie doprowadzając do wyczerpania baterii każdego z dostępnych BSP,
- w zadanych warunkach pogodowych,
- pomimo występowania zakłóceń określonego rodzaju.

Ze zbioru wielu technik bazujących na modelowaniu deklaratywnym, wyróżnić należy programowanie z ograniczeniami (ang. Constraint Programming, CP), którego zaletami są mechanizmy propagacji ograniczeń (pozwalającej ograniczyć przestrzeń potencjalnych rozwiązań), jak również dystrybucji zmiennych (podstawiającej dopuszczalne wartości do zmiennych decyzyjnych).

Istnieją przypadki, w których mechanizmy CP są niewystarczające do zagwarantowania otrzymania rozwiązań w zadnym czasie (w trybie on-line). W takich sytuacjach, przeszukiwanie zbioru potencjalnych rozwiązań sprowadza się do przeglądu zupełnego skutkującego wyznaczeniem rozwiązań w czasie wykraczającym poza zakres przyjęty dla rozwiązań w trybie on-line. W związku z tym celem badań jest również wyznaczenie warunków wystarczających, spełnienie których gwarantuje wyznaczenie odpornych planów misji lotów BSP w trybie on-line.

1.3 Zakres

Przyjęte cele badawcze znalazły swoje odbicie w strukturze pracy, składającej się z 6 rozdziałów.

W rozdziale drugim przedstawiono wyniki przeprowadzonego studium literatury dotyczącej problemów marszrutyzacji pojazdów. W strukturze rozdziału można wyodrębnić wątki dotyczące charakterystyki oraz opisu:

- ogólnego problemu marszrutyzacji pojazdów oraz jego rozszerzeń, cechy których występują w podejmowanym problemie badawczym,
- metod stosowanych przy rozwiązywaniu problemów należących do klasy marszrutyzacji pojazdów – VRP (ang. Vehicle Routing Problem).

Przeprowadzone studium pozwoliło na wykazanie, że istnieje potrzeba prowadzenia badań nad zagadnieniami, które poruszane są w niniejszej rozprawie.

Rozdział trzeci zawiera sformułowanie opracowanego referencyjnego modelu wyznaczania misji lotów BSP. W szczególności wprowadzono podstawowe pojęcia rozważanego problemu tj.: stan, zakłócenie oraz odporność misji lotu. Sformułowano problem spełnienia ograniczeń zawierający relacje (ograniczenia), spełnienie których gwarantuje wyznaczenie odpornych planów misji floty BSP. Wykorzystanie technik programowania deklaratywnego (w szczególności programowania z ograniczeniami) ogranicza znacznie rozmiar problemów, których rozwiązanie można uzyskać w trybie online. W celu zwiększenia tej skali, wprowadzono nadmiarowe warunki (relaksacja ograniczeń opisujących zużycie energii), ograniczające przestrzeń potencjalnych rozwiązań i tym samym przyspieszające jej przeszukiwanie.

Opracowany model stanowi podstawę metody proaktywno-reaktywnego planowania misji floty BSP, którą opisano w rozdziale czwartym. Głównymi elementami opracowanej metody są etapy planowania misji proaktywnej (przed jej realizacją), jak również reaktywnej, w odpowiedzi na wykryte zakłócenie.

Rozdział piąty zawiera opis eksperymentów mających na celu weryfikację opracowanego modelu, jak również oceny skuteczności zaproponowanej metody proaktywno-reaktywnego planowania misji lotów BSP.

W rozdziale szóstym podsumowano wyniki przeprowadzonych badań oraz określono kierunki dalszych prac.

2 Przegląd literatury

W niniejszym rozdziale dokonano opisu wyników przeprowadzonego studium literatury poświęconej klasie problemów marszrutyzacji pojazdów. W pierwszej jego części scharakteryzowano oraz opisano rozszerzenia klasycznego problemu VRP, których właściwości stanowią składowe autorskiego problemu planowania odpornych na zakłócenia misji lotów BSP. W drugiej części zawarto charakterystykę najpopularniejszych metod rozwiązywania problemów klasy VRP.

Przeprowadzone studium pozwoliło na wykazanie, że istnieje potrzeba prowadzenia badań nad zagadnieniami, w które wpisuje się tematyka rozprawy.

2.1 Problem marszrutyzacji VRP

Problem marszrutyzacji pojazdów (ang. Vehicle Routing Problem, VRP) został sformułowany przez Dantzig i Ramser [50] jako uogólnienie problemu komiwojażera (ang. Travelling Salesman Problem, TSP) [51]. W klasycznym podejściu VRP definiowany jest następująco.

Dany jest skierowany graf $G = (\mathcal{V}, E)$, reprezentujący sieć transportową, gdzie: $\mathcal{V} = \{v_1, \dots, v_n\}$ jest zbiorem wierzchołków; $E \subseteq \{(v_i, v_j) | (v_i, v_j) \in \mathcal{V}^2, i \neq j\}$ jest zbiorem łuków. Każdemu łukowi przypisana jest wartość (waga) z dziedziny nieujemnych liczb rzeczywistych, wartość ta opisana jest funkcją $\mathcal{C}: E \rightarrow \mathbb{R}_0^+$. W tak zdefiniowanej sieci wierzchołek v_1 reprezentuje bazę, a wierzchołki $v_i \in \mathcal{V} \setminus \{v_1\}$ reprezentują punkty dostaw i związane z nimi zamówienia. Wagi łuków $(v_i, v_j) \in E$ łączących poszczególne wierzchołki reprezentują koszt transportu między nimi (czas, odległość, itp.). Transport towarów do poszczególnych klientów odbywa się za pośrednictwem floty identycznych pojazdów $U = \{u_1, \dots, u_k, \dots, u_m\}$ (gdzie u_k reprezentuje k -ty pojazd floty, a m określa liczbę pojazdów). Trasy, wzdłuż których poruszają się pojazdy reprezentowane są przez marszrutę definiowaną jako zamknięte ścieżki (cykle): $\pi_i = (v_{i_1}, v_{i_2}, \dots, v_{i_{l(i)}})$, gdzie: $l(i)$ -to długość i -tej marszruty; $i_1 = 0$; $i_2, \dots, i_{l(i)} \in \{1, \dots, n\}$; $(v_{i_l}, v_{i_{l+1}}) \in E$ dla $l = 1, \dots, (l(i) - 1)$ oraz $(v_{i_{l(i)}}, v_{i_1}) \in E$. Zakłada się również, że każdy z wierzchołków odwiedzany jest tylko raz (tzn. występuje tylko w jednej marszrucie). Każdej marszrucie π_i przypisany jest koszt $c\pi_i$ wyznaczany jako suma wag łuków składających się na tę marszrutę: $c\pi_i = \sum_{l=1}^{l(i)-1} \mathcal{C}(v_{i_l}, v_{i_{l+1}}) + \mathcal{C}(v_{i_{l(i)}}, v_{i_1})$. Koszt podróży całej floty pojazdów wynosi: $CK = \sum_{i=1}^m c\pi_i$. W tym ujęciu problem marszrutyzacji pojazdów sprowadza się do odpowiedzi na pytanie: *Jaki zbiór marszrut $\Pi = \{\pi_1, \dots, \pi_i, \dots, \pi_m\}$ gwarantuje minimalną wartość kosztu CK ?* [52].

Tak zdefiniowany problem stanowi uogólnienie dwóch dobrze znanych w literaturze problemów [53]:

- komiwojażera TSP – przyjmując, że ładowność pojazdów jest nieskończona ($Q \rightarrow \infty$), możemy otrzymać problem wielu komiwojażerów (Multiple Travelling Salesman Problem, MTSP). Instancja MTSP może zostać przekształcona w równoważną instancję TSP, dołączając do grafu $m - 1$, dodatkowych kopii wierzchołka v_0 wraz z krawędziami [54] (gdzie m – liczba tras).
- pakowania – przyjmując, że istniejące rozwiązanie dopuszczalne dla danej instancji VRP jest instancją problemu pakowania (ang. Bin Packing Problem, BPP). Wersja decyzyjna odpowiada problemowi marszrutyzacji pojazdów, w którym wartość kosztów brzegowych równa się 0 (wszystkie możliwe rozwiązania mają ten sam koszt) [53].

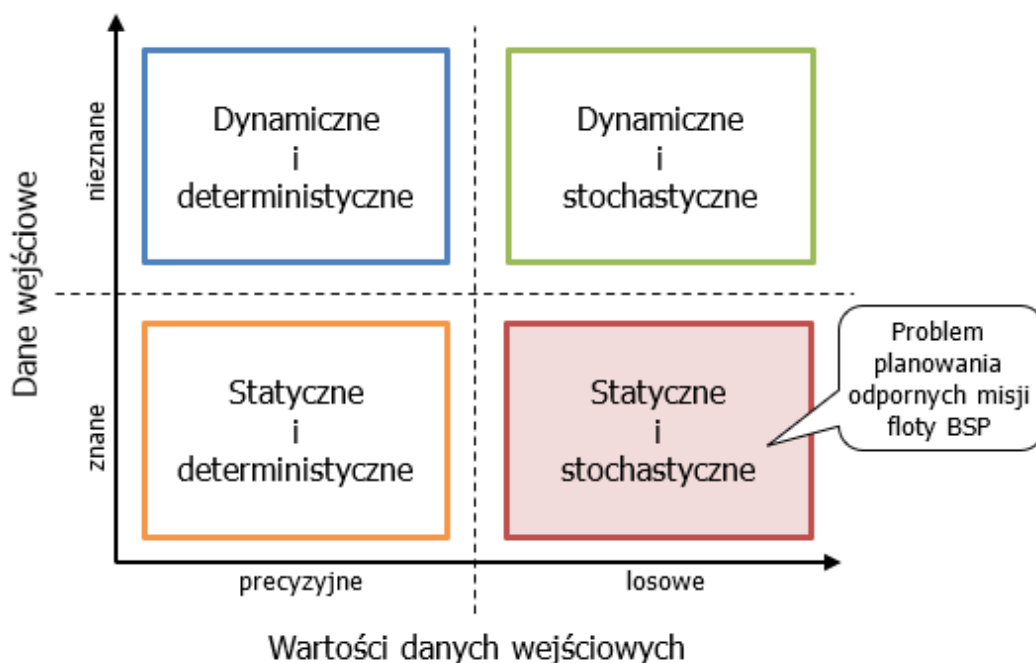
W klasycznym ujęciu, VRP definiowany jest przy założeniu, że parametry problemu są stałe (niezmienne w czasie) i z góry określone np. struktura grafu G i wagi przypisane do łuków E nie ulegają zmianie. W praktycznych zastosowaniach okazuje się, że istnieje potrzeba uwzględnienia

stochastycznych oraz dynamicznych składowych, które silnie wpływają na otrzymywane rozwiązania. Ze względu na fakt, iż parametry rozwiązywanego problemu w rzeczywistych systemach logistycznych zwykle zmieniają się losowo (np. zmiana struktury sieci w trakcie realizacji przyjętego planu), problem marszrutyzacji pojazdów wymaga ciągłej (w trybie on-line) kontroli danych i korekty wyznaczanych tras.

Biorąc pod uwagę charakter danych wejściowych tj. czy są one znane przed rozpoczęciem obliczeń oraz precyzję z jaką są określone, problemy marszrutyzacji pojazdów można podzielić na cztery kategorie [55]:

- **Stacyjne i deterministyczne** – wszystkie dane wejściowe znane są przed rozpoczęciem obliczeń, a ich wartości są precyzyjnie określone i niezmiennie w czasie,
- **Stacyjne i stochastyczne** – wszystkie dane wejściowe znane są przed rozpoczęciem obliczeń, a ich wartości reprezentowane są przez zmienne losowe (o znanych rozkładach prawdopodobieństwa),
- **Dynamiczne i deterministyczne** – część danych wejściowych jest nieznaną przed rozpoczęciem obliczeń, a ich wartości są precyzyjnie określone i niezmiennie w czasie,
- **Dynamiczne i stochastyczne** – część danych wejściowych jest nieznaną przed rozpoczęciem obliczeń, a ich wartości reprezentowane są przez zmienne losowe (o znanych rozkładach prawdopodobieństwa).

Opisany podział problemów marszrutyzacji pojazdów w formie graficznej przedstawia Rys. 2.1.



Rys. 2.1 Charakterystyka problemów marszrutyzacji pojazdów

Większość prac poświęcona zagadnieniom marszrutyzacji pojazdów skupia się na przypadkach z zakresu statyczno-deterministycznych. Uwzględnianie nieznanymi i/lub losowymi zmiennymi wiąże się z dużym wzrostem złożoności obliczeniowej analizowanego problemu. Ze względu na trudności związane z modelowaniem losowych parametrów poszukiwanie metody umożliwiających rozwiązanie problemów z rodziny statyczno-stochastycznej nie jest popularnym obszarem badawczym. Dodatkowo, modele wykorzystywane przy problemach należących do pozostałych grup odzwierciedlają rzeczywiste warunki w stopniu dobrym, przy jednocześnie, relatywnie małej złożoności obliczeniowej. W kolejnych rozdziałach przedstawione zostaną rozszerzenia VRP

o parametry takie jak: ładowność pojazdu, liczba baz, okna czasowe, rozłożenie dostaw na kilka marszrut itp. Każdy z przedstawionych problemów może występować w jednej z czterech, przytoczonych wyżej, kategorii. Problematyka pracy prezentowana w rozdziałach 3-5 dotyczyć będzie planowania proaktywnego i reaktywnego misji lotów. Ze względu na fakt, że na etapie planowania misji uwzględnia się możliwość wystąpienia zakłóceń, np. zmianę warunków pogodowych, których charakterystyka jest silnie losowa, problem ten zawiera się w kategorii problemów statyczno-stochastycznych.

2.2 Odmiany VRP

Klasyczne ujęcie VRP nie uwzględnia rzeczywistych czynników wpływających na uzyskiwane rozwiązanie. Czynnikami takimi są np. ładowność pojazdu, przedział czasu, w którym dana misja powinna się zakończyć, okna czasowe, w których możliwe jest dostarczenie towaru do wybranych punktów dostaw, itp. W przedstawionym kontekście, rozważany w rozprawie problem marszrutyzacji BSP stanowi rozszerzenie klasycznego VRP, w którym uwzględniane są następujące parametry:

- ładowność pojazdu (ang. Capacitated Vehicle Routing Problem, CVRP),
- podział misji lotu na kilka pod misji (ang. Split Delivery Vehicle Routing Problem, SDVRP),
- okna czasowe (ang. Vehicle Routing Problem with Time Windows, VRPTW),
- możliwość wystąpienia wielu baz (ang. Multi Depot Vehicle Routing Problem MDVRP),
- odporność danej misji na zadane warunki pogodowe (ang. Robust Vehicle Routing Problem).

Planowanie misji dostaw, w której uwzględnione są parametry takie jak ładowność pojazdu, możliwość podmisji, okna czasowe oraz możliwość wystąpienia w jednej sieci transportowej więcej niż jednej bazy, jest przypadkiem często rozważanym w literaturze ze względu na relatywnie niską złożoność problemu (rozszerzenie klasycznego problemu VRP o te parametry nie wpływa w istotny sposób na złożoność całego zagadnienia), co skutkuje większą możliwością znalezienia rozwiązań dopuszczalnych, przy jednoczesnym, dobrym odwzorowaniu rzeczywistych warunków przebiegu planowanych misji. Warto dodać, że przypadki analizowane w literaturze najczęściej należą do problemów typu analizy, gdzie poszukiwana jest odpowiedź na pytanie: czy istnieje misja spełniająca oczekiwane warunki? Poszukiwania rozwiązań gwarantujących terminową realizację dostaw, przy założeniu wystąpienia zmiennych parametrów takich jak np. warunki pogodowe, należą do rzadkości.

2.2.1 Problem planowania odpornych misji BSP

Tematyka pracy związana jest z planowaniem misji lotów BSP w zmiennych warunkach pogodowych. W związku z tym, problem winien uwzględniać czynniki związane z pogodą (prędkość oraz kierunek wiatru), jak również czynniki związane z ładownością pojazdu, transportem oraz oknami czasowymi. Formalnie problem poruszany w pracy oznaczany dalej jako DRVRP (ang. Disruption-Robust Vehicle Routing Problem) definiowany jest następująco:

Dany jest graf skierowany $G = (\mathcal{V}, E)$, reprezentujący sieć transportową, gdzie: $\mathcal{V} = \{v_1, \dots, v_n\}$ jest zbiorem wierzchołków; $E \subseteq \{(v_i, v_j) | (v_i, v_j) \in \mathcal{V}^2, i \neq j\}$ jest zbiorem łuków. Każdemu łukowi przypisana jest wartość (waga) z dziedziny nieujemnych liczb rzeczywistych, wartość ta opisana jest funkcją $\mathcal{C}: E \rightarrow \mathbb{R}_0^+$. W tak zdefiniowanej sieci zbiór wierzchołków $\mathcal{V}_B \subset \mathcal{V}$ reprezentuje wierzchołki – bazy, natomiast zbiór wierzchołków $\mathcal{V}_D \subset \mathcal{V}$ reprezentuje wierzchołki – punkty dostaw: $\mathcal{V}_B \cup \mathcal{V}_D = \mathcal{V}$, $\mathcal{V}_B \cap \mathcal{V}_D = \emptyset$. Wagi łuków $(v_i, v_j) \in E$ łączących poszczególne wierzchołki reprezentują koszt transportu między nimi (czas, odległość, itp.). Transport towarów (w ilości określonej przez zmienną $z_i \in \mathbb{N}$) do poszczególnych punktów dostaw $v_i \in \mathcal{V}_D$ odbywa się

za pośrednictwem floty identycznych pojazdów - BSP: $U = \{u_1, \dots, u_k, \dots, u_m\}$ (gdzie u_k reprezentuje k -ty pojazd floty, a m liczbę pojazdów), która rozlokowana jest pomiędzy wierzchołkami reprezentującymi bazy \mathcal{V}_B . Podzbiór U^i zawiera flotę U przypisaną do danej bazy \mathcal{V}_B . Przyjmuje się, że Λ oznacza sekwencję ilości towarów dostarczanych do wierzchołków zbioru \mathcal{V} : $\Lambda = (\lambda_1^k, \dots, \lambda_i^k, \dots, \lambda_n^k)$, gdzie λ_i^k określa ilość towaru dostarczanego do wierzchołka v_i przez pojazd u_k , ($\lambda_i^k = 0$ dla każdego wierzchołka $v_i \in \mathcal{V}_B$).

Dostawy realizowane są w ramach misji S determinującej plan dostaw (marszruty, harmonogram, ilości dostarczanych towarów) zawierający jeden kurs BSP: wylot z bazy – punkt/punkty dostaw – powrót do bazy. Dostarczenie wszystkich wymaganych towarów, do wszystkich punktów dostaw powinno zakończyć się przed upływem założonego horyzontu czasowego H . Dodatkowo, dostarczenie towaru do węzła v_i powinno odbyć się w zadanym przedziale czasu tzw. oknie czasowym $\mathcal{V}_{D_{TW_i}} = [\mathcal{V}_{D_{TW_i}^{down}}; \mathcal{V}_{D_{TW_i}^{up}}]$, gdzie $\mathcal{V}_{D_{TW_i}^{down}}$ reprezentuje moment rozpoczęcia okna czasowego $\mathcal{V}_{D_{TW_i}}$, zaś $\mathcal{V}_{D_{TW_i}^{up}}$ reprezentuje moment zakończenia okna czasowego $\mathcal{V}_{D_{TW_i}}$: $\mathcal{V}_{D_{TW_i}^{down}}, \mathcal{V}_{D_{TW_i}^{up}} \in \mathbb{R}_0^+$, $\mathcal{V}_{D_{TW_i}^{up}} > \mathcal{V}_{D_{TW_i}^{down}}$.

Ładowność BSP opisana jest zmienną Q_k . Przyjmuje się, że łączny ciężar dostarczonego towaru przez k -ty BSP nie może przekroczyć Q_k . Ponadto, znane są parametry techniczne opisujące właściwości wykorzystywanego BSP: prędkość pojazdu (va), pojemność baterii (CAP), szerokość (b), współczynnik oporu (C_D), powierzchnia czołowa pojazdu (A) (wielkości te wpływają na zużycie energii przez BSP).

Planowana misja S realizowana jest w określonych warunkach pogodowych definiowanych jako zbiór \mathbb{W} par (θ, vw) , na które składają się: prognozowany kierunek wiatru θ oraz prognozowana prędkość wiatru vw : $(\theta, vw) \in \mathbb{W}$.

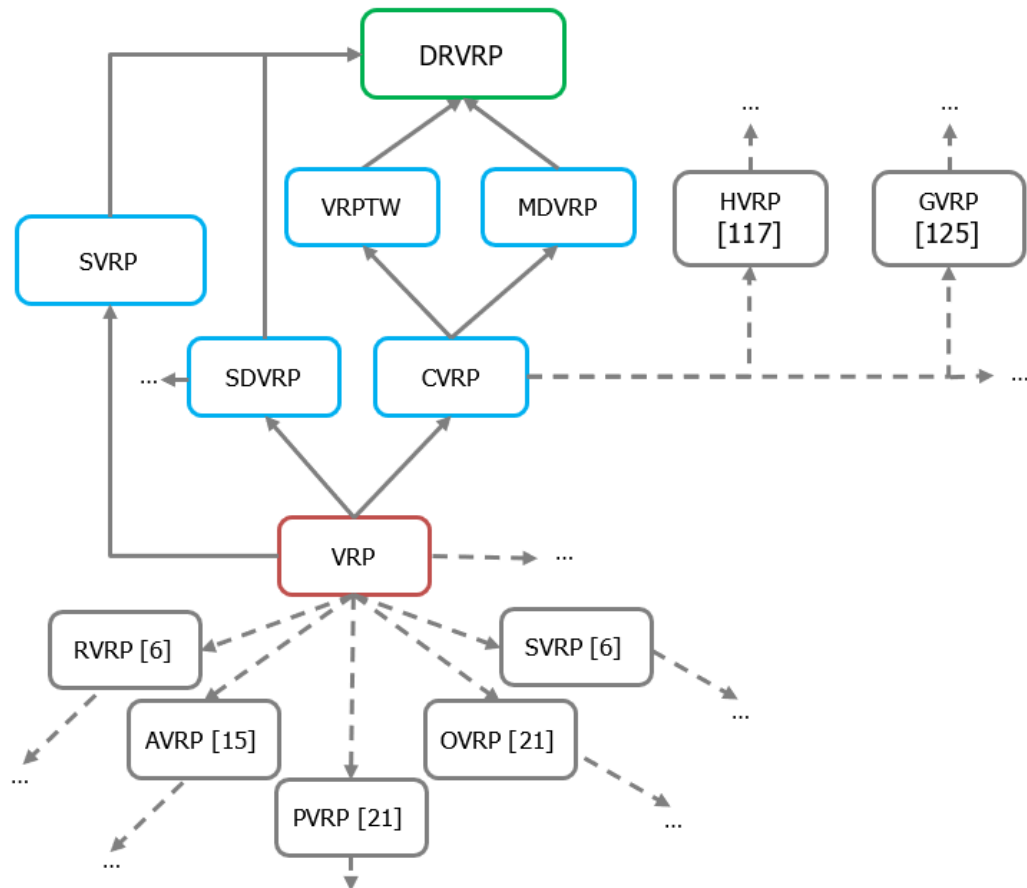
Trasy, wzdłuż których poruszają się BSP reprezentowane są przez marszruty definiowane jako zamknięte ścieżki: $\pi_i = (v_{i_1}, v_{i_2}, \dots, v_{i_{l(i)}})$, gdzie: $l(i)$ -to długość i -tej marszruty; $i_1 = 0$; $i_2, \dots, i_{l(i)} \in \{1, \dots, n\}$; $(v_{i_l}, v_{i_{l+1}}) \in E$ dla $l = 0, \dots, l(i) - 1$ oraz $(v_{i_{l(i)}}, v_{i_1}) \in E$. Wartość zmiennej y_i^k reprezentuje moment przybycia k -tego pojazdu do i -tego punktu dostaw, gdzie $y_i^k \in \mathbb{R}_0^+$. W tym kontekście sekwencja $Y = \{y_1^1, \dots, y_1^m, \dots, y_n^1, \dots, y_n^m\}$ nazywana jest harmonogramem misji floty U . Zakłada się również, że w danej marszrucie k -ty BSP może odwiedzić dany punkt dostaw tylko raz. Każdej marszrucie π_i przypisany jest koszt $c\pi_i$ wyznaczany jako suma wag łuków składających się na tę marszrutę: $c\pi_i = \sum_{l=1}^{l(i)-1} \mathcal{C}(v_{i_l}, v_{i_{l+1}}) + \mathcal{C}(v_{i_{l(i)}}, v_{i_1})$. Koszt podróży całej floty pojazdów wynosi: $CK = \sum_{i=1}^m c\pi_i$.

W tym ujęciu problem marszrutyzacji pojazdów sprowadza się do odpowiedzi na pytanie: *Jaki plan misji S (zbiór marszrut $\Pi = \{\pi_1, \dots, \pi_m\}$, harmonogram $Y = \{y_1^1, \dots, y_n^m\}$, sekwencja dostaw $\Lambda = (\lambda_1^k, \dots, \lambda_i^k, \dots, \lambda_n^k)$ gwarantuje terminowe (określone horyzontem czasowym H i oknami $\mathcal{V}_{D_{TW_i}}$) dostarczenie towarów do wszystkich klientów przy uwzględnieniu prognozowanych warunków pogodowych?*

Rozważany problem planowania odpornych na zakłócenia misji BSP jest szczególnym przypadkiem problemu VRP, który w swojej definicji zawiera elementy rozpatrywane indywidualnie w problemach:

- SVRP – problem marszrutyzacji pojazdów z uwzględnieniem zmiennych losowych.
- VRPTW – problem marszrutyzacji pojazdów z uwzględnieniem okien czasowych.
- SDVRP – problem marszrutyzacji pojazdów z uwzględnieniem podziału dostaw na kilka marszrut.
- MDVRP – problem marszrutyzacji pojazdów z uwzględnieniem wielu baz.
- CVRP – problem marszrutyzacji pojazdu z uwzględnieniem wielu baz.

Rys. 2.2 przedstawia taksonomię problemów marszrutyzacji pojazdów. Kolorem niebieskim oznaczono rozszerzenia, których cechy zostały wykorzystane przy formułowaniu problemu analizowanego w niniejszej rozprawie. Szarym kolorem oznaczono popularne, istniejące w literaturze rozszerzenia klasycznego problemu VRP.



Legenda:

VRP	problem marszrutyzacji pojazdów	OVRP	otwarty problem marszrutyzacji pojazdów
CVRP	problem marszrutyzacji pojazdów z uwzględnieniem pojemności pojazdu	DRVRP	problem marszrutyzacji pojazdów odporny na zakłócenia
MDVRP	problem marszrutyzacji pojazdów z uwzględnieniem wielu baz	HVRP	problem marszrutyzacji pojazdów z uwzględnieniem różnorodności floty
SDVRP	problem marszrutyzacji pojazdów z uwzględnieniem podziału dostaw na kilka marszrut	GVRP	Problem marszrutyzacji pojazdów typu „Green”
SVRP	problem marszrutyzacji pojazdów z uwzględnieniem wystąpienia zmiennych losowych	RVRP	bogaty problem marszrutyzacji pojazdów
VRPTW	problem marszrutyzacji pojazdów z uwzględnieniem okien czasowych	AVRP	asymetryczny problem marszrutyzacji pojazdów
PVRP	periodyczny problem marszrutyzacji pojazdów	DRVRP	problem marszrutyzacji pojazdów odporny na zakłócenia

Rys. 2.2 Taksonomia problemów marszrutyzacji pojazdów uwzględniająca rozważany problem

2.2.2 Stochastyczny problem marszrutyzacji pojazdów

Stochastyczny problem marszrutyzacji pojazdów (ang. Stochastic Vehicle Routing Problem, SVRP) jest rozszerzeniem klasycznego problemu marszrutyzacji pojazdów, w którym jeden lub więcej parametrów nie są określone precyzyjnie (zwykle są one definiowane jako zmienne losowe) na etapie procesu planowania [56]. Zmiennymi, które mogą przyjmować wartości losowe mogą być: liczba punktów dostaw, zapotrzebowanie na towar w danym węźle, czas podróży między wierzchołkami oraz szerokość przedziału czasu (okna czasowego), w którym może zostać dokonana dostawa [57]. Ze względu na możliwość występowania parametrów losowych, klasyczne metody wykorzystywane do rozwiązywania VRP nie mają w tym przypadku zastosowania. Istniejące podejścia sprowadzają się do rozważania skrajnych (pesymistycznych, optymistycznych) scenariuszy dostaw. Przykładem może być tu praca [58], w której autorzy jako pierwsi przedstawili koncepcje metody „odpornej” optymalizacji (ang. Robust Optimization, RO), dla problemu CVRP. Zaproponowane przez nich modele mogą być utożsamiane z najgorszymi przypadkami deterministycznego problemu CVRP, w których parametr zapotrzebowania na towar w węźle jest zastępowany wartością ze zbioru wartości losowych opisanych znanym rozkładem prawdopodobieństwa [59].

W rozważanym problemie DRVRP zakłada się, że parametrem losowym są warunki pogodowe. Prędkość i kierunek wiatru są więc reprezentowane przez skrajne tj. najgorsze z prognozowanych, wartości. Planowane misje muszą gwarantować terminowe dostawy w najgorszym z dopuszczalnych scenariuszy pogody.

2.2.3 Problem marszrutyzacji pojazdów z uwzględnieniem okien czasowych

Problem marszrutyzacji pojazdów z uwzględnieniem okien czasowych (ang. Vehicle Routing Problem with Time Windows, VRPTW) jest rozszerzeniem problemu CVRP, gdzie dostawa towaru w każdym punkcie musi rozpocząć i zakończyć się w trakcie trwania powiązanego z danym wierzchołkiem okna czasowego $\mathcal{V}_{D_{TW_i}}$, a pojazd musi pozostać w punkcie dostawy w trakcie świadczenia usługi. W literaturze wyróżnia się dwie odmiany problemu: problem marszrutyzacji pojazdów z uwzględnieniem „miękkich” okien czasowych (ang. Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows, VRPSTW), w których dopuszczalne jest naruszenie okien czasowych uwzględniając karę oraz problem marszrutyzacji pojazdów z uwzględnieniem „twardych” okien czasowych (ang. Vehicle Routing Problem with Hard Time Windows, VRPHTW), w których operacja musi rozpocząć się w ściśle określonym przedziale czasu [60]. W porównaniu do klasycznego VRP, odmiana z uwzględnieniem okien czasowych wprowadza do modelu zmienne w postaci przedziałów czasu, przypisanych do każdego wierzchołka $v_i \in \mathcal{V} \setminus \{v_0\}$, w których może być wykonana usługa $\mathcal{V}_{D_{TW_i}} = [\mathcal{V}_{D_{TW_i}^{down}} ; \mathcal{V}_{D_{TW_i}^{up}}]$, gdzie $\mathcal{V}_{D_{TW_i}^{down}}$ reprezentuje moment czasu rozpoczęcia okna czasowego $\mathcal{V}_{D_{TW_i}}$, zaś $\mathcal{V}_{D_{TW_i}^{up}}$ reprezentuje moment zakończenia okna czasowego $\mathcal{V}_{D_{TW_i}}$, w danym wierzchołku v_i , $\mathcal{V}_{D_{TW_i}^{down}}, \mathcal{V}_{D_{TW_i}^{up}} \in \mathbb{R}_0^+, \mathcal{V}_{D_{TW_i}^{up}} > \mathcal{V}_{D_{TW_i}^{down}}$ [61]. Ze względu na *NP – trudny* charakter problemu, wczesne próby rozwiązania skupiały się na analizie studiów przypadku [62, 63, 64]. Późniejsze próby rozwiązania wykorzystują metody z zakresu heurystyk umożliwiające rozwiązywanie problemów o realnych rozmiarach oraz opracowaniu efektywnych, optymalnych podejść [60].

Rozważany problem DRVRP należy traktować jako szczególny przypadek, w którym dostawy należy zagwarantować w ściśle określonym przedziale $\mathcal{V}_{D_{TW_i}}$ – „twardych” okien czasowych. Przyjęcie takiego stanu rzeczy jest konsekwencją założeń dotyczących okupowania danego punktu dostawy wyłącznie przez jeden BSP. Przyjęcie „miękkich” okien czasowych może skutkować sytuacją, gdy

w danym momencie czasu t w danym wierzchołku v_i będą znajdować się 2 lub więcej BSP co może skutkować kolizją lub niemożliwością obsługi dostawy w danym punkcie.

2.2.4 Problem marszrutyzacji pojazdów z uwzględnieniem podziału dostaw na kilka marszrut

Problem marszrutyzacji pojazdów z uwzględnieniem podziału dostaw na kilka marszrut (ang. Split Delivery Vehicle Routing Problem, SDVRP) jest rozszerzeniem klasycznego problemu VRP, w którym, w odróżnieniu od klasycznego podejścia, każdy punkt dostaw można odwiedzić więcej niż jeden raz [65]. Problem marszrutyzacji pojazdów z uwzględnieniem podziału dostaw na kilka marszrut został zaprezentowany w pracach [66, 67], w których wykazano, że podział dostaw pozwala generować oszczędności. W pracy [68] przedstawiono model opisujący problem SDVRP, zaś w opracowaniu [69] zaproponowane zostały dolne granice rozwiązania dla przypadku, w którym zapotrzebowanie na towar w każdym wierzchołku $v_i \in \mathcal{V} \setminus \{v_0\}$ nie przekracza ładowności pojazdu $z_i \leq Q$. Próby wykorzystania algorytmów dokładnych do rozwiązania tego problemu zostały przedstawione w pracach [70, 71]. Zaproponowane podejścia umożliwiają rozwiązywanie bardzo małych instancji problemu. Lepsze wyniki uzyskano w pracy [72], w której opisany algorytm umożliwia rozwiązanie problemu dla sieci, w której liczba punktów dostaw nie przekracza 100. W pracy [73] opisano heurystykę, która okazuje się bardzo skuteczna w przypadku gdy w punktach dostaw zapotrzebowanie przekracza ładowności BSP.

W rozważanym problemie DRVRP zakłada się, że towary mogą być dostarczane przez kilka BSP. Dodatkowo, w celu uniknięcia kolizji, przyjęto założenie, że w danym momencie czasu t , w danym wierzchołku v_i może znajdować się tylko jeden BSP.

2.2.5 Problem marszrutyzacji pojazdów z uwzględnieniem wielu baz

Problem marszrutyzacji pojazdów z uwzględnieniem wielu baz (ang. Multi Depot Vehicle Routing Problem, MDVRP) jest rozszerzeniem problemu CVRP, w którym BSP startują i wracają do jednej z wielu baz. Pierwszy raz problem ten został sformułowany w pracy Kulkarniego i Bhave'a w 1985r. [74]. W porównaniu z klasycznym VRP, zbiór wierzchołków \mathcal{V} jest rozszerzony [75] o w dodatkowych wierzchołków prezentujących bazy: $\mathcal{V} = \{v_1, \dots, v_n, \dots, v_{n+w}\}$. W zbiorze \mathcal{V} można wyróżnić dwa podzbiory: $\mathcal{V}_D = \{v_1, \dots, v_n\}$ oraz $\mathcal{V}_B = \{v_{n+1}, \dots, v_{n+w}\}$. W każdym wierzchołku $v_i \in \mathcal{V}_B$ znajduje się flota K pojazdów o określonej ładowności Q oraz każdy wierzchołek $v_i \in \mathcal{V}_D$ posiada nieujemne zapotrzebowanie na towar $z_i \leq Q$ [76]. W problemach marszrutyzacji pojazdów z uwzględnieniem wielu baz poszukiwane są rozwiązania, w których analizowane są nie tylko trasy poszczególnych pojazdów, ale również wyznaczenie bazy, z której towary będą transportowane do wierzchołka v_i . Ze względu na złożony charakter zagadnienia w literaturze istnieje niewiele algorytmów umożliwiających poszukiwanie rozwiązań dokładnych. Zgodnie z przeglądem literatury przedstawionym w [77] 25% opracowań dotyczy rozwiązywania problemu z wykorzystaniem algorytmów dokładnych, podczas, gdy w pozostałych 75% pracach zastosowano heurystyczne i meta-heurystyczne techniki.

W rozważanym problemie DRVRP przyjęto możliwość występowania więcej niż jednej bazy. Wynika to z potrzeby odtworzenia rzeczywistych warunków, w których dana firma transportowa dysponuje więcej niż jednym magazynem (bazą). Konsekwencją przyjętego założenia są ograniczenia opisujące cykliczność danej misji (BSP zaczyna i kończy misję w danej bazie) oraz, w przypadku, gdy w bazie znajduje się więcej niż jeden BSP określone są odstępy czasu między poszczególnymi startami oraz powrotami.

2.2.6 Problem marszrutyzacji pojazdów z uwzględnieniem ładowności pojazdu

Problem marszrutyzacji pojazdów z uwzględnieniem ładowności pojazdu (ang. Capacitated Vehicle Routing Problem, CVRP) został po raz pierwszy zaproponowany przez Dantzig i Ramsera w 1959r. [50] i od tego czasu jest przedmiotem szczególnej uwagi społeczności zajmującej się optymalizacją transportu. W problemach tej klasy poszukiwane są marszruty $\Pi = \{\pi_1, \dots, \pi_i, \dots, \pi_m\}$ dla m niezależnych pojazdów, o tej samej ładowności Q . Problem CVRP należy do klasy problemów *NP – trudnych*. Większość metod opisanych w literaturze, bazuje na wykorzystaniu algorytmów heurystycznych [75], jednak ciągły rozwój systemów programowania całkowitoliczbowego umożliwił rozwiązywanie większej instancji problemów [78]. W pracach [79, 80, 81] autorzy dokonali przeglądu metod dokładnych umożliwiających rozwiązywanie problemów klasy CVRP oraz przedstawili i porównali różne instancje modeli opisujących rozważany problem. Przedstawione podejście umożliwia wyznaczanie tras dla instancji o skali od 12 do 199 klientów, dla floty złożonej z maksymalnie 14 pojazdów.

Rozważany problem DRVRP stanowi ogólny przypadek, w którym zakłada się że ciężar BSP maleje w trakcie realizacji misji (BSP pozostawia część towaru w punktach, które już odwiedził).

2.2.7 Podsumowanie

Klasa VRP obejmuje obecnie ponad 40 wariantów tego problemu. W Tab. 2.1 przedstawiono liczbę publikacji, które dotyczą każdego z wybranych wariantów VRP. Jak widać, problemy marszrutyzacji pojazdów wciąż cieszą się dużą popularnością. Liczba problemów spotykanych w praktyce przekracza jednak wciąż liczbę opracowanych modeli. Istnieje więc potrzeba ich rozszerzania i/lub opracowywania nowych (dokładniejszych) modeli matematycznych.

Ze względu na stosunkowo nieskomplikowane założenia CVRP są najczęściej badaną klasą. Równie popularne są badania w zakresie VRPTW. Problemy te reprezentują wiele rzeczywistych przypadków. Warto również zauważyć, że ze względu na potrzebę minimalizacji CO_2 (i tym samym zużycia energii) w ostatnich latach zwiększyły się również badania w zakresie problemów klasy GVRP.

Pomimo intensywnego zainteresowania problemami klasy VRP wciąż brakuje rozwiązań dla bardziej złożonych problemów. Przykładem takiej sytuacji jest potrzeba planowania dostaw w warunkach zmiennej pogody i możliwości wystąpienia zakłóceń w zakresie oczekiwań klientów, terminów dostaw itp. Rozważany w dalszych rozdziałach pracy problem DRVRP dotyczy wariantu problemu VRP uwzględniającego: podział dostaw na kilka marszrut, okna czasowe, pojemność pojazdu oraz odporność misji lotów na warunki pogodowe.

Tab. 2.1 Warianty VRP na przestrzeni lat (opracowanie własne na podstawie literatury [82])

WARIANT VRP	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	SUMA
CVRP	18	11	12	15	19	34	24	24	18	31	12	218
VRPTW	7	5	7	7	10	16	12	12	13	22	11	122
HVRP	3	2	1	3	7	4	6	2	4	11	2	45
MDVRP	1	1	2	3	4	5	3	1	3	3	3	29
GVRP	x	x	x	1	3	2	7	6	1	8	2	30
OVRP	4	1	x	1	1	1	1	x	1	1	1	12
SDVRP	x	1	x	x	2	1	2	1	x	3	x	10
PVRP	x	2	x	x	x	x	x	x	x	2	1	5

2.3 Metody

W niniejszym rozdziale zaprezentowane zostały metody wykorzystywane do rozwiązywania problemów marszrutyzacji pojazdów.

2.3.1 Metody dokładne

Zastosowanie metod dokładnych, w celu rozwiązywania problemów optymalizacyjnych takich jak np. VRP, umożliwia wyznaczenie rozwiązań optymalnych według zadanego kryterium (funkcji celu). Do metod dokładnych należą m.in.: metoda podziału i ograniczeń, metoda podziału i odcięć oraz metoda podziału, odcięć i kosztów. Złożoność obliczeniowa wspomnianych metod opisana jest funkcją wykładniczą, przez co skala problemów rozwiązywanych w trybie on-line jest niewielka. Poniżej opisano wspomniane metody dokładne.

Metoda podziału i ograniczeń

Metoda podziału i ograniczeń (ang. Branch and Bound, B&B) jest zalecanym podejściem do budowy algorytmów dokładnych rozwiązujących złożone problemy kombinatoryczne. Wprowadzenie do tej metody zostało przedstawione w pracy [83]. Główną ideą jest podział przestrzeni rozwiązań na podzbiory (gałęzie) zawierające rozwiązania, których wartość funkcji celu nie przekracza zadanej wartości. Aby odrzucić niektóre z tych podzbiorów i zredukować przestrzeń rozwiązań, obliczane są dolne granice funkcji celu (które powinny być minimalizowane) na podzbiorach. Jeżeli dolna granica podzbioru jest większa niż znana już obiektywna wartość punktu wykonalności (górną granicą), wówczas ten podzbiór jest usuwany. Ogólnie rzecz biorąc, im ściślej są granice, tym więcej podzbiorów można odrzucić [84].

Metoda podziału i odcięć

Metoda podziału i odcięć (ang. Branch and Cut, B&C) jest algorytmem dokładnym wykorzystywanym do rozwiązywania złożonych problemów kombinatorycznych. Jest wynikiem połączenia dwóch algorytmów: algorytmu cięcia płaszczyzny (ang. Cutting plane method) oraz B&B. Metoda bazuje na rozwiązywaniu zadania programowania liniowego (ang. Linear Programming, LP) metodą simplex. W przypadku uzyskania optymalnego rozwiązania, które ma wartość niecałkowitą wykorzystywany jest algorytm cięcia płaszczyzny wprowadzający dodatkowe ograniczenia liniowe, które są spełnione przez wszystkie dopuszczalne rozwiązania całkowite [55].

Metoda podziału, odcięć i kosztu

Metoda podziału, odcięć i kosztu (ang. Branch, Cut and Price, BC&P) zaproponowana została w pracy [80] i jest stosunkowo nową metodą rozwiązywania problemów marszrutyzacji pojazdów. W pracy [81] została oceniona jako najlepsza, dostępna metoda dokładna do rozwiązywania problemów VRP. BCP powstała poprzez połączenie algorytmów B&C oraz q-routes (ang. Q-routes) – stąd metoda podziału, odcięć i kosztu. Idea łączenia kolumn i generowania odcięć w celu poprawy dolnych granic była rzadko stosowana, ponieważ zmienne dualne, odpowiadające oddzielnym cięciom, mogą powodować niepożądany efekt zmiany struktury pod-problemu kosztu. Jeśli jednak cięcia są wyrażone w postaci zmiennych z odpowiedniego oryginalnego wyrażenia, można je włączyć do procesu generowania kolumny bez zakłócania wyceny.

2.3.2 Metody aproksymacyjne

Niewielka skala problemów, dla których możliwe jest wyznaczenie rozwiązania optymalnego w trybie on-line przyczyniła się do rozwoju metod aproksymujących (przybliżonych). Metody te charakteryzują się bardzo niską (w stosunku do metod dokładnych) złożonością obliczeniową. Zmniejszenie czasu wyznaczenia rozwiązania obarczone jest jednak kosztem utraty gwarancji uzyskania rozwiązań optymalnych. Rozdział podzielony został na dwie części. W pierwszej części opisano metody heurystyczne, zaś druga część zawiera charakterystykę metod metaheurystycznych.

2.3.2.1 Metody heurystyczne

Zastosowanie heurystycznych metod przy rozwiązywaniu problemów z klasy VRP umożliwia uzyskanie (przy zadanym poziomie akceptowalności) dopuszczalnego rozwiązania (gwarantującego terminowe dostawy), w trybie on-line. W dalszej części rozdziału scharakteryzowano oraz opisano popularne metody, które ujęto w dwie grupy metod: konstrukcyjne oraz dwu fazowe.

Metody konstruktywne

Główną zasadą metod konstruktywnych (ang. Constructive methods) jest budowanie wykonywalnego rozwiązania, przy jednoczesnej analizie kosztu danego rozwiązania. Na przestrzeni lat powstało wiele heurystyk implementowanych przy próbach rozwiązywania problemów marszrutyzacji pojazdów, które można pogrupować następująco: heurystyka wstawiania (ang. Insertion clustering), heurystyka oszczędności (ang. Savings heuristic) oraz heurystyka klastrowania (ang. Clustering heuristic) [55]. Przykładem metody konstrukcyjnej jest:

- **Algorytm Clark i Wright**

Metoda należąca do grupy heurystyk oszczędnościowych została zaproponowana w roku 1964 do rozwiązywania problemów CVRP [85]. Oszczędność algorytmu uzyskiwana jest poprzez połączenie dwóch tras w jedną. Wyznaczanie trasy rozpoczyna się dla pojazdów posiadających wspólną bazę i jeden inny wierzchołek. Wszystkie wierzchołki odwiedzane są oddzielną trasą z bazy. Algorytm występuje zarówno w wersji równoległej, jak i sekwencyjnej.

Metodę Clark i Wright można przedstawić w następujących krokach:

1. **(Wylizanie oszczędności).** Wyznacz oszczędność $s_{ij} = c_{i0} + c_{j0} - c_{ij}$ dla $i, j = [1, \dots, n], i \neq j$, gdzie 0 oznacza bazę, a i, j oznaczają parę wierzchołków. Stwórz $n - 1$ marszrut $[0, i, 0]$ $[i = 1, \dots, n]$. Posortuj oszczędności w sposób malejący.

Wersja równoległa

2. **(Najlepsze możliwe połączenie).** Porównaj dwie marszruty zawierające łuk $[i, 0]$ oraz $[0, j]$. Jeżeli $s_{ij} > 0$, wstępnie połącz marszruty tworząc łuk $[i, j]$ oraz usuwając łuki $[i, 0]$ oraz $[0, j]$. Jeżeli wyznaczona trasa jest wykonywalna, zaimplementuj. Powtarzaj ten krok do momentu, aż dalsza poprawa (oszczędność) nie będzie możliwa [86].

Wersja sekwencyjna

3. Rozważ kolejno każdą trasę $[0, i, \dots, j, 0]$. Określ pierwszą oszczędność s_{ki} lub s_{jl} , która może być użyta do scalenia bieżącej trasy z inną, kończącą się na łuku $[k, 0]$ lub rozpoczynającą się w $[0, l]$. Połącz trasy i powtórz tę operację dla bieżącej trasy. Jeśli istnieje możliwe połączenie, rozważ następną marszrutę i ponownie zastosuj te same operacje. Zatrzymaj się, gdy nie można połączyć tras [87].

Metody dwufazowe

Metody, w których problem dekomponowany jest na dwa elementy: zbiory wykonywalnych tras oraz rzeczywistą konstrukcję trasy. Przykładem takiego podejścia mogą być algorytmy klastrowania, potem sekwencjonowania (ang. Clustering-first, route-second algorithm), w których, jak nazwa wskazuje, w pierwszej kolejności wyznaczane są klastry klientów, a następnie wyznaczane są trasy poprzez odpowiednie sekwencjonowanie klientów w obszarze danego klastra [55]. Przykładami metod dwu fazowych są:

- **Algorytm omiatania**

Pierwsze wzmianki o algorytmie omiatania (ang. Sweep Algorithm) można znaleźć w pracach Wren [88, 89], lecz powszechnie przypisywany jest on parze naukowców Gillet i Miller, którzy spopularyzowali to podejście. Opisywana metoda dotyczy planarnych instancji problemów marszrutyzacji pojazdów, w których możliwe klastry tworzone są początkowo poprzez rotowanie promienia zaczepionego w bazie, a trasy pojazdów wyznaczane są jako rozwiązanie problemu TSP dla każdego klastra. Niektóre wersje algorytmu omiatania zawierają w sobie fazę post optymalizacji, w której wierzchołki wymieniane są między sąsiednimi klastrami, a trasy ponownie są optymalizowane. Podstawowa implementacja algorytmu przeszukiwania wygląda następująco. Przyjmijmy, że pozycja wierzchołka i przedstawiona jest we współrzędnych polarnych $[\theta_i, \rho_i]$, gdzie θ_i oznacza kąt, natomiast ρ_i długość promienia. Przypiszmy wartość kąta $\theta_i^* = 0$ do dowolnego wierzchołka i i obliczmy pozostałe kąty wyśrodkowane względem 0 od promienia początkowego $[0, i^*]$. Uporządkuj wierzchołki w porządku rosnącym względem θ_i .

1. (**Inicjalizacja trasy**) Wybierz nieużywany pojazd k .
2. (**Konstrukcja trasy**) Zaczynając od nietrasowanego wierzchołka o najmniejszym kącie θ , przypisz wierzchołki do pojazdu k , o ile nie przekroczona została jego pojemność lub maksymalna długość trasy. Jeśli na mapie zostają nieobsłużone wierzchołki, wróć do punktu 1.
3. (**Optymalizacja trasy**) Zoptymalizuj trasę każdego pojazdu osobno, rozwiązując odpowiednią instancję problemu TSP (wykorzystując metody dokładne, lub przybliżone).

- **Algorytm płatkowy**

Naturalnym rozszerzeniem algorytmu omiatania jest generowanie kilku ścieżek, zwanych *płatkami* oraz dokonanie ostatecznego wyboru rozwiązując problem podziału zbioru, w którym poszukiwany jest najmniejszy koszt trasy wyrażony jako:

$$\min \sum d_k x_k \quad (1)$$

Przy założeniu, że:

$$\sum_{k \in S} a_{ij} x_k = 1 \quad i = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$x_k = \begin{cases} 1 & k \in S \\ 0 & \end{cases} \quad (3)$$

gdzie S jest zbiorem tras, $x_k = 1$ wtedy i tylko wtedy, gdy trasa k -tego pojazdu należy do zbioru rozwiązań, a_{ij} jest parametrem logicznym równym 1, gdy wierzchołek i należy do trasy k -tego pojazdu, d_k jest kosztem trasy k -tego pojazdu.

W przypadku, gdy trasy odpowiadają ciągłym sektorom wierzchołków, problem ma właściwość kołową kolumny i można rozwiązać go w czasie wielomianowym [90]. Algorytm płatków (ang. Petal algorithm), w postaci przedstawionej powyżej, zaprezentowany został po raz pierwszy w pracy [91], lecz okazał się niepraktyczny w przypadku, gdy zbiór S jest duży. W przypadku problemów VRP, dla niedużego zbioru wierzchołków ($10 \leq n \leq 25$) można wykorzystać generowanie kolumnowe [92]. Heurystyczne podstawy tworzenia możliwych, poprawnych podzbiorów S' tras pojazdów, zwanych 1-płatkowymi zaprezentowano w pracach [93, 90]. Dalsze badania nad algorytmem zaowocowały przedstawieniem metody umożliwiającej wyznaczanie podzbiorów S' zwanych 2-płatkowymi, składającymi się z dwóch osadzonych lub przecinających się tras [94].

- **Algorytm Fisher i Jaikumar**

Algorytm zaproponowany przez Fisher i Jaikumar [95] jest prawdopodobnie najlepszym algorytmem typu klastrowanie/sekwencjonowanie w którym zamiast wykorzystania metod geometrycznych, w celu wyznaczania klastrów, rozwiązywany jest uogólniony problem przydziału (ang. Generalized Assignment Problem, GAP). Algorytm Fisher i Jaikumara można opisać w następujący sposób:

1. **(Wybór punktów startowych)** Wybierz punkty startowe $j_k \in V$ do inicjalizacji każdego klastra g .
2. **(Przydział klientów do punktów startowych)** Oblicz koszt d_{ij} przydzielenia każdego klienta i do każdego klastra g jako $d_{ij} = \{c_{0i} + c_{ij_k} + c_{j_k0}, c_{0j_k} + c_{j_ki} + c_{i0}\} - \{c_{0j_k} + c_{j_k0}\}$.
3. **(GAP)** Rozwiąż uogólniony problem przydziału (GAP) z kosztami d_{ij} , priorytetem klientów q_i oraz pojemnością pojazdu Q .
4. **(TSP)** Rozwiąż problem komiwojażera (TSP) dla każdego klastra odpowiadającemu rozwiązaniu z poprzedniego kroku [95].

W heurystyce Fisher i Jaikumar liczba tras pojazdów m jest ustalona a priori. Autorzy proponują geometryczną metodę opartą na podziale płaszczyzny na m stożków według priorytetów punktów dostaw. Punkty startowe są wyznaczone jako atrapy punktów, które rozmieszczone są wzdłuż promieni przecinających stożki. Po ich wyznaczeniu, w każdym klastrze rozwiązywany jest problem TSP przy użyciu podejścia opartego na relaksacji ograniczeń [96]. W pracy [95] autorzy nie podają jednak sposobu jak spełnić ograniczenia odległości. Badania prowadzone nad metodą opisaną przez Fisher i Jaikumar zaowocowały pracą [97], zawierającą opis dwufazowego algorytmu heurystycznego, w którym punkty startowe wyznaczane są jako rozwiązanie skondensowanego problemu lokalizacji (ang. Capacitated Location Problem, CLP), a pozostałe wierzchołki są stopniowo włączane do przydzielonej trasy w drugim etapie. Autorzy proponują wyznaczenie m punktów startowych, zwanych koncentratorami, wśród n punktów dostaw, aby zminimalizować całkowitą odległość wierzchołków od najbliższego punktu startowego, przy spełnieniu założenia, że całkowite zapotrzebowanie przypisane do dowolnego koncentratora nie przekracza pojemności pojazdu Q . Trasy pojazdów konstruowane są poprzez wstawianie na każdym kroku punktu dostaw, przypisanego do danego punktu startowego, o najniższym koszcie wstawienia. Autorzy wykazują, że zaproponowany algorytm jest asymptotycznie optymalny (tj. wartość rozwiązania dąży do optimum, a n dąży do nieskończoności). Testy

empiryczne opisywanego podejścia wykazały jednak, że wydajność algorytmu nie jest konkurencyjna w stosunku do najlepszych rozwiązań [87].

2.3.2.2 Metody metaheurystyczne

Metody metaheurystyczne są uogólnieniem metod heurystycznych. Metaheurystyki umożliwiają konstrukcje heurystyk rozwiązujących dowolny problem danej klasy (zbioru problemów definiowanych przez wspólną grupę pojęć). Wśród opracowanych metod, na szczególną uwagę zasługują algorytmy:

Mrówkowy algorytm optymalizacyjny

Mrówkowy algorytm optymalizacyjny (ang. Ant Colony Optimization, ACO) jest metaheurystyką, w której wykorzystuje się sposób zachowania kolonii mrówek do rozwiązywania problemów optymalizacyjnych. Ilekroć mrówka porusza się, uwalnia feromon, który w kontakcie z innymi mrówkami podążającymi za feromonem podejmują decyzję, czy podążać daną ścieżką. W przypadku, gdy kolejna mrówka wybierze ścieżkę, którą wybrała poprzedniczka, feromony sumują się, a tym samym wzrasta prawdopodobieństwo, że kolejna mrówka wybierze tę samą ścieżkę. Feromon jest głównym źródłem komunikacji między mrówkami, dlatego też, im więcej mrówek porusza się daną ścieżką, tym atrakcyjniejsza staje się ona dla kolejnych mrówek. Ponadto, mrówka, która losowo wybiera najkrótszą trasę, dwukrotnie zaznacza swoją drogę, zanim inne mrówki wrócą. Wpływa to bezpośrednio na prawdopodobieństwo wyboru następnej mrówki opuszczającej gniazdo. Z biegiem czasu, większa ilość feromonu gromadzi się na krótszych ścieżkach. Odparowanie feromonu z czasem utrudnia wykrycie mniej pożądaných dróg i dodatkowo zmniejsza ich wykorzystanie.

W roku 2004 autorzy pracy [98] przedstawili matematyczny model opisujący zachowanie mrówek w problemach klasy VRP. Wybór następnego punktu j przez mrówkę przedstawiony jest jako poniższa probabilistyczna formuła:

$$j = \arg \max\{(\tau_{iu})(\eta_{iu})^\beta\}, \text{ dla } u \notin M_k, \text{ jeśli } q < q_k \quad (4)$$

gdzie τ_{iu} oznacza liczbę feromonów na drodze między aktualnym węzłem i a możliwymi węzłami u . Wartość η_{iu} definiowana jest jako odwrotność odległości między dwoma węzłami, a parametr β oznacza wagę dystansu. Lokalizacje, które zostały odwiedzone przez mrówkę przechowywane są w pamięci roboczej mrówek M_k i nie są brane pod uwagę przy selekcji kolejnych punktów. Wartość q jest zmienną losową z przedziału $[0,1]$, a wartość q_k jest parametrem. Po podjęciu decyzji mrówka wybiera łuk o najwyższej wartości spośród j , chyba, że $q > q_0$.

W tym przypadku mrówka wybiera zmienną losową jako kolejnego klienta na podstawie rozkładu prawdopodobieństwa p_{ij} , co faworyzuje krótkie ścieżki z wysokim poziomem feromonów:

$$p_{ij} = \frac{(\tau_{ij})(\eta_{ij})^\beta}{\sum_{u \in M_k} (\tau_{ij})(\eta_{ij})^\beta}, \text{ jeśli } j \notin M_k \text{ w przeciwnym razie } 0. \quad (5)$$

Każda mrówka musi podjąć decyzję czy podążać aktualnie najlepszą i rozpoznaną ścieżką, czy też wybrać losową ścieżkę obraną w oparciu o rozkład prawdopodobieństwa. Proces selekcji trwa do momentu odwiedzin każdego klienta i zakończenia trasy.

Lokalna i globalna aktualizacja tras ma na celu poprawę przyszłych rozwiązań.

1. Lokalna aktualizacja wartości feromonów tras odbywa się za pomocą następującego równania:

$$\tau_{ij} = (1 - \alpha)\tau_{ij} + \alpha\tau_0 \quad (6)$$

gdzie parametr α odpowiada za szybkość odparowywania feromonu, a τ_0 jest wartością początkową feromonu.

2. Globalna aktualizacja wartości feromonów tras odbywa się za pomocą następującego równania:

$$\tau_{ij} = (1 - \alpha)\tau_{ij} - \alpha(L)^{-1} \quad (7)$$

gdzie L jest całkowitą odległością wyznaczoną jako funkcja celu dla całej trasy sztucznej mrówki.

Algorytm genetyczny

Algorytm genetyczny (ang. Genetic algorithm, GA) jest techniką wykorzystywaną do rozwiązywania problemów optymalizacyjnych bazującą na chromosomie. Poszukiwanie rozwiązania rozpoczyna się od wygenerowania wielu możliwych rozwiązań, zwanych chromosomami. Zbiór chromosomów nazywa się populacją. Prekursorami algorytmu genetycznego są Holland i Goldberg, którzy jako pierwsi przedstawili opisywany algorytm w pracy [99]. Pierwszym krokiem jest selekcja osobników na podstawie funkcji oceny, następnie pary chromosomów są rozkładane w celu utworzenia nowych osobników. Do stworzenia jednego nowego osobnika (rozwiązania) wybiera się najczęściej dwoje rodziców i łączy ich najbardziej pożądane cechy w celu stworzenia rozwiązania dla potomstwa, czyli nowego osobnika. Aby zwiększyć szansę na uzyskanie potomstwa o wysokiej wartości, na tym etapie generuje się więcej osobników niż w populacji rodzicielskiej. Po wygenerowaniu nowej populacji osobników rozpoczyna się kolejny etap, czyli mutacja u każdego osobnika. Dzięki temu rozwiązanie zostaje zmienione, zmutowane, i tym samym wymyka się lokalnym minimom. Wyniki końcowej zmutowanej populacji analizowane są ponownie na etapie selekcji nowej populacji, przy jednoczesnym zapisaniu aktualnie najlepszego rozwiązania. Każde potomstwo oceniane jest według jednego lub więcej kryteriów, a najlepsze, lub najbardziej obiecujące osobniki promowane są do nowej populacji rodzicielskiej.

Algorytm genetyczny można przedstawić w postaci następujących kroków:

1. Wygeneruj początkową populację osobników.
2. Oceń sprawność poprzez wykorzystanie funkcji wszystkich osobników.
3. Wybierz odpowiednie osobniki do reprodukcji.
4. Rekombinuj między osobnikami.
5. Zmutuj osobniki.
6. Oceń osobniki za pomocą funkcji oceny zmodyfikowanych osobników.
7. Wygeneruj nową populację.
8. Jeśli warunki są spełnione, zatrzymaj się, w przeciwnym razie przejdź do kroku 3.

Symulowane wyżarzanie

Symulowane wyżarzanie (ang. Simulated Annealing, SA) jest metaheurystyką opartą na iteracyjnym przeszukiwaniu lokalnym (Iterated Local Search, ILS), w której problem unikania lokalnych optimum rozwiązywany jest poprzez akceptację probabilistycznych przejść do gorszych rozwiązań. Wyżarzanie reprezentuje proces fizyczny, w którym temperatura ciała stałego jest

zwiększana aż do całkowitego stopienia, a następnie powoli ochładzane w celu uzyskania pożądaných właściwości (twardość, elastyczność itp.). Metoda została opisana niezależnie w dwóch pracach [100, 101]. Zgodnie z tym rozwiązanie jest analogiczne do stanu ciała stałego, a funkcja kosztu do jego energii. W każdej iteracji istniejące rozwiązanie jest ulepszone. Rozwiązanie jest zawsze modyfikowane na lepsze, ale również modyfikacja może być zaakceptowana, nawet jeśli koszt rozwiązania wzrośnie. Definiuje się kryterium prawdopodobieństwa, w którym jeśli parametr „temperatura” jest wysoka, a wzrost kosztów niewielki, wtedy modyfikacja jest akceptowana. Gdy temperatura jest wystarczająco niska, można zaakceptować tylko modyfikacje poprawiające, a metoda zatrzymuje się na lokalnym minimum.

Algorytm można przedstawić w następujących krokach:

1. Wybierz temperaturę początkową i początkowe wartości parametrów.
2. Losowo wybierz nowy punkt w sąsiedztwie oryginału.
3. Porównaj dwa punkty za pomocą funkcji oceny.
4. Powtarzaj kroki 2 i 3, aż system osiągnie stan równowagi.
5. Zmniejsz temperaturę i powtórz powyższe kroki, zatrzymaj się, gdy system osiągnie stan zamrożony.

Algorytm przeszukiwania z zabronieniami

Algorytm przeszukiwania z zabronieniami (ang. Tabu Search, TS) jest metodą przeszukiwania pamięci prowadzącą do poszukiwania rozwiązań poza lokalnym optimum. W pracy [102] przedstawiono algorytm przeszukiwania z ograniczeniami jako metodę opierającą się na wprowadzaniu elastycznych struktur pamięci w połączeniu ze strategicznymi ograniczeniami i kryteriami akceptowalności jako sposobów wykorzystania przestrzeni wyszukiwania. Algorytm rozpoczyna się od znalezienia wstępnego rozwiązania problemu. Następnie poszukiwane jest najlepsze rozwiązanie ulokowane w sąsiedztwie rozwiązania bieżącego. W przypadku znalezienia lepszego rozwiązania, bieżące rozwiązanie zastępowane jest znalezionym (lepszym) i proces się powtarza. Po spełnieniu określonych warunków, takich jak warunki czasu wykonania lub cele jakości rozwiązania, algorytm zatrzymuje się. Wyszukiwanie z zabronieniami tworzy listę ruchów, które są zabronione (tabu), aby zapobiec rozważaniu wcześniejszych rozwiązań. Dlatego podczas wykonywania wyszukiwania lista zmienia się w sposób ciągły, czyniąc wyszukiwanie algorytmem adaptacyjnego przeszukiwania pamięci [55].

Algorytm można przedstawić w następujących krokach:

1. Wybierz wstępne rozwiązanie.
2. Utwórz listę rozwiązań, których nie ma na liście tabu i oceń je.
3. Wybierz najlepsze dopuszczalne rozwiązanie.
4. Jeśli warunek zakończenia jest spełniony, zatrzymaj się, uzyskano ostateczne rozwiązanie.
5. W przeciwnym razie zaktualizuj tabu i kryteria akceptowalności i powtórz krok 2.

Algorytmy memetyczne

Algorytmy memetyczne (ang. Memetic algorithms, MA) są używane jako połączenie podejść ewolucyjnych z odrębnymi procedurami indywidualnego uczenia się lub lokalnego doskonalenia w poszukiwaniu problemów. Zasadniczo algorytmy memetyczne są rozszerzeniem algorytmu genetycznego poprzez zastosowanie lokalnego wyszukiwania osobników po mutacji. Po ewolucji biologicznej nastąpiło przejście od genów do memów.

Algorytmy memetyczne zaproponowane w pracy [103] oznaczają rodzinę metaheurystyk, których główną cechą jest hybrydyzacja różnych podejść algorytmicznych dla danego problemu. Według Dawkins: „Przykładami memów są melodie, idee, chwytliwe frazy, modne ubrania i sposoby

robienia garnków lub budowania luków. Tak jak geny rozmnażają się w puli genów, przeskakując z ciała do ciała za pośrednictwem plemników lub jajeczek, tak memy rozmnażają się w puli memów, przeskakując z mózgu do mózgu w procesie, który w szerokim znaczeniu można nazwać imitacją” [103].

Mem to układ percepcyjny, który może być przekazywany z jednej osoby na drugą. Replikacja odbywa się poprzez przesłanie memu do pamięci innej osoby, tj. nosiciela bez kasowania memu poprzedniego nosiciela. MA wykorzystują wiedzę opartą na problemach i instancjach, włączając istniejącą wcześniej heurystykę, reguły redukcji danych wstępnego przetwarzania, aproksymację, lokalne techniki wyszukiwania, wyspecjalizowane operatory rekombinacji itp. W pracy [104], algorytm memetyczny został opisany w następujący sposób:

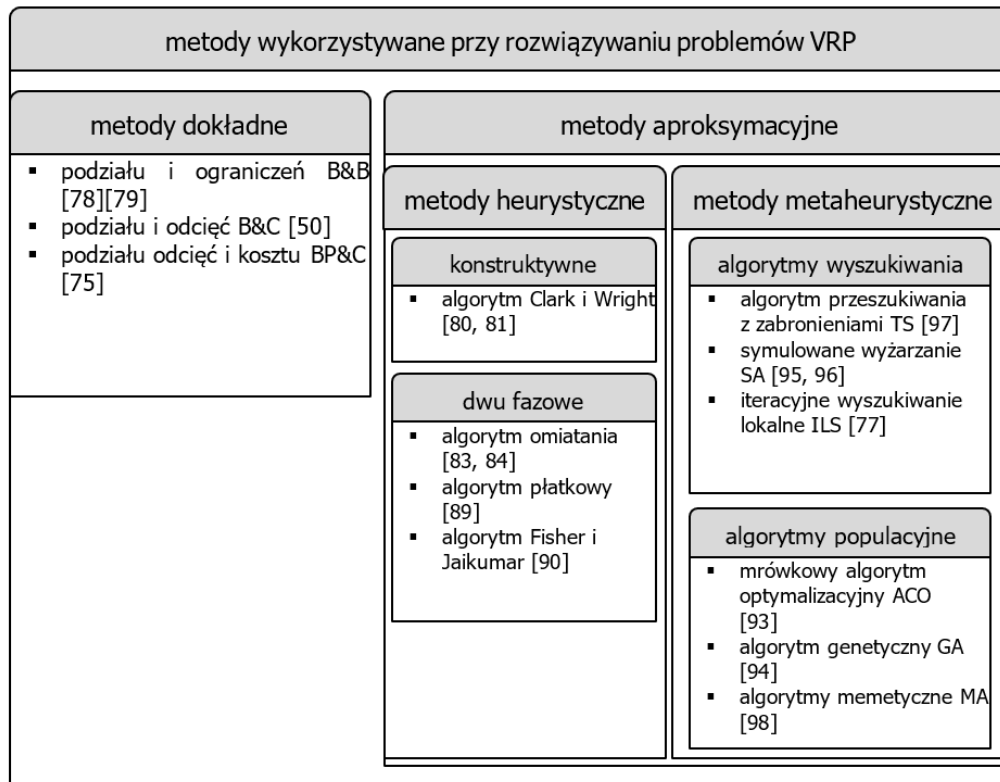
1. **(Inicjalizacja)** Generowanie wykonalnych osobników dla populacji początkowej.
2. **(Wyszukiwanie lokalne)** Zastosuj wyszukiwanie lokalne.
3. **(Wybór rodziców)** Wybierz parę rodziców do procesu krzyżowania.
4. **(Krzyżowanie)** Stwórz dwoje dzieci z każdej pary rodziców.
5. **(Mutacja)** Wykonaj mutację na każdym rozwiązaniu (w razie potrzeby napraw niemożliwe rozwiązanie).
6. **(Wyszukiwanie lokalne)** Zastosuj wyszukiwanie lokalne do każdego rozwiązania po mutacji.
7. **(Wymiana populacji)** Wybierz dzieci dla populacji w następnym pokoleniu.
8. **(Wygaśnięcie)** Jeśli wcześniej określona liczba pokoleń została zakończona.
9. **(Stop)**. W przeciwnym razie przejdź do kroku wyboru rodzica.

2.3.3 Podsumowanie

W niniejszym rozdziale zostały przedstawione najpopularniejsze metody rozwiązywania VRP oraz jego rozszerzeń. Wynikiem ich stosowania są rozwiązania optymalne (metody dokładne) lub sub-optymalne (metody heurystyczne, metaheurystyczne).

Na rysunku Rys. 2.3 przedstawiono ogólną klasyfikację spotykanych w literaturze algorytmów rozwiązywania problemów klasy VRP. Wyniki przeglądu literatury wykonanego przez autorów pracy [82] (Tab. 2.2) potwierdzają, że najczęściej wybieranymi metodami rozwiązywania tego typu problemów są metody gwarantujące rozwiązanie sub-optymalne (metody aproksymacyjne). Zapewniają one kompromis między dokładnością rozwiązania, a czasem obliczeń. Można je więc wykorzystywać do rozwiązywania problemów o skali spotykanej w praktyce. Najmniejszą popularnością wśród badaczy z kolei cieszą się metody dokładne. Wpływa na to duża złożoność stosowanych modeli jak i niska efektywność czasowa wykorzystywanych podejść.

W tabeli Tab. 2.3 przedstawiono korelacje między poszczególnymi klasami problemów marszrutyzacji pojazdów, a metodami wykorzystanymi do ich rozwiązania. Najczęstszym wariantem problemu VRP, do rozwiązania którego wykorzystuje się algorytmy dokładne to problemy klasy CVRP. Z Tab. 2.3 odczytać można również, że dużym zainteresowaniem badaczy cieszą się metody łączące różne algorytmy tzw. metody hybrydowe.



Rys. 2.3 Klasyfikacja algorytmów wykorzystywanych przy rozwiązywaniu problemów klasy VRP (opracowanie własne na podstawie literatury [105, 106])

Tab. 2.2 Popularność algorytmów na przestrzeni lat (opracowanie własne na podstawie literatury [82])

Zastosowane algorytmy	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Suma
Dokładne	2	2	1	5	2	2	2	4	4	6	2	32
Heurystyczne (74)												
Algorytmy konstrukcyjne	8	6	5	4	7	9	9	3	7	10	2	70
Algorytmy dwufazowe	1					1	1			1		4
Metaheurystyczne (126)												
Algorytmy przeszukiwania lokalnego (65)												
Symulowane wyżarzanie (SA)	1			2	2	6	3	3	1	1	1	20
Przeszukiwanie z zabronieniami (TS)	4	2	1	1	4	1	1	5	2	3	1	25
Iteracyjne przeszukiwanie lokalne (ILS)	2		1	1	2	6	1	1	1	3	2	20
Algorytmy populacyjne (61)												
Algorytmy genetyczne (GA)	3	1	2	3	4	6		3	4	5	2	33
Algorytmy memetyczne (MA)	1					1	1		1	2	1	7
Algorytmy mrówkowe (ACO)	1	2	1	1	2	2	4	2	2	2	2	21

Tab. 2.3 Korelacja między wariantami problemów VRP, a algorytmami (opracowanie własne na podstawie literatury [82])

Wariant VRP	Dokładne	Heurystyczne			Metaheurystyczne					Hybrydowe	
		Konstruktywne	Dwufazowe	Rozwojowe	GA	MA	ACO	SA	TS	ILS	
CVRP	26	60	3	42	27	5	18	16	20	15	44
VRPTW	15	29	1	15	22	5	12	9	16	3	32
HVRP	6	10	1	6	6		3	4	5	5	9
MDVRP	3	12	1	5	9	2	2	2		7	11
GVRP	5	6		3	2		1	2	4	2	5
OVRP	2	2		2				1	1	4	2
SDVRP	3	5		3						1	
PVRP	2						2		1		

Zastosowanie metod aproksymacyjnych do rozwiązywania zagadnień problemów marszrutyzacji pojazdów niesie korzyści w postaci krótkiego czasu obliczeń oraz większą skalę analizowanych problemów. Wadą tych metod jest natomiast brak gwarancji uzyskania rozwiązań optymalnych. Ponadto metody te są nieskuteczne w przypadku przeszukiwania przestrzeni zawierających w znacznej części rozwiązania niedopuszczalne. W praktyce z takimi sytuacjami mamy do czynienia gdy uwzględnia się założenia: indywidualnych terminów dostaw do klientów (stosowanie „twardych” okien czasowych), wzajemnego wykluczania w dostępie do zasobów współdzielonych (punktów dostaw, baz, kanałów powietrznych itp.), ograniczonej pojemności BSP itp. Środowiska programowania deklaratywnego tj. IBM ILOG CPLEX czy Gurobi są przystosowane do sytuacji, w której zbiór rozwiązań dopuszczalnych jest pusty – zwracana jest informacja o braku rozwiązań. Ze względu na złożoność analizowanego problemu oraz aprioryczny brak gwarancji istnienia rozwiązań dopuszczalnych (np. poprzez brak rozwiązania umożliwiającego dostarczenie towarów zgodnie ze zdefiniowanymi oknami czasowymi), zdecydowano się zastosować techniki programowania deklaratywnego.

2.4 Problemy marszrutyzacji BSP

W niniejszym rozdziale przedstawiono zagadnienie marszrutyzacji pojazdów w ujęciu wykorzystania bezzałogowych statków powietrznych (BSP).

2.4.1 Zastosowanie BSP

W obecnych czasach bezzałogowe statki powietrzne, zwane również dronami, są szeroko stosowane w zastosowaniach cywilnych [107] takich jak precyzyjne rolnictwo [108], monitorowanie/skanowanie terenu [109, 110], obsługa sieci 5G [111, 112], lokalizacja ludzi [113, 114, 115] oraz dostarczanie towarów [116, 117]. Duże firmy transportowe, takie jak Amazon, Google, UPS i DHL testują już systemy dostaw integrujące autonomiczne pojazdy naziemne oraz BSP, koncentrując się w szczególności na logistyce „ostatniej mili” dla małych paczek [118]. Wykorzystanie BSP pozwala zwiększyć zakres działalności przedsiębiorstwa transportowego oraz wykluczyć sytuacje krytyczne takie jak korki uliczne, brak drogi dojazdowej itp. Biorąc pod uwagę zagrożenie ze strony pandemii np. COVID-19, BSP mogą być wykorzystywane do bezpiecznego dostarczania żywności [119], a w przypadkach wystąpienia klęsk żywiołowych, do dostarczania artykułów pierwszej potrzeby [120].

2.4.2 Planowanie misji BSP

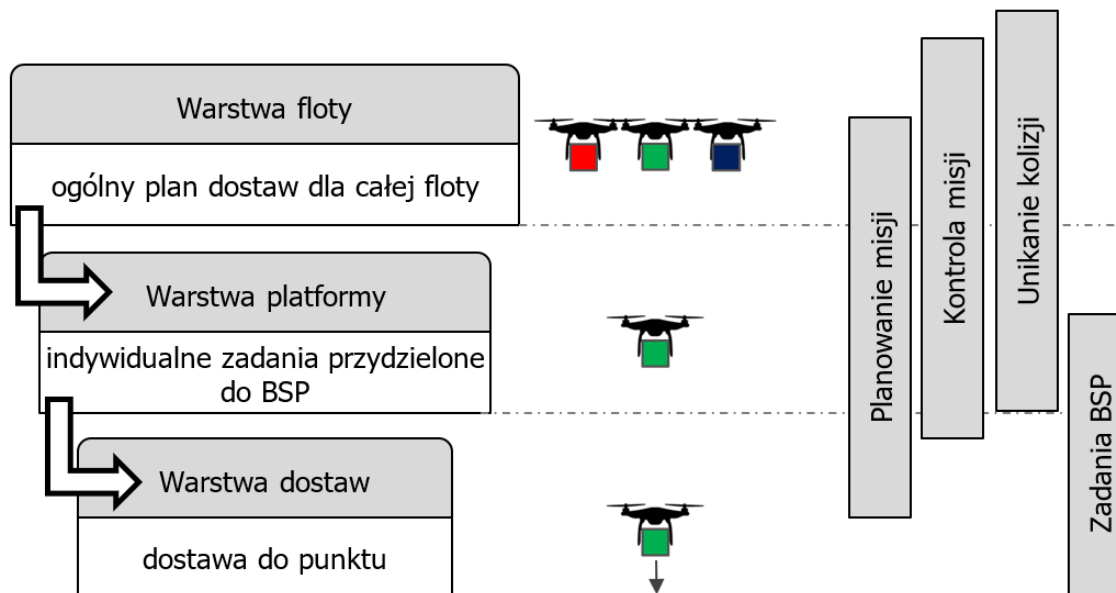
Badania nad problemami planowania misji dostarczania towarów przy wykorzystaniu floty bezzałogowych statków powietrznych (BSP) zyskały na popularności w ostatnich latach [121, 27, 122]. W ogólnym przypadku problem planowania misji BSP może być traktowany jako rozszerzenie VRP [20, 123, 124, 125] obejmujące jednocześnie marszrutyzację i harmonogramowanie operacji transportowych.

Problem marszrutyzacji zadań transportowych dla floty bezzałogowych statków powietrznych odnosi się do floty BSP, której zadaniem jest dostarczenie żądanej, przez odbiorców, ilości towarów do n węzłów, przy spełnieniu ograniczeń dotyczących pojemności energetycznej dla każdego z BSP. Problem planowania misji lotów floty BSP obejmuje również wyznaczanie bezkolizyjnych planów lotu, które spełniać muszą szereg wymagań klientów (np. dostawy o określonej porze).

W przeciwieństwie do tradycyjnych problemów marszrutyzacji, problemy planowania misji lotów dla floty bezzałogowych statków powietrznych uwzględniają całą architekturę systemu transportowego, która obejmuje:

- warstwę floty, na której jest ona zarządzana w celu świadczenia usług,
- warstwę platformy, na której decyzje podejmowane są indywidualnie dla każdego BSP wchodzącego w skład floty [28],
- warstwę dostaw, na której podejmowane są decyzje w zakresie operacji dostaw do odbiorcy.

Strukturę takiego systemu przedstawiono na Rys. 2.4. Obecne badania prowadzone są dla przypadków uwzględniających maksymalnie dwie warstwy analizowanej architektury (warstwy floty i platformy lub warstwy platformy i dostaw). Badania zorientowane na wszystkie trzy warstwy należą do rzadkości. Przedstawione w niniejszej pracy badania obejmują planowania misji floty BSP zarówno na poziomie floty (decyzje w zakresie zachowania wszystkich BSP) jak i pojedynczego pojazdu (decyzje w zakresie zachowania pojedynczego BSP).



Rys. 2.4 Hierarchiczna reprezentacja systemu transportowego związana z planowaniem misji floty BSP (opracowanie własne na podstawie literatury [28])

W większości opracowań, zakłada się, że dron porusza się w przestrzeni dwuwymiarowej. W praktyce jednak BSP poruszają się w przestrzeni trójwymiarowej (wznos, zawis w powietrzu, lądowanie). Uwzględnianie tego aspektu w badaniach dotyczących planowania misji lotów floty BSP

należy do rzadkości [126, 127]. Wiąże się to ze wzrostem złożoności obliczeniowej wykorzystywanych metod, co przekłada się na możliwości analizowania skali problemu. Ponadto osiągnięcia w tej dziedzinie koncentrują się na wyznaczaniu misji dla floty BSP bez uwzględnienia zmieniających się warunków pogodowych oraz ich wpływu (nieliniowego) na zużycie energii [128].

Analizowany problem planowania misji lotów BSP jest rozszerzeniem standardowego problemu harmonogramowania i marszrutyzacji pojazdów (VRP). W problemie tym uwzględnia się wielowymiarowość architektury badanego systemu oraz szereg założeń wpływających na złożoność obliczeniową problemu związanych z:

- planowaniem misji floty BSP w przestrzeni trójwymiarowej [129],
- specyfikacjami technicznymi BSP [130],
- zużyciem energii uwzględniającym zmienne warunki pogodowe [28],
- limitowanym udźwigniem BSP [20],
- wyznaczaniem planów misji z uwzględnieniem ruchomych [131] jak i nieruchomych [129] obiektów.

Uwzględnienie wszystkich wyżej wymienionych elementów powoduje znaczny wzrost złożoności analizowanego problemu [122].

2.4.2.1 Strategie wyznaczania bezkolizyjnych marszrut i harmonogramów

Analizując dostępną literaturę, strategie dotyczące unikania kolizji różnią się w zależności od środowiska, które definiuje z jakiego typu przeszkodami (stałe, ruchome/latające, pojedyncze, mnogie) mamy do czynienia [28]. Ze względu na znaczny rozmiar przestrzeni przeszukiwania, stosowane są zwykle heurystyki, które gwarantują wyznaczenie bezkolizyjnych misji floty BSP.

Zagadnienie unikania kolizji jest rzadko rozpatrywane w badaniach dotyczących marszrutyzacji zadań floty BSP. Zwykle przyjmuje się, że BSP wyposażone są w specjalne detektory umożliwiające unikanie kolizji z przeszkodami [132]. Pod pojęciem unikania kolizji należy rozpatrywać dwa aspekty tego zagadnienia tj.: fizyczne unikanie przeszkód znajdujących się w pobliżu pojazdu (wykrywanych przez odpowiednie detektory) jak również analiza wzajemnej lokalizacji BSP we flocie w celu uniknięcia kolizji w powietrzu i punkcie dostaw. W większości badań zakłada się, że unikanie kolizji małych BSP sprowadza się do wykrywanie ścieżki kolizyjnej i unikanie jej poprzez zmianę wysokości przelotu lub zawrócenie do ostatniego odwiedzonego punktu [28, 133]. Unikanie kolizji może być również realizowane poprzez predykcję potencjalnych torów kolizyjnych na etapie planowania misji lotów w trybie off-line. W trybie on-line unikanie kolizji realizowane jest wówczas poprzez reakcję na informację o zagrożeniu wykrytym przez czujniki zamontowane w BSP, lub poprzez protokoły komunikacji sygnalizujące wzajemne pozycje poszczególnych BSP oraz parametry planowanej trajektorii lotu [134]. Kolejny aspekt wpływający na metody unikania kolizji uzależniony jest od sposobu przemieszczania się BSP np. z wykorzystaniem dedykowanych korytarzy powietrznych [28]. Tab. 2.4 ilustruje popularne strategie wykorzystywane w zagadnieniu unikania kolizji uwzględniających specyfikę środowiska, w którym realizowana jest misja.

Tab. 2.4 Strategie unikania kolizji ze względu na środowisko wykonywania misji

Wariant	Przeszkody ruchome	Przeszkody nieruchome
Predykcja/planowanie off-line	Planowanie misji lotu spełniających ograniczenia związane z unikaniem kolizji [32]	Planowanie misji lotu z unikaniem stałych przeszkód [135]
Reakcja/planowanie on-line	Detekcja przeszkód za pomocą sensorów [134] Unikanie kolizji przy użyciu ograniczeń opisujących unikanie kolizji [132]	Detekcja przeszkód za pomocą sensorów [136]

Wariant	Przeszkody ruchome	Przeszkody nieruchome
Wolna przestrzeń	Detekcja przeszkód za pomocą sensorów [134]	Detekcja przeszkód za pomocą sensorów [134]
Dedykowane korytarze lotu	Planowanie misji lotu spełniających ograniczenia związane z unikaniem kolizji [132]	Planowanie misji lotu spełniających ograniczenia związane z unikaniem kolizji [137]

2.4.2.2 Czynniki wpływające na zużycie energii przez BSP

W większości istniejących opracowań poruszających problem marszrutyzacji BSP zakłada się, że pojemność baterii jest nieskończona [138] lub parametr pojemności energetycznej nie jest w ogóle uwzględniany. Do rzadkości należą prace, w których modele matematyczne opisują ograniczenia związane z zużyciem energii [127, 139, 140]. Uwzględnienie czynników determinujących zużycie energii ma zasadnicze znaczenie przy wyprowadzaniu modeli opisujących zużycie energii.

W przypadku wyznaczania marszrut dla statków morskich, zużycie paliwa przedstawiane jest w funkcji prędkości [140], która jest silnie nieliniowa [141], natomiast dla BSP przyjmuje się, że funkcja zużycia energii jest liniowa względem prędkości [20]. Przyjęcie założenia przyjmującego liniowy charakter funkcji zużycia energii przez BSP jest nieuzasadnione, m.in. z uwagi na: zmienny ciężar BSP w trakcie lotu, nieliniową charakterystykę wartości oporu stawianego przez konstrukcję BSP w funkcji prędkości, zapotrzebowanie na energię w trakcie wykonywania misji „z wiatrem” lub „pod wiatr”

Tab. 2.5 Czynniki wpływające na zużycie energii przez BSP (opracowanie własne na podstawie literatury [142])

Aspekty techniczne BSP		Środowisko	Misja lotu
Projekt	Dynamika		
Waga BSP	Prędkość lotu	Gęstość powietrza	Waga ładunku
Rozmiar BSP	Ruch (start, lądowanie, przelot)	Siła grawitacji	Rozmiar ładunku
Liczba wirników	Przyspieszanie, hamowanie	Warunki wietrzne	Puste powroty
Rozmiar wirnika	Kąt natarcia	Pogoda (deszcz, śnieg, itp.)	Rozmiar floty
Waga baterii	Kąt lotu	Temperatura otoczenia	Lot baza – punkt – baza
Pojemność baterii	Wysokość przelotu	Regulacje prawne	Lot baza – punkty – baza
Współczynnik przekazywania mocy	Lot na innym pojeździe	Gęstość powietrza	Sposób dostawy (lądowanie, spadochron)
Ładowność BSP	Prędkość maksymalna BSP	Siła grawitacji	Obszar dostawy
Stosunek siły udźwigu do siły oporu			Waga ładunku
Mechanizm dostarczania towarów			Rozmiar ładunku
Awionika BSP			Puste powroty
			Rozmiar floty

Uwzględnienie czynników, przedstawionych w Tab. 2.5 sprawia, że funkcja zużycia energii przez BSP jest funkcją nieliniową. W celu odwzorowania rzeczywistych warunków proces planowania misji floty BSP powinien uwzględniać nieliniowy model zużycia energii.

Wpływ warunków pogodowych

Przy wyznaczaniu planów misji floty BSP realizowanych w środowisku zewnętrznym należy uwzględnić ograniczoną przewidywalność warunków pogodowych. Stanowią one najważniejsze czynniki środowiskowe, które wpływają na zużycie energii [143, 144, 145, 146, 147, 148]. Wśród nich należy wyróżnić:

- wiatr – głównym czynnikiem środowiskowym wpływającym na pracę BSP są parametry (charakterystyka) wiatru: kierunek i prędkość wiatru.
- temperatura – warunki temperaturowe mogą wpływać na wydajność baterii BSP [20].

W większości opracowań dotyczących marszrutyzacji BSP nie uwzględnia się wpływu pogody na zużycie energii [20, 127, 126, 149]. Zmiany warunków pogodowych w czasie, występują w sposób losowy [133], w związku z tym należy założyć, że na określonej trasie zużycie energii będzie zróżnicowane w różnych przedziałach czasu.

Wpływ prędkości oraz ładowności BSP

Kluczowym czynnikiem wpływającym na zużycie energii BSP jest jego relatywna prędkość. Prędkość oraz kierunek wiatru bezpośrednio wpływają na prędkość lotu BSP. W zależności od kierunku wiatru może on wywierać pozytywny (zwiększenie zasięgu, mniejsze zużycie energii) bądź negatywny (zmniejszenie zasięgu, większe zużycie energii) wpływ. Podczas lotu BSP może znajdować się w następujących fazach:

- lot poziomy (przelot, bez zmiany wysokości),
- lot pionowy (pionowy start, lądowanie),
- zawis (bezruch w powietrzu).

Dla różnych faz lotu wykorzystuje się różne modele zużycia energii [150]. Przy budowie modelu opisującego zużycie energii BSP należy uwzględnić całkowity jego ciężar. Na ciężar ten składają się: ciężar pojazdu jak również zmienny w czasie ciężar transportowanego towaru [20, 150].

W lotnictwie uwzględnia się wpływ różnych czynników na zużycie paliwa/energii. Przykładowo, maksymalny zasięg BSP może być ograniczony przez:

- ciężar własny BSP,
- ciężar brutto ładunku,
- stosunek siły ciągu do ciężaru [133, 142],
- ciężar paliwa,
- ładowność [151].

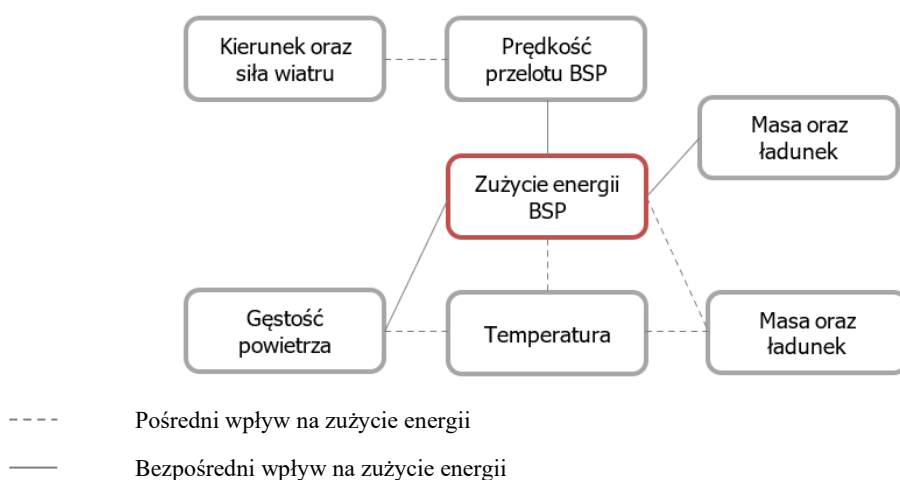
Dodatkowo w opracowaniach poświęconych lotnictwu można znaleźć porównanie modeli zużycia paliwa dla śmigłowców wielosilnikowych [152], które wskazuje, że zastosowania liniowej aproksymacji funkcji zużycia paliwa jest nieefektywne przy dużych zmianach masy przewożonego ładunku [20].

Podsumowanie

Realizacje planów misji BSP są limitowane przez wiele czynników m.in. ładowność BSP, czas lotu BSP, pojemność baterii BSP, warunki pogodowe. Czas lotu jest zależny od tempa zużycia energii. Na rysunku Rys. 2.5 przedstawiono zależności między poszczególnymi czynnikami, które w sposób pośredni, jak i bezpośredni wpływają na zużycie baterii przez BSP.

Warunki pogodowe mają kluczowe znaczenie dla zużycia energii, ponieważ wpływa na prędkość przelotu BSP, a temperatura wpływa na pojemność baterii stosowanych w BSP [20, 28]. Gęstość powietrza wpływa na zużycie energii, gdyż jest to wypadkowa trzech zmiennych:

wilgotności, ciśnienia powietrza oraz temperatury. Niska temperatura może mieć niekorzystny wpływ na wydajność akumulatora do momentu osiągnięcia optymalnej, dla danego zastosowania, temperatury ogniwa [20]. Dotychczasowe badania nie podejmowały tematu wpływu warunków pogodowych. Przyjmowano założenie, że pogoda ma znikomy wpływ na zużycie energii [126, 127, 149]. Niektóre opracowania podejmują kwestie analizy wpływu warunków pogodowych na zużycie energii, przy jednoczesnym wykorzystaniu tej informacji do planowania misji BSP [20, 153, 154]. W tych badaniach przyjmuje się zwykle stałe warunki pogodowe (kierunek oraz prędkość wiatru) oraz liniowe zużycie energii liniowe [20, 28, 153].



Rys. 2.5 Czynniki wpływające na zużycie baterii BSP (opracowanie własne na podstawie literatury [21])

2.4.3 Modele zużycia energii BSP

Publikacja pracy [155] spopularyzowała badania nad projektowaniem oraz optymalizacją planów dostaw przy wykorzystaniu BSP startujących z baz lub innych pojazdów (np. ciężarówek). Badania te obejmują:

- marszrutyzację i harmonogramowanie [20, 156, 157, 158, 159, 160],
- problem lokalizacji obiektów, w tym stacji ładowania [161, 162, 163, 164],
- rozmiar floty [18].

Modelowanie marszrut BSP wiąże się z uwzględnieniem ograniczeń czasowych i/lub odległościowych. Wiele badań zakłada stały wskaźnik zużycia energii na jednostkę czasu lub odległości, dzięki czemu zużycie energii modelowane jest jako liniowa funkcja czasu lub przebytej odległości [164, 165, 166, 167]. Istnieje jednak znaczna rozbieżność między zakładanymi wartościami zużycia energii, np. w pracy [164] przyjęto zużycie energii o wartości 46,1 J/m (na podstawie BSP dostawczego Amazon z 2013 roku, który przewozi paczki o wadze 5 funtów przy 70 km/h), podczas gdy w pracy [167] przyjęto zużycie energii na poziomie 223,7 J/m (na podstawie testów terenowych drona DJI Matrice 600 Pro). W pracy [168] wykorzystano wskaźnik zużycia energii w zakresie 22-223 J/m, w celu oceny wrażliwości wyników badań na efektywność energetyczną BSP. Wyniki pracy wskazują, że korzyści związane ze zmniejszeniem emisji CO_2 , przy wykorzystaniu BSP, w porównaniu z ciężarówkami silnie zależą od wskaźnika zużycia energii.

W literaturze istnieją opracowania dotyczące modeli zużycia energii przez BSP, przy czym kluczowym zróżnicowaniem jest założenie dotyczące ciągu dla stabilnego lotu poziomego. W różnych modelach zakłada się, że:

- siła ciągu T jest równa sile oporu D , a siła ciężkości W jest równa sile nośnej L (a zatem $T = \frac{W}{r}$, gdzie $r = \frac{L}{D}$ jest stosunkiem siły ciągu do oporu)
- siła ciągu jest równa sile ciężaru, jak w przypadku śmigłowca w zawisie
- siła ciągu jest równa sumie ciężaru, oporu i siły nośnej

Założenia te odzwierciedlają różne spojrzenia na operacje BSP zależne od jego konstrukcji np. budowa zbliżona do samolotu (udział siły nośnej podczas lotu) lub do helikoptera (uwzględnienie wirnika, siły ciągu itp.). Wymienione podejścia zapoczątkowały trzy, różne nurty badań nad modelowaniem zużycia energii przez BSP [142]:

1. Model zużycia energii przez BSP bazuje na zasadach lotu załogowych statków powietrznych. W pracy [169] został zaprezentowany model wykorzystujący zintegrowane podejście łączące aspekty aerodynamiczne i projektowe BSP w jeden krytyczny parametr – współczynnik wznoszenia do oporu r . Model energetyczny zawiera również stały komponent mocy awioniki.
2. Model zużycia energii przez BSP został oparty na operacjach śmigłowca, przy założeniu, że moc zużywana podczas lotu poziomego, startu lub lądowania jest w przybliżeniu równoważna energii zużywanej podczas zawisu. Model ten ignoruje wpływ prędkości BSP na zużycie energii. W pracy [20] moc pobierana przez śmigłowca wielowirnikowy w zawisie została przedstawiona jako funkcja masy akumulatora i ładunku.
3. Model zużycia energii przez BSP bazuje na modelu regresyjnym modeli przedstawionych w punkcie 1 oraz 2. W pracy [170] zaprezentowano dziewięcioparametrowy model regresyjny dla zużycia energii przez BSP, który obejmuje prędkość i przyspieszenie poziome i pionowe, a także masę ładunku i prędkość wiatru.

Alternatywnym podejściem do szacowania zużycia energii przez BSP jest wykorzystanie informacji dostarczonych przez producenta, gdzie wskaźnik zużycia energii (J/m) wyznaczany jest na podstawie równania $\frac{\text{Energia akumulatora [J]}}{\text{Zasięg lotu [m]}}$. Informacje o energii baterii są zwykle, lecz nie zawsze, podawane przez producenta (np. w watogodzinach lub jako pojemność i napięcie). Jednak informacje o zasięgu lotu nie są dostarczane w ujednolicony sposób. Ponadto dane dotyczące odległości lotu, jeśli są dostępne na stronach internetowych producenta, mogą być odległością przebytą w optymalnych warunkach (np. przy prędkości, wysokości i warunkach pogodowych maksymalizujących odległość), i które mogą nie odzwierciedlać rzeczywistych operacji BSP. Chociaż odległość lotu można obliczyć jako iloczyn prędkości i czasu lotu, korzystając z raportowanych danych dla czasu lotu (lub czasu zawisu) i prędkości BSP, zdarza się, że producenci często podają wartości maksymalne (np. „Maksymalny czas lotu” i „Maksymalna prędkość”) lub nieokreślonych wartości, a zużycie energii przez BSP zależy w dużej mierze od prędkości. W związku z tym szacunki dotyczące odległości lotu i zużycia energii mogą być niedokładne i należy traktować jako orientacyjne. Aktualnie brakuje standardów określających efektywność energetyczną dostarczonych przez producentów rozwiązań (np. jak ma to miejsce w przypadku środków efektywności energetycznej dla samochodów lub urządzeń).

Tab. 2.6 przedstawia kategoryzację 12 kluczowych modeli zużycia energii BSP. Pierwsza kolumna określa odniesienie źródła literaturowego danego modelu. Kolumny 2–4 identyfikują założenia dotyczące ciągu dla ustalonego lotu poziomego i pokazują trzy grupy modeli (lot poziomy, pionowy, zawis). Kolumny 5–7 odzwierciedlają zakres podróży BSP uwzględniony w modelu dla różnych segmentów lotu BSP (lot poziomy, zawis i lot pionowy, w tym start/lądowanie). Należy pamiętać, że wszystkie 12 modeli obejmuje zużycie energii dla lotu poziomego, ale tylko połowa obejmuje zużycie energii na zawis i loty pionowe. Kolumny 8–10 wskazują korekty modelowanego zużycia energii dla wiatru, awioniki i pustych zwrotów. Należy zauważyć, że tylko 2 modele nie zawierają co najmniej jednego z trzech korekt w kolumnach 8–10, chociaż korekty te są często

usuwane z modeli w raportowanych wynikach obliczeń. Kolumny 11-12 wskazują rodzaj dostarczonego modelu (teoretyczny oparty na modelowaniu ciągu, jak w kolumnach 2-4, albo modelach regresyjnych) i pokazują, że 10 artykułów omawia modele teoretyczne, podczas gdy 3 artykuły przedstawiają modele regresji. Kolumna 13 wskazuje pięć referencji, które obejmują testy terenowe z BSP, często używane do ustawiania wartości parametrów w modelu.

Tab. 2.6 Podsumowanie kluczowych cech modeli teoretycznych i regresyjnych zużycia energii przez BSP w literaturze (opracowanie własne na podstawie literatury [142])

Lit	Założe- nie ciągu do lotu			Lot			Wiatr	Awionika	Puste powroty	Model teore- tyczny	Model regre- syjny	Testy rzeczy- wiste
	1	2	3	Poziomy	Zawis	Pionowy						
[169]	x			x			x	x		x		
[171]	x			x					x	x		
[20]		x		x	x	x				x	x	x
[170]				x	x	x	x	x			x	x
[172]				x	x	x	x	x			x	x
[158]		x		x	x	x	x			x		x
[173]	x			x	x	x	x	x	x	x		
[174]	x	x		x	x	x	x	x	x	x		
[175]		x		x						x	x	
[15]			x	x			x		x	x		x
[18]	x			x				x		x		
[176]		x		x	x	x	x	x	x	x		

2.5 Podsumowanie

W niniejszym rozdziale przedstawiono charakterystykę problemu marszrutyzacji pojazdów. Ze względu na rosnące zapotrzebowanie odzwierciedlenia realiów problemów związanych z planowaniem misji lotów BSP, opracowano wiele rozszerzeń klasycznego ujęcia problemu VRP. Szczególną uwagę poświęcono zagadnieniom wchodzącym w skład autorskiego problemu DRVRP. Scharakteryzowano również najpopularniejsze metody rozwiązywania problemów marszrutyzacji pojazdów. Metody zostały podzielone na dwie główne grupy: metody dokładne, których rozwiązaniem jest rozwiązaniem optymalnym oraz aproksymacyjne, których rozwiązanie zawiera się w zbiorze rozwiązań dopuszczalnych. Rozwój technologii sprawia, że istniejące problemy i związane z nimi metody rozwiązywania są niewystarczające, ponieważ nie uwzględnia się dodatkowych ograniczeń wynikających ze specyfiki pojazdów, dla których plan jest wyznaczany, np. bezzałogowe statki powietrzne. W literaturze brakuje opracowań dotyczących badań z uwzględnieniem warunków pogodowych i ich wpływu na realizowalność misji lotu (wpływ warunków pogodowych na zużycie energii). Oznacza to potrzebę opracowania modelu matematycznego, w którym zostaną uwzględnione parametry obejmujące specyfikę pojazdu jak również warunki pogodowe, dla którego będzie możliwe opracowanie efektywnej metody planowania misji.

3 Referencyjny model problemu planowania odpornych misji lotu floty BSP

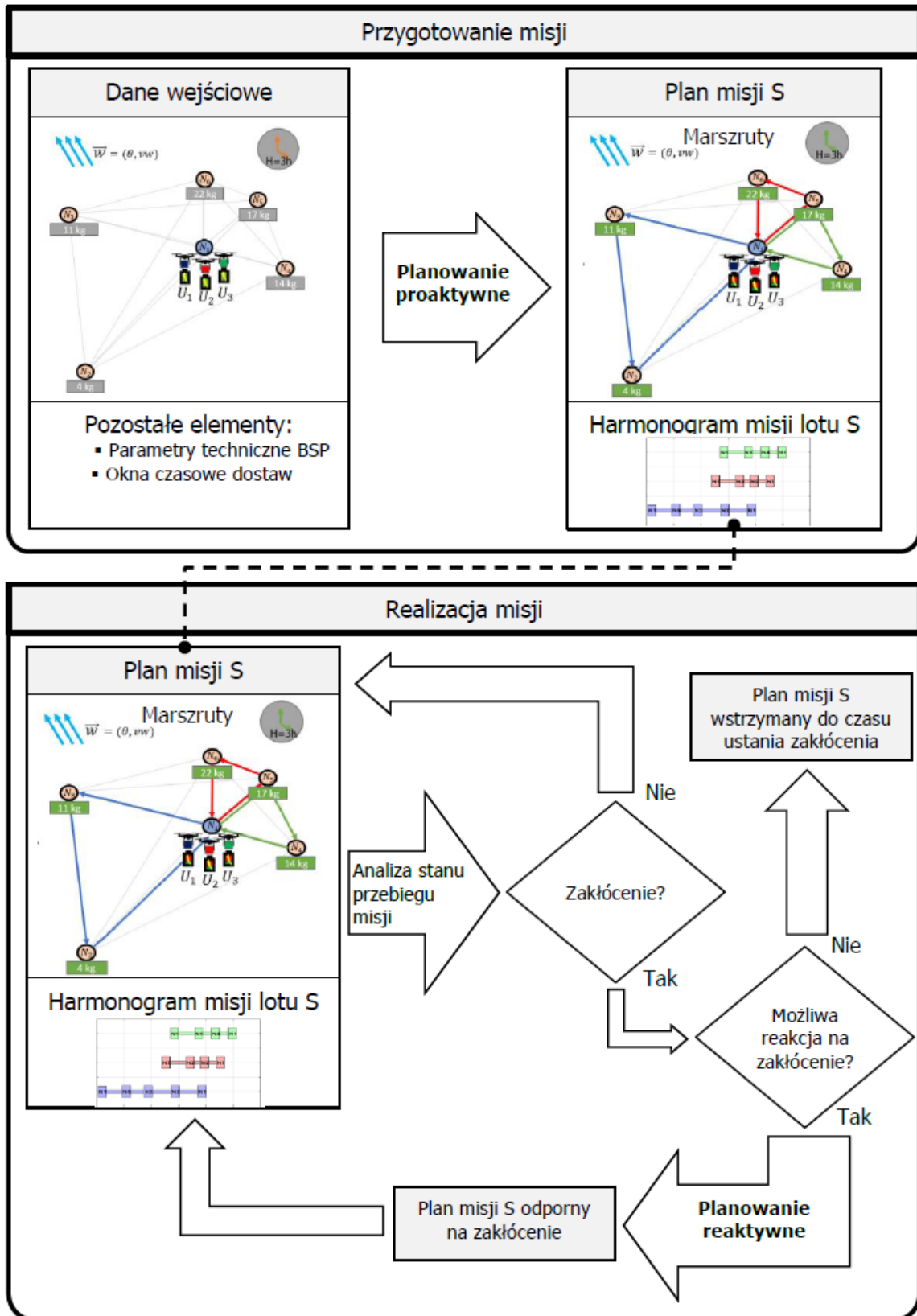
Rozdział przedstawia proaktywno-reaktywne podejście do planowania odpornych misji lotów floty BSP. Jego stosowanie jest warunkowane uwzględnieniem w modelu problemu wielu czynników (czynniki środowiskowe, parametry techniczne, dane dotyczące dostaw, itp.) wpływających na realizowalność misji. W tym celu opracowano autorski model, który sformułowano w terminologii Problemu Spełniania Ograniczeń PSO.

3.1 Proaktywno-reaktywne planowanie misji lotów

Wyznaczanie planu misji lotu (marszrut i odpowiadających im harmonogramów) poprzedza zwykle jej realizację. Praktyka pokazuje jednak, że w przypadku wystąpienia nieprzewidzianych zjawisk (np. zmiany warunków pogodowych), wcześniej opracowany plan staje się niewykonalny, ponieważ dochodzi do np. rozładowania baterii BSP, uszkodzenia pojazdu, itp. W związku z tym proces planowania misji lotu winien uwzględniać (Rys. 3.1):

- **Planowanie proaktywne** – realizowane przed realizacją misji. W celu opracowania planu proaktywnego uwzględnia się dane o strukturze sieci transportowej (zapotrzebowania punktów dostaw, terminy dostaw, itp.), flocie BSP oraz prognozowanych warunkach pogodowych, w których dana misja będzie realizowana. Ze względu na nieprecyzyjny charakter danych pogodowych tego typu planowanie misji lotów BSP, zaliczane jest do grupy statyczno-stochastycznych. Wynikiem planowania proaktywnego jest odporny (niewrażliwy na zadane zmiany warunków pogodowych) plan misji floty BSP, który gwarantuje terminową dostawę towarów (określoną przez indywidualne okna czasowe oraz horyzont planowania) oraz poziom zużycia energii każdego z BSP poniżej 100%.
- **Planowanie reaktywne** – realizowane na potrzeby sytuacji, w których dochodzi do nieoczekiwanych zmian parametrów misji (zakłócenia) tj. zmiany: struktury sieci, terminów dostaw, zapotrzebowania, warunków pogodowych poza zakładany zakres. Analiza stanu misji lotu BSP umożliwia wykrycie zakłócenia oraz adekwatną reakcję na te zakłócenie. Wynikiem planowania reaktywnego jest nowa, realizowalna misja lotu gwarantująca terminową dostawę towarów w środowisku przyjmującym warunki odmienne od pierwotnie zakładanych. Proces planowania reaktywnego należy do grupy problemów statyczno-stochastycznych.

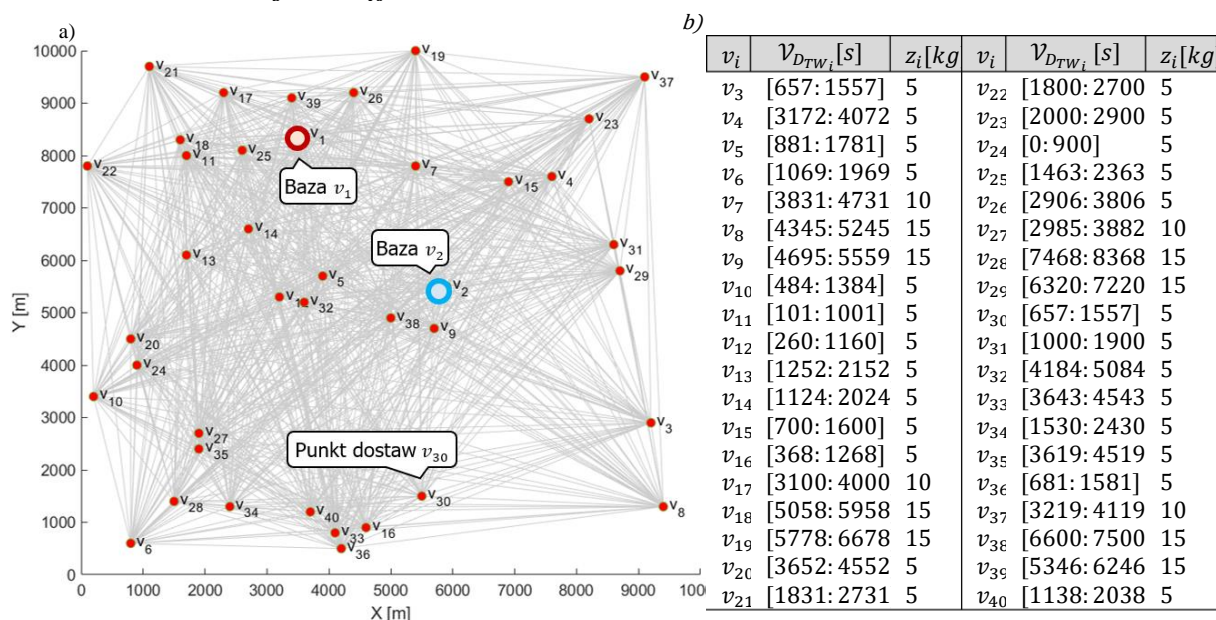
W odróżnieniu od planowania proaktywnego, planowanie reaktywne odbywa się w trakcie realizacji wcześniej wyznaczonego planu misji floty BSP. Zwykle czas na reakcję nie przekracza kilku minut. W związku z tym proces planowania proaktywnego powinien być realizowany w trybie online.



Rys. 3.1 Idea planowania proaktywno-reaktywnego (opracowanie własne)

W celu przybliżenia idei proponowanego podejścia do planowania proaktywno-reaktywnego rozważmy następujący przykład.

Dana jest sieć transportowa (Rys. 3.2) o powierzchni 100 km^2 składająca się z dwóch baz $\mathcal{V}_B = \{v_1, v_2\}$ oraz 38 punktów dostaw $\mathcal{V}_D = \{v_3, \dots, v_{40}\}$. Dla każdego z nich określono okna czasowe na realizację dostaw: $\mathcal{V}_{D_{TW_3}} \div \mathcal{V}_{D_{TW_{40}}}$.



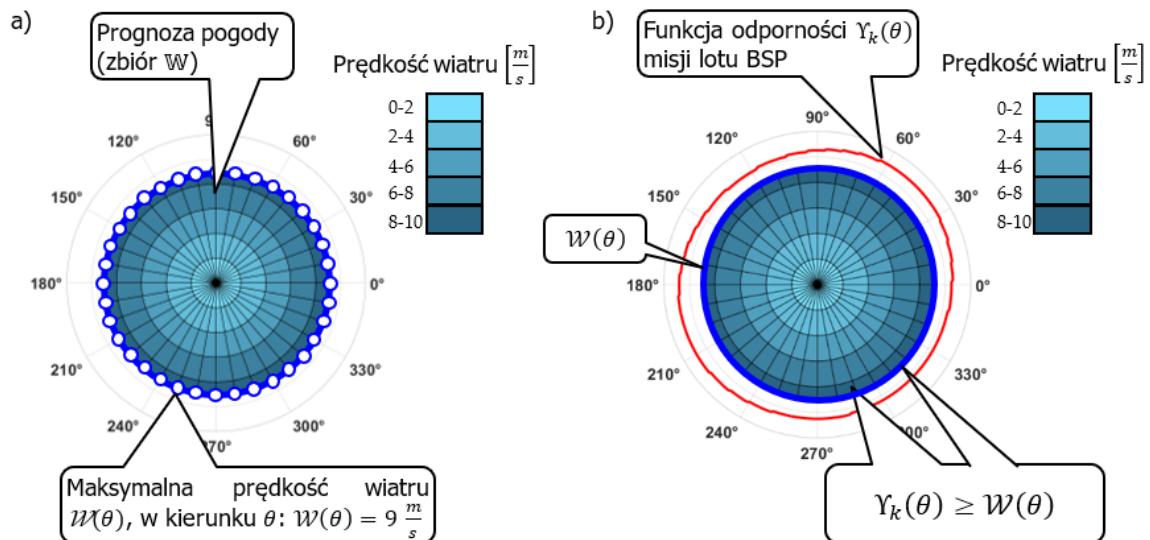
Rys. 3.2 Sieć transportowa a) oraz zdefiniowane zapotrzebowania na towar b) (opracowanie własne)

Transport towarów realizowany jest za pośrednictwem floty czterech jednakowych BSP: $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4\}$, gdzie: flota $U^1 = \{u_1, u_2\}$ realizuje dostawy z bazy v_1 , natomiast flota $U^2 = \{u_3, u_4\}$ realizuje dostawy z bazy v_2 . Parametry techniczne BSP przedstawiono w Tab. 3.1.

Tab. 3.1 Parametry techniczne BSP

Parametry techniczne BSP	Wartość	Jednostka
Ładowność Q	25	kg
Pojemność baterii CAP	7500	kJ
Prędkość przelotu v	20	$\frac{m}{s}$
Współczynnik oporu C_D	0.54	–
Powierzchnia czołowa A	1.2	m^2
Szerokość b	8.7	m

Zapotrzebowania punktów dostaw z_i przyjmują wartości przedstawione na Rys. 3.2b. Zakłada się, że w czasie realizacji misji panować będą warunki pogodowe zaprezentowane na Rys. 3.3a), który ilustruje (w układzie biegunowym) prognozowane wartości prędkości wiatru vw z kierunku $\theta \in \{0^\circ; 360^\circ\}$. Jak można zauważyć maksymalna prognozowana prędkość wiatru (funkcja $\mathcal{W}(\theta)$) nie przekracza $9 \frac{m}{s}$.



Rys. 3.3 Prognozowane warunki pogodowe a), przykład funkcji odporności misji b) (opracowanie własne)

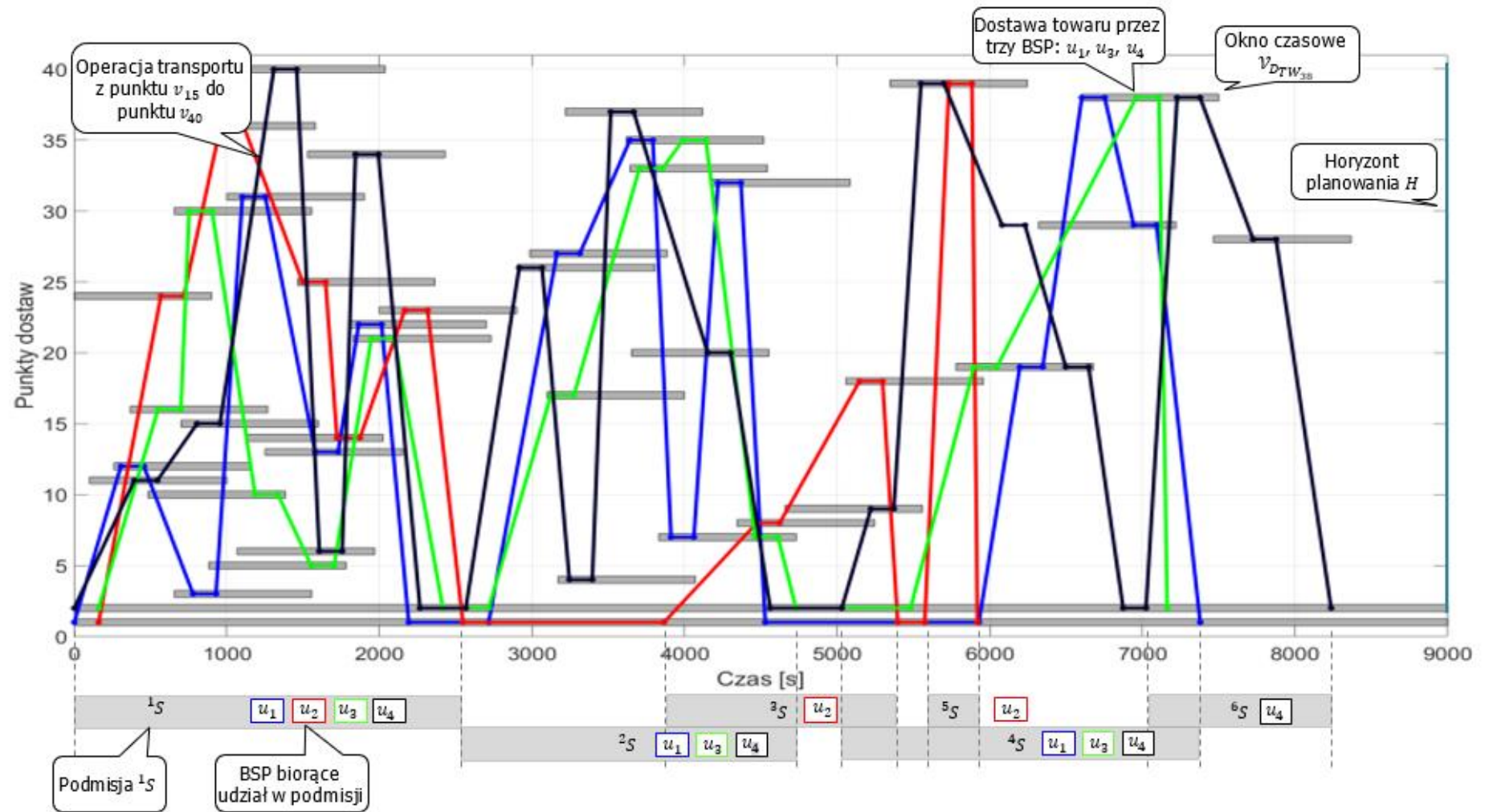
Przy tych założeniach poszukiwana jest misja S floty BSP gwarantująca terminowe dostawy (w zakładanym horyzoncie czasowym $H = 2.5h$) wymaganych ilości towaru.

Terminowość dostaw wymusza niewrażliwość (odporność) wyznaczanych planów misji na prognozowane warunki pogodowe. Warunki te określane są w postaci zbioru par (θ, vw) (patrz rys. 3.3a) $\mathbb{W} = \{(\theta, vw) | \theta \in \langle 0^\circ; 360^\circ \rangle, vw \in \langle 0, \mathcal{W}(\theta) \rangle\}$, gdzie $\mathcal{W}(\theta)$ jest funkcją, której wartości określają maksymalną prognozowaną prędkość wiatru vw dla kierunku θ . W celu oceny odporności planów misji S wprowadza się funkcję odporności $Y_k(\theta)$. Funkcja $Y_k(\theta)$ determinuje graniczne wartości prędkości wiatru (dla zadanego kierunku θ), które gwarantują realizowalność planu misji S w sieci G : $Y_k(\theta) = \max \Gamma_k(\theta)$, gdzie: $\Gamma_k(\theta)$ – zbiór wartości prędkości wiatru vw (dla kierunku θ), przy których nie dochodzi do wyczerpania baterii pojazdu u_k . Zakłada się, że plan misji S jest odporny na warunki pogodowe \mathbb{W} jeśli wartości funkcji $Y_k(\theta)$ dla każdego BSP ($u_k \in U$) i każdego kierunku wiatru θ jest większa od wartość funkcji $\mathcal{W}(\theta)$: $\forall u_k \in U \forall \theta \in \langle 0^\circ; 360^\circ \rangle Y_k(\theta) \geq \mathcal{W}(\theta)$.

Przykład funkcji odporności $Y_k(\theta)$ został zilustrowany na rys. 3.3b). Jak widać spełniony jest warunek $Y_k(\theta) \geq \mathcal{W}(\theta)$ gwarantujący odporność misji S na prognozowane warunki pogodowe.

Poszukiwanie planów misji S odpornych na zadane zmiany warunków pogodowych \mathbb{W} jest głównym celem planowania proaktywnego.

Przykład rozwiązania uzyskanego w wyniku planowania proaktywnego przedstawiono na Rys. 3.4. Wyznaczona misja składa się z 6 podmisji $S = ({}^1S, {}^2S, \dots, {}^6S)$. Podmisja lS obejmuje marszruty i harmonogram dostaw w zakresie pojedynczego kursu (start z bazy – dostawa – powrót do bazy) określonego zbioru BSP ${}^lU \subseteq U$.



Rys. 3.4 Plan proaktywny realizacji misji floty BSP dla sieci z Rys. 3.3 (opracowanie własne)

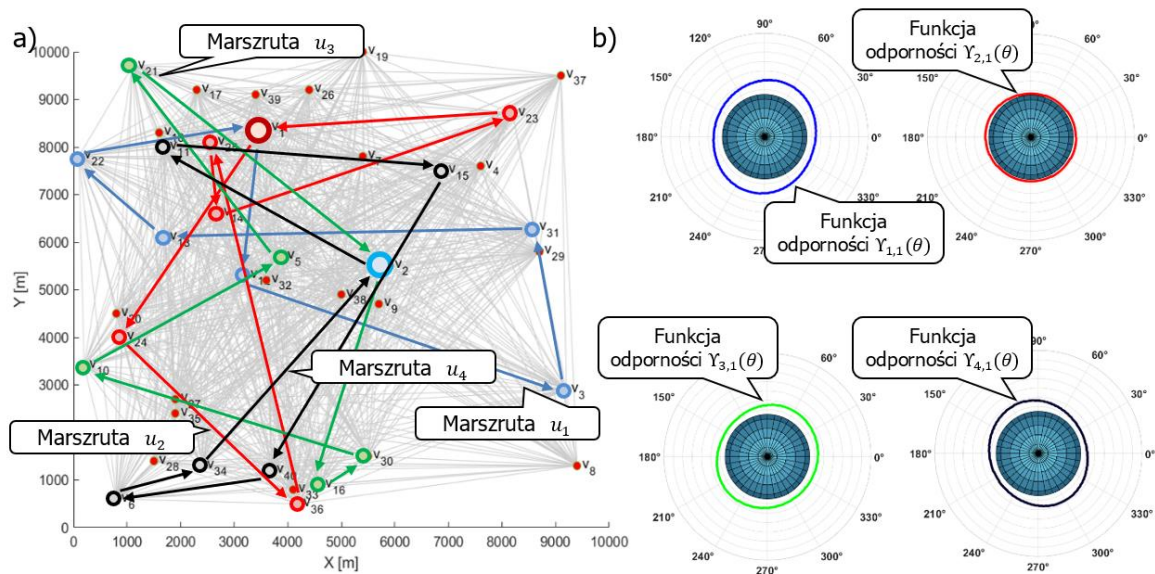
Jak łatwo zauważyć misja każdego z BSP kończy się przed ustalonym terminem 9000s. W tym horyzoncie wszystkie oczekiwane towary zostają dostarczone. Przykładowy przebieg podmisji 1S przedstawiono na Rys. 3.5a). Marszrutę poszczególnych pojazdów floty U zadane są poniższymi sekwencjami:

$$\begin{aligned} {}^1\pi_1 &= (v_1, v_{12}, v_3, v_{31}, v_{13}, v_{22}, v_1); & {}^1\pi_2 &= (v_1, v_{24}, v_{36}, v_{25}, v_{14}, v_{32}, v_1); \\ {}^1\pi_3 &= (v_2, v_{16}, v_{30}, v_{10}, v_5, v_{21}, v_2); & {}^1\pi_4 &= (v_2, v_{11}, v_{15}, v_{40}, v_6, v_{34}, v_2) \end{aligned}$$

Przykładowo pojazd u_1 (kolor niebieski na Rys. 3.5a) rozpoczyna swoją misję w bazie v_1 . Transportuje 25 kg dystrybuowanego towaru. Pierwszym punktem dostaw w marszrucie pojazdu u_1 jest punkt v_{12} , do którego przybywa w momencie $t = 306s$ i zostawia tam 5 kg towaru. Kontynuując swoją misję odwiedza kolejno punkty $v_3, v_{31}, v_{13}, v_{22}$ zostawiając tam odpowiednio 5, 5, 5, 5 kg oczekiwanego towaru, po czym wraca do bazy v_1 .

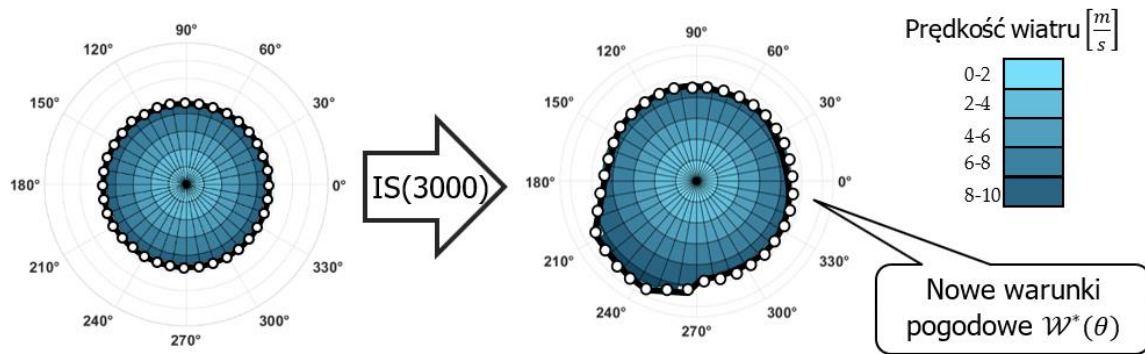
Na Rys. 3.5b) przedstawiono wykresy funkcji odporności misji dla każdego z BSP wchodzącego w skład floty U : $Y_1(\theta), Y_2(\theta), Y_3(\theta), Y_4(\theta)$.

Dla każdego z przypadków spełniony jest warunek $Y_k(\theta) \geq \mathcal{W}(\theta)$. Oznacza to, że wyznaczony plan misji S jest odporny na prognozowane zmiany warunków pogodowych \mathcal{W} . Tak więc, dopóki panujące warunki pogodowe nie przekroczą prognozowanych zakresów, wyznaczona misja S gwarantuje terminowe dostawy towarów do wszystkich punktów dostaw.



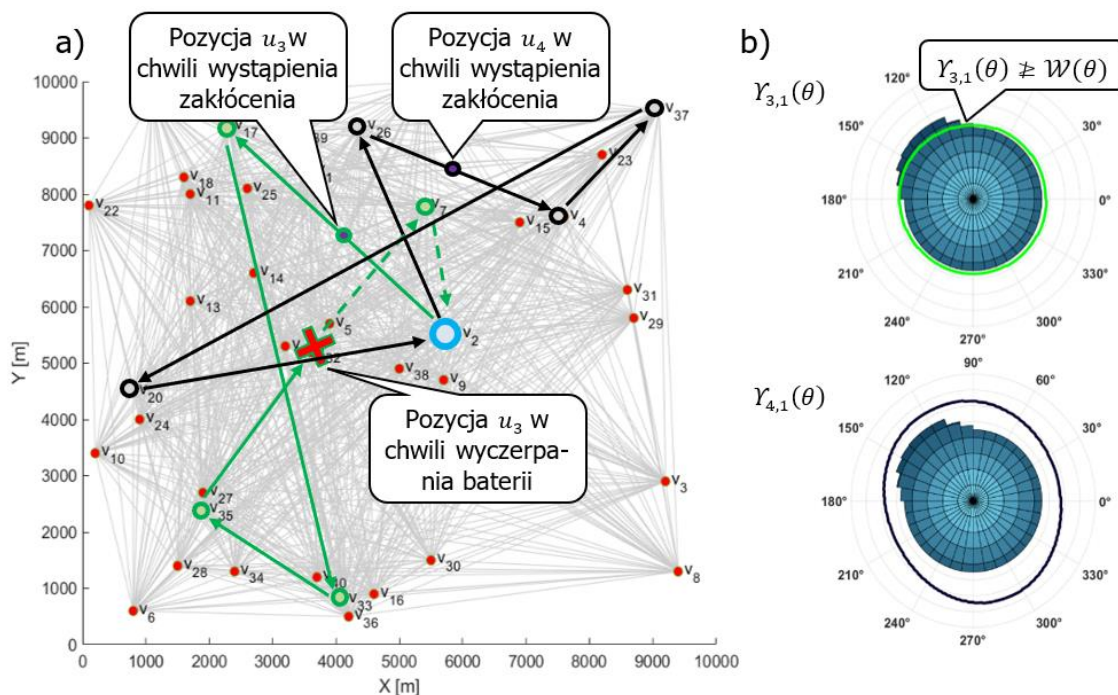
Rys. 3.5 Realizacja misji 1S a) oraz wykresy funkcji odporności dla floty $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4\}$ b) (opracowanie własne)

Rozważmy sytuację, w której w trakcie realizacji planu proaktywnego, w chwili $t^* = 3000s$ (w trakcie trwania misji 2S) następuje zmiana warunków pogodowych, z zakładanych $v_w = 9 \frac{m}{s}$ na $v_w = 11 \frac{m}{s}$ (w kierunku $\theta = 110^\circ - 130^\circ$) (Rys. 3.6).



Rys. 3.6 Zmiana warunków pogodowych (opracowanie własne)

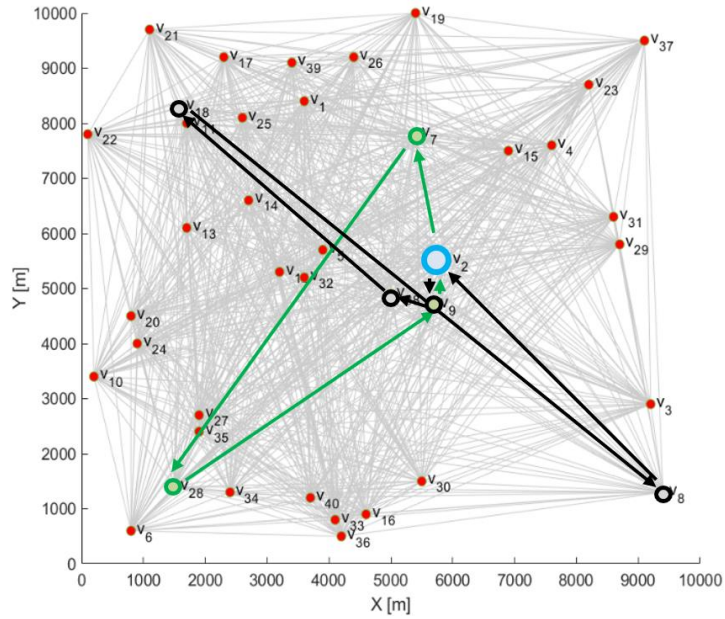
Zmiana warunków pogodowych sprawia, że misja lotu pojazdu u_3 przestaje być realizowalna ponieważ, w trakcie przelotu z punktu dostaw v_{35} do punktu v_7 dochodzi do przedwczesnego wyczerpania baterii pojazdu u_3 . Wartość funkcji odporności $Y_3(\theta)$ dla pojazdu u_3 (wyznaczonej proaktywnie – przy założeniu, że prędkość wiatru $w = 9 \frac{m}{s}$) nie spełnia założenia odporności misji lotu ($Y_3(\theta) \geq W(\theta)$). Sytuację tę przedstawiono na rys. 3.7.



Rys. 3.7 Misja 2S po zmianie warunków pogodowych a), wykresy funkcji odporności b)

W związku z nagłą zmianą (zakłóceniem $IS(t^*)$) warunków pogodowych należy wyznaczyć plan, który umożliwi realizację zadania w nowych warunkach. W praktyce reakcja na tego typu zakłócenie sprowadza się do odpowiedzi na pytanie: *Czy istnieje plan misji S , który gwarantuje terminowe dostawy wymaganej ilości towaru w sytuacji wystąpienia zakłócenia $IS(t^*)$?*

Odpowiedź poszukiwana jest w procesie planowania reaktywnego. Przykładowe rozwiązanie przedstawiono na Rys. 3.8.



Rys. 3.8 Plan reaktywny dla zakłócenia $IS(t^*)$ z Rys. 3.7

Reakcja na wystąpienie zakłócenia $IS(t^*)$ sprowadza się więc do korekty istniejącego, proaktywnego planu misji lotów dla floty BSP.

W ogólnym przypadku zakłócenia obejmują przypadki: zmiany struktury sieci, terminów zamówień, itp. W celu formalnego zdefiniowania terminu zakłócenie $IS(t^*)$, wprowadzono pojęcie stanu misji S . Stan misji S w chwili t definiuje się następująco:

$$IS(t) = (M(t), \mathcal{W}^*(\theta, t), {}^*G(t), Z^*(t)) \quad (8)$$

gdzie:

- $M(t)$ alokacja BSP w chwili t : $M(t) = (v_{a_1}, \dots, v_{a_k}, \dots, v_{a_m})$, gdzie: $a_k \in \{1, \dots, n\}$, v_{a_k} wierzchołek obsługiwany przez pojazd u_k . W chwili t , pojazd u_k może obsługiwać odbiorcę lub zmierzać w jego kierunku,
- $\mathcal{W}^*(\theta, t)$ prognozowane warunki pogodowe w chwili t ,
- ${}^*G(t)$ sieć transportowa tj. liczba oraz lokalizacja punktów dostaw/baz w chwili t ,
- $Z^*(t)$ sekwencja zapotrzebowania na towar w chwili t .

Biorąc pod uwagę powyższą definicję, stan misji nazywany jest **zakłóceniem** jeśli spełniony jest następujący warunek:

$$[\mathcal{W}^*(\theta, t^*) \neq \mathcal{W}(\theta)] \vee [{}^*G(t^*) \neq G] \vee [Z^*(t^*) \neq Z] \quad (9)$$

gdzie: $\mathcal{W}(\theta)$, G , Z – oznaczają odpowiednio warunki pogodowe, sieć transportową, sekwencję zapotrzebowania, określone przed rozpoczęciem misji (etap planowania proaktywnego).

Przykład ten pokazuje, że w procesie planowania proaktywno-reaktywnego wymagane jest jednoczesne uwzględnienie wpływu wielu czynników obejmujących m.in.: terminowość dostaw, odporność na warunki pogodowe, ilość dostarczanych towarów, brak kolizji itp.

W kolejnym rozdziale przedstawiono model (wyrażony w formalizmie problemów spełniania ograniczeń), który zawiera relacje niezbędne do wyznaczania odpornych planów w zakresie tak proaktywnego, jak i reaktywnego planowania floty BSP.

3.2 Problem spełniania ograniczeń

Matematyczna reprezentacja problemu DRVRP mająca na celu wsparcie procesu planowania proaktywno-reaktywnego misji lotów BSP wykorzystuje następujące parametry, zmienne, zbiory oraz ograniczenia:

Parametry	
lG	graf sieci transportowej dla podmisji lS : ${}^lG = (\mathcal{V}, E)$, gdzie: $\mathcal{V} = \{v_1, \dots, v_n\}$ jest zbiorem wierzchołków, $E \subseteq \{(v_i, v_j) (v_i, v_j) \in \mathcal{V}^2, i \neq j\}$ jest zbiorem łuków
z_i	zapotrzebowanie na towar w węźle v_i , $z_i = 0$ dla $v_i \in \mathcal{V}_B$
$d_{j,i}$	odległość między węzłami v_j, v_i
\mathcal{V}_{DTW_i}	okno czasowe dostaw dla węzła v_i , $\mathcal{V}_{DTW_i} = [\mathcal{V}_{DTW_i}^{down}; \mathcal{V}_{DTW_i}^{up}]$
$t_{j,i}$	czas przelotu między węzłami v_j, v_i
w	czas spędzony przy startowaniu i lądowaniu pojazdu
Q	ładowność
$IS(t)$	stan misji lotu S w chwili t
H	horyzont planowania
$Y_{k,l}(\theta)$	wartość funkcji odporności misji lotu u_k , dla podmisji lS , dla zadanego kąta θ
$\mathcal{W}(\theta)$	maksymalna prognozowana prędkość wiatru, dla zadanego kąta θ
$va_{j,i}$	prędkość u_k względem powietrza dla lotu między węzłami v_j, v_i
$\varphi_{j,i}$	kąt kursu dla lotu między węzłami v_j, v_i
\mathcal{V}_D	zbiór wierzchołków reprezentujących punkty dostaw
\mathcal{U}^i	zbiór BSP przydzielonych do bazy $v_i \in \mathcal{V}_B$
${}^lS^k$	moment startu u_k dla podmisji lS przed wystąpieniem zakłócenia $IS(t^*)$
${}^ly_i^k$	moment przybycia u_k do węzła v_i przed wystąpieniem zakłócenia $IS(t^*)$
lU	podzbiór floty ${}^lU \subseteq U$ realizujących podmisję lS
m	rozmiar floty U
A	powierzchnia czołowa u_k
C_D	współczynnik oporu
ts	przedział czasowy, w którym u_k mogą startować z bazy
ep	ciężar własny u_k
D	gęstość powietrza
g	przyciąganie ziemskie
b	szerokość u_k
CAP	pojemność energetyczna u_k
$vg_{j,i}$	prędkość u_k względem powierzchni ziemi dla lotu między węzłami v_j, v_i
$\vartheta_{j,i}$	kąt wektora $\overrightarrow{vg_{j,i}}$
\mathcal{V}_B	zbiór wierzchołków reprezentujących bazy
${}^lx_{j,i}^k$	zmienna binarna opisująca przelot (1) brak przelotu (0) między węzłami v_j, v_i przed wystąpieniem zakłócenia $IS(t^*)$
${}^l\lambda_i^k$	waga towaru dostarczonego do węzła v_i przez u_k przed wystąpieniem zakłócenia $IS(t^*)$
l	numer podmisji
L	wartość określająca liczbę podmisji lS w misji lotu floty BSP S
pn_i	współrzędne geograficzne punktu dostaw v_i $pn_i = (\phi_i, \mu_i)$

ϕ_i	długość geograficzna pozycji punktu dostaw v_i
μ_i	szerokość geograficzna pozycji punktu dostaw v_i
Zmienne decyzyjne	
$\overline{l_{x_{j,l}^k}}$	zmienna binarna opisująca przelot (1) brak przelotu (0) między węzłami v_j, v_i , który miał miejsce po wystąpieniu zakłócenia $IS(t^*)$ w trakcie realizacji podmisji lS
	$\overline{l_{x_{j,l}^k}} = \begin{cases} 1 & \text{gdy } u_k \text{ przemieszczał się między } v_j, v_i \\ 0 & \end{cases}$
$\overline{l_{y_l^k}}$	moment przybycia u_k do węzła v_i po wystąpieniu zakłócenia $IS(t^*)$ w trakcie podmisji lS
$\overline{l_{\lambda_l^k}}$	waga towaru dostarczonego do węzła v_i przez BSP u_k po wystąpieniu zakłócenia $IS(t^*)$ w trakcie realizacji podmisji lS
$\overline{l_{f_{j,l}^k}}$	waga towaru transportowanego przez u_k między węzłami v_j, v_i po wystąpieniu zakłócenia $IS(t^*)$ w trakcie realizacji podmisji lS
$\overline{l_{p_{j,l}^k}}$	zużycie energii, na jednostkę czasu u_k w trakcie przelotu między węzłami v_j, v_i po wystąpieniu zakłócenia $IS(t^*)$ w trakcie realizacji podmisji lS
$\overline{l_{bat^k}}$	całkowite zużycie energii u_k po wystąpieniu zakłócenia $IS(t^*)$ w trakcie realizacji podmisji lS
$\overline{l_{s^k}}$	moment startu u_k po wystąpieniu zakłócenia $IS(t^*)$ w trakcie realizacji podmisji lS
$\overline{l_{\lambda_{p_i}}}$	łączna masa towaru dostarczonego do węzła v_i po wystąpieniu zakłócenia $IS(t^*)$ w trakcie realizacji podmisji lS
$\overline{l_{\pi_k}}$	Marszruta u_k po wystąpieniu zakłócenia $IS(t^*)$ w trakcie realizacji podmisji lS , $\overline{l_{\pi_k}} = (v_{k_1}, \dots, v_{k_l}, v_{ik_{l+1}}, v_{k_{\mu}}), k_l \in \{1, \dots, n\}, (v_{k_l}, v_{ik_{l+1}}) \in E$
Zbiory	
$\overline{l_Y}$	sekwencja harmonogramów $\overline{l_{y_l^k}}$
$\overline{l_{\Lambda}}$	sekwencja transportowanych towarów $\overline{l_{\lambda_l^k}}$
$\overline{l_{\Pi}}$	zbiór marszrut $\overline{l_{\pi_k}}$
$\overline{l_S}$	plan podmisji po wystąpieniu zakłócenia $IS(t^*)$: $\overline{l_S} = (\overline{l_U}, \overline{l_{\Pi}}, \overline{l_Y}, \overline{l_{\Lambda}})$, prze-harmonogramowany plan misji ${}^*S = (\overline{l_S}, \dots, \overline{l_S}, \dots, \overline{l_S})$

Relacje opisujące związki między ww. elementami składają się na ograniczenia:

- I. **misji lotu:** Są to ograniczenia dotyczące relacji między zmiennymi opisującymi moment czasu startu/czasu rozpoczęcia misji lotu floty BSP oraz kolejności zadań:

$$\overline{l_{s^k}} \geq 0; k = 1 \dots m, l = 1 \dots L \quad (10)$$

$$({}^l s^k \leq t^*) \Rightarrow (\overline{l_{s^k}} = {}^l s^k); k = 1 \dots m, l = 1 \dots L, \quad (11)$$

$$(|\overline{l_{s^k}} - \overline{l_{s^q}}| \geq ts); \forall u_k, \forall u_q \in \mathcal{U}^i, \forall v_i \in \mathcal{V}_B, l = 1 \dots L \quad (12)$$

$$({}^l y_j^k \leq t^*) \Rightarrow (\overline{l_{x_{i,j}^k}} = {}^l x_{i,j}^k); j = 1 \dots n; i = 2 \dots n; k = 1 \dots m, l = 1 \dots L, \quad (13)$$

$$({}^l y_j^k \leq t^*) \Rightarrow (\overline{l_{y_j^k}} = {}^l y_j^k); j = 1 \dots n; i = 2 \dots n; k = 1 \dots m, l = 1 \dots L, \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^n \overline{l_{x_{i,j}^k}} = 1; k = 1 \dots m, l = 1 \dots L, \quad (15)$$

$$(\overline{l_{x_{i,j}^k}} = 1) \Rightarrow (\overline{l_{y_j^k}} = \overline{l_{s^k}} + t_{i,j}); \forall v_j \in \mathcal{V}_D; \forall v_i \in \mathcal{V}_B, U_k \in \mathcal{U}^i, l = 1 \dots L \quad (16)$$

$$(\overline{l_{y_l^k}} \neq 0 \wedge \overline{l_{y_l^q}} \neq 0) \Rightarrow (|\overline{l_{y_l^k}} - \overline{l_{y_l^q}}| \geq w); k, q = 1 \dots m; k \neq q; \forall v_j \in \quad (17)$$

$$(\overline{x_{i,j}^k} = 1) \Rightarrow (\overline{y_j^k} = \overline{y_i^k} + t_{i,j} + w); j = 1 \dots n; i = 2 \dots n; k = 1 \dots m, \quad (18)$$

$$(\overline{x_{i,j}^k} = 1) \Rightarrow (\overline{y_j^k} \geq \mathcal{V}_{D_{TW_i}^{down}}); \forall v_i \in \mathcal{V}, \forall v_j \in \mathcal{V}_D, \quad (19)$$

$$(\overline{x_{i,j}^k} = 1) \Rightarrow (\overline{y_j^k} \leq \mathcal{V}_{D_{TW_i}^{up}}); \forall v_i \in \mathcal{V}, \forall v_j \in \mathcal{V}_D, \quad (20)$$

$$\overline{y_i^k} \geq 0; i = 1 \dots n; k = 1 \dots m, \quad (21)$$

$$\sum_{j=1}^n \overline{x_{i,j}^k} = \sum_{j=1}^n \overline{x_{j,i}^k}; i = 1 \dots n; k = 1 \dots m, \quad (22)$$

$$\overline{y_i^k} \leq H \times \sum_{j=1}^n \overline{x_{i,j}^k}, i = 1 \dots n; k = 1 \dots m, \quad (23)$$

$$\overline{x_{i,l}^k} = 0; i = 1 \dots n; k = 1 \dots m \quad (24)$$

II. **dostawy towarów.** Są to ograniczenia dotyczące zmiennych opisujących operacje dostarczania zamówionych towarów:

$$(\overline{y_j^k} \leq t^*) \Rightarrow (\overline{\lambda_j^k} = \lambda_j^k); j = 1 \dots n; k = 1 \dots m; l = 1 \dots L, \quad (25)$$

$$\overline{\lambda_i^k} \geq 0; i = 1 \dots n; k = 1 \dots m; l = 1 \dots L, \quad (26)$$

$$\overline{\lambda_i^k} \leq Q \times \sum_{j=1}^n x_{i,j}^k; i = 1 \dots n; k = 1 \dots m, l = 1 \dots L, \quad (27)$$

$$\sum_{i=1}^n \overline{\lambda_i^k} \leq Q; k = 1 \dots m; l = 1 \dots L, \quad (28)$$

$$(\overline{x_{i,j}^k} = 1) \Rightarrow (\overline{\lambda_i^k} \geq 1); k = 1 \dots m; \forall v_i \in \mathcal{V}; \forall v_j \in \mathcal{V}_D \quad (29)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K \overline{\lambda_i^k} = z_i; \forall v_i \in \mathcal{V}_D, \quad (30)$$

$$\sum_{i=1}^n \overline{\lambda_i^k} = \overline{\lambda_S^k}; k = 1 \dots m; l = 1 \dots L, \quad (31)$$

$$(\overline{x_{i,j}^k} = 1) \Rightarrow (\overline{f \lambda_j^k} = \overline{\lambda_S^k}); j = 1 \dots n; k = 1 \dots m, l = 1 \dots L, \quad (32)$$

$$(\overline{x_{i,j}^k} = 1) \Rightarrow (\overline{f \lambda_j^k} = f \lambda_i^k - \overline{\lambda_i^k}); i, j = 1 \dots n; k = 1 \dots m, l = 1 \dots L, \quad (33)$$

$$(\overline{x_{i,j}^k} = 1) \Rightarrow (\overline{f_{1,j}^k} = \overline{\lambda_S^k}); j = 1 \dots n; k = 1 \dots m, l = 1 \dots L, \quad (34)$$

$$(\overline{x_{i,j}^k} = 1) \Rightarrow (\overline{f_{i,j}^k} = \overline{f \lambda_j^k}); i, j = 1 \dots n; k = 1 \dots m, l = 1 \dots L, \quad (35)$$

gdzie: zmienne $\overline{\lambda_S^k}$ oraz $\overline{f \lambda_j^k}$ są zmiennymi pomocniczymi do wyliczenia aktualnego ciężaru transportowanego towaru.

III. **zużycia energii.** W celu zapewnienia realizowalności misji lS , tj. jej odporności na zmianę warunków pogodowych $\mathcal{W}(\theta)$, koniecznym jest aby zużycie energii wymagane do wykonania misji nie przekraczało pojemności energetycznej (CAP) pojazdu:

$$Y_{k,l}(\theta) \geq \mathcal{W}(\theta); \forall \theta \in [0^\circ, 360^\circ), k = 1 \dots m, l = 1 \dots L \quad (36)$$

$$Y_{k,l}(\theta) = \max \Gamma_{k,l}(\theta); \forall \theta \in [0^\circ, 360^\circ), k = 1 \dots m, l = 1 \dots L \quad (37)$$

$$\Gamma_{k,l}(\theta) = \{vw \mid vw \in R_+^0 \wedge \forall k \in \{1 \dots K\} \overline{bat^k}(\theta, vw) \leq CAP\}, \quad (38)$$

$$\overline{bat^k}(\theta, vw) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \overline{x_{i,j}^k} \times t_{i,j} \times {}^lP_{i,j}^k(\theta, vw) \quad (39)$$

$${}^l p_{i,j}^k(\theta, vw) = \frac{1}{2} C_D \times A \times D \times ({}^l v a_{i,j}(\theta, vw))^3 + \frac{\left((ep + \overline{l f_{i,j}^k}) \times g \right)^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{2 \times D \times A}} \quad (40)$$

gdzie: ${}^l v a_{i,j}(\theta, vw)$ oraz $t_{i,j}$ zależą od przyjętej strategii dostarczania towarów. W przypadku, w którym prędkość $v g_{i,j}$ pojazdu u_k względem powierzchni ziemi dla lotu między węzłami jest wartością stałą, prędkość względem powietrza ${}^l v a_{i,j}(\theta, vw)$ dla lotu między węzłami v_j, v_i wyznaczana jest z następujących zależności:

$${}^l v a_{i,j}(\theta, vw) = \sqrt{(v g_{i,j} \times \cos \vartheta_{i,j} - vw \times \cos \theta)^2 + (v g_{i,j} \times \sin \vartheta_{i,j} - vw \times \sin \theta)^2} \quad (41)$$

$$t_{i,j} = d_{i,j} / v g_{i,j} \quad (42)$$

Wartość kąta wektora $\overrightarrow{v g_{j,l}}$ - $\vartheta_{i,j}$ oraz odległości między punktami dostaw $d_{i,j}$ są wyznaczone na podstawie współrzędnych geograficznych $p n_i = (\phi_i, \mu_i)$:

$$d_{i,j} = R \times \sqrt{(\phi_j - \phi_i)^2 + \left(\cos \left(\frac{\phi_i + \phi_j}{2} \right) \times (\mu_j - \mu_i) \right)^2} \quad (43)$$

$$\vartheta_{i,j} = \arctg \left(\frac{\mu_j - \mu_i}{\phi_i - \phi_j} \right) \quad (44)$$

gdzie: R oznacza promień Ziemi ($R = 6371.009 \text{ km}$)

Ograniczenia dotyczące misji lotu floty BSP (10)-(24) opisują relacje między zmiennymi $\overline{l x_{i,j}^k}$ (marszruta), ${}^l y_j^k$ oraz ${}^l s^k$ (harmonogram) dla danej misji ${}^l S$. Zapewniają one m.in., że:

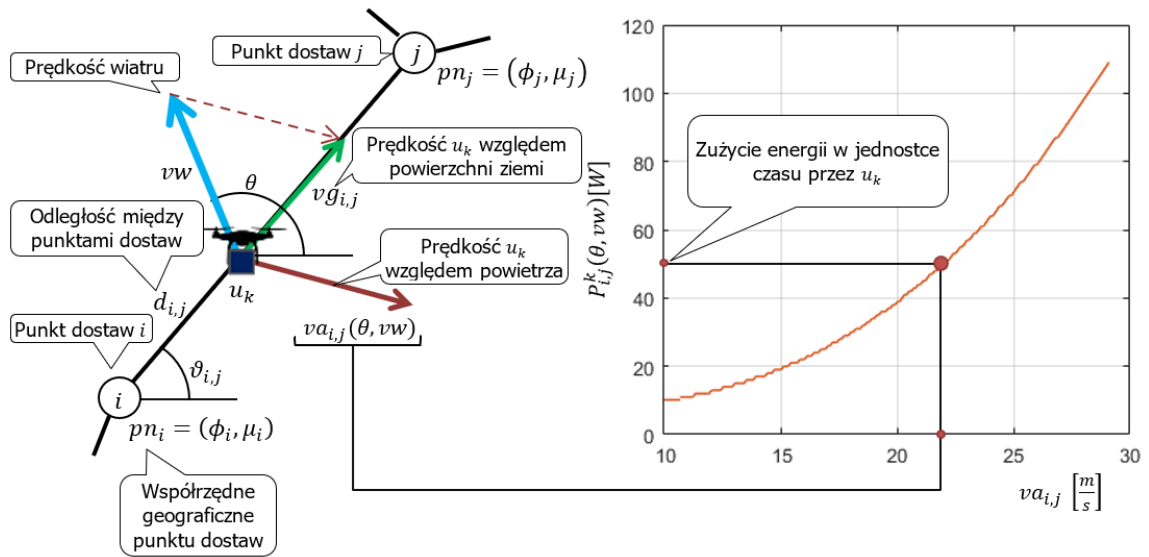
- nie jest możliwy start więcej niż jednego BSP z bazy w tej samej chwili (12),
- nie jest możliwe, aby w tej samej chwili punkt dostaw był jednocześnie zajęty przez kilka BSP (17),
- dostawa towarów do węzłów może odbywać się tylko w określonym, dla danego węzła, „twardym” oknie czasowym (19-20),
- misja kończy się przed upływem założonego horyzontu planowania H (23).

Grupa ograniczeń dostaw towarów (25)-(35) przedstawia relacje między zmiennymi $\overline{l x_{i,j}^k}$ (marszruta) oraz ${}^l \lambda_i^k$ (waga towaru dostarczanego do węzła), dzięki którym:

- BSP nie są przeciążone (28),
- do punktu dostaw trafia odpowiednia ilość towaru, zgodna z jego zapotrzebowaniem (30),
- z każdą wizytą w węzle $v_i \notin \mathcal{V}_B$, masa całkowita BSP (${}^l f_{i,j}^k$) jest aktualizowana (31)-(35).

Ograniczenia zużycia energii (36)-(41) określają wartości funkcji odporności $Y_{k,l}(\theta)$ dla k BSP oraz zapewniają, że wartość funkcji odporności, dla zadanego kąta wiatru θ będzie większa niż wartość funkcji $\mathcal{W}(\theta)$ określającej prognozowane warunki pogodowe.

Wartość funkcji odporności $Y_k(\theta)$ zależy od ilości energii zużywanej przez BSP, która z kolei zależy nieliniowo od wartości prędkości $v a_{i,j}$ - patrz Rys. 3.9. Oznacza to, że niektóre ograniczenia, np. (35)-(36), w przyjętym modelu mają charakter nieliniowy, co implikuje konieczność implementacji środowisk programowania deklaratywnego (w szczególności środowiska programowania z ograniczeniami).



Rys. 3.9 Graficzna ilustracja nieliniowej zależności $P^k_{i,j}(\theta, vw)$ od $va_{i,j}(\theta, vw)$

Ze względu na fakt, iż ponowne planowanie misji dostaw S jest wymuszone poprzez zakłócenia $IS(t)$, nowy zestaw podmisyj: $\bar{1}S, \dots, \bar{l}S, \dots, \bar{L}S$, gwarantujących terminowe dostawy jest określony jako rozwiązanie następującego problemu spełniania ograniczeń CS (45):

$$CS(^lU, S, IS(t^*)) = ((\mathcal{V}, \mathcal{D}), \mathcal{C}(^lU, S, IS(t^*))) \quad (45)$$

gdzie:

- $\hat{\mathcal{V}}$ $\hat{\mathcal{V}} = \{\bar{l}\bar{\Pi}, \bar{l}\bar{Y}, \bar{l}\bar{\Lambda} | l = 1 \dots L\}$ zbiór zmiennych decyzyjnych: $\bar{l}\bar{\Pi}$ – zestaw marszrut określających harmonogram $\bar{l}\bar{Y}$, $\bar{l}\bar{Y}$ – harmonogram floty lU gwarantujący terminowe wykonanie misji w przypadku zakłócenia $IS(t^*)$ oraz $\bar{l}\bar{\Lambda}$ – sekwencja ilości dostarczanych towarów przez flotę lU ;
- \mathcal{D} skończony zbiór zmiennych decyzyjnych $\bar{l}x_{i,j}^k \in \{0,1\}$, $\bar{l}y_i^k \in \mathbb{N}$, $\bar{l}\lambda_i^k \in \mathbb{N}$;
- $\hat{\mathcal{C}}$ rodzina zbiorów ograniczeń uwzględniająca podzbiory: marszrut $\bar{l}\bar{\Pi}$, harmonogramów $\bar{l}\bar{Y}$ oraz zakłóceń $IS(t^*)$ uwzględnianych przy planowaniu misji lotu floty BSP (10) – (42).

Rozwiązaniem dopuszczalnym problemu CS (reprezentującym problem DRVRP) jest zbiór wartości zmiennych decyzyjnych-spełniających ograniczenia (10) – (42). W szczególności rozwiązaniem takim jest więc misja S , która gwarantuje:

- terminowe dostawy do punktów dostaw,
- odporność na zadane warunki pogodowe,
- zużycie energii BSP poniżej 100%.

Zaproponowanym problem spełniania ograniczeń CS (45) można łatwo rozszerzyć do postaci optymalizacyjnej COP (Constraints Optimization Problem):

$$COP(^lU, S, IS(t^*)) = ((\mathcal{V}, \mathcal{D}), \mathcal{C}(^lU, S, IS(t^*)), f_o) \quad (46)$$

gdzie $f_o(^lS)$ oznacza funkcję celu maksymalizacja poziom satysfakcji klienta:

$$f_o({}^lS) = \sum_{i=1}^n (vp_i \times {}^l\lambda p_i) \quad (47)$$

gdzie:

vp_i zadany priorytet punktu dostaw v_i ,
 ${}^l\lambda p_i$ łączny ciężar towaru dostarczonego do węzła v_i w trakcie realizacji podmisji lS .

W tak zdefiniowanej wersji nie wymaga się by towar był dostarczony do wszystkich punktów dostaw. Poszukiwana jest misja lS , która w zadanych warunkach pogodowych zagwarantuje największy poziom satysfakcji $f_o({}^lS)$.

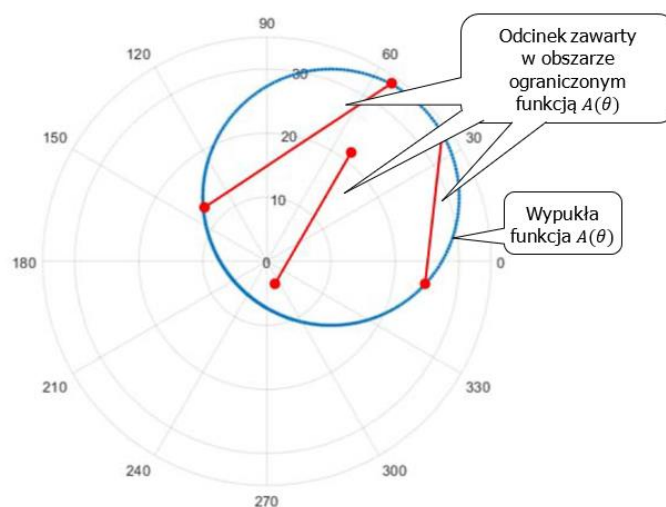
Opracowany model pozwala na przedstawienie, zaproponowanej w rozdziale 5, metody proaktywno-reaktywnego planowania misji BSP.

3.3 Relaksacja ograniczeń

W poprzednim rozdziale przedstawiono problem CS (45), którego rozwiązanie umożliwia wyznaczanie misji S odpornej na zakłócenie $IS(t^*)$ spowodowane zmianą warunków pogodowych określonych przez funkcję $\mathcal{W}(\theta)$. Wyznaczenie rozwiązania dla tak sformułowanego problemu jest bardzo czasochłonne, co generalnie wynika jego *NP – trudnego* charakteru. Szczególnie istotnym czynnikiem wpływającym na czas obliczeń jest konieczność spełnienia nierówności $Y_{k,l}(\theta) \geq \mathcal{W}(\theta)$ (36) dla każdego kierunku wiatru $\theta \in (0^\circ, 360^\circ)$. Przyjęto, że uproszczenie tego ograniczenia prowadzące się do pewnej relaksacji umożliwiającej zmniejszenie liczby ograniczeń mogłoby w znaczący sposób wpłynąć na czas wyznaczania rozwiązania.

3.3.1 Odporność na zakłócenia

Zaproponowana relaksacja zakłada, że $Y_{k,l}(\theta)$, przedstawiana w polarnym układzie współrzędnych, jest funkcją wypukłą. Warunki gwarantujące wypukłość tej funkcji wynikają z faktu, że jeśli każdy odcinek z końcami należącymi do obszaru ograniczonego funkcją $A(\theta)$ jest zawarty w tym obszarze (patrz Rys. 3.10), to funkcja $A(\theta)$ jest wypukła w biegunowym układzie współrzędnych.



Rys. 3.10 Przykład funkcji wypukłej w polarnym układzie współrzędnych - opracowanie własne

Własność 1. Funkcja $Y_{k,l}(\theta)$ jest funkcją wypukłą, w polarnym układzie współrzędnych, jeśli spełnione są poniższe warunki:

$$R > RG \quad (48)$$

gdzie:

$$R = \left(\frac{\frac{CAP_{i,j} - \frac{(W \times g)^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{2 \times D \times A}}}{t_{i,j}}}{0.5 \times C_D \times A \times D} \right)^{\frac{2}{3}} - v g_{i,j}^2 \quad (49)$$

$$RG = \frac{3}{8} \left((v g_{i,j} \times \sin \vartheta_{i,j})^2 \times (4 + 2\sqrt{3}) + (v g_{i,j} \times \cos \vartheta_{i,j})^2 \times (4 - 2\sqrt{3}) - 4 \times (v g_{i,j} \times \cos \vartheta_{i,j}) \times (v g_{i,j} \times \sin \vartheta_{i,j}) \right) \quad (50)$$

Dowód: Dowód sprowadza się do wyznaczenia jawnej postaci funkcji $Y_{k,l}(\theta)$, a następnie do wykazania, że jej składowe są funkcjami wypukłymi.

1. **Funkcja $Y_{k,l}(\theta)$.** $Y_{k,l}(\theta)$ jest definiowana jako funkcja, której wartości określają prędkość wiatru vw (dla zadanego kierunku wiatru θ) dla której podmisja lS przestaje być realizowalna (dochodzi do wyczerpania baterii pojazdu u_k). Można więc przyjąć, że wartości funkcji $Y_{k,l}(\theta)$, są rozwiązaniem następującego równania z niewiadomą vw :

$$CAP = {}^lbat^k(\theta, vw) \quad (51)$$

gdzie CAP określa pojemność energii pojazdu u_k , a ${}^lbat^k(\theta, vw)$ całkowite zużycie energii przez pojazd u_k (w czasie realizacji podmisji lS - marszruta ${}^l\pi_k$):

$${}^lbat^k(\theta, vw) = \sum_{(v_i, v_j) \in {}^l\pi_k} t_{i,j} \times {}^lP_{i,j}^k(\theta, vw) \quad (52)$$

gdzie:

$t_{i,j}$ czas przelotu między węzłami i, j : $t_{i,j} = \frac{d_{i,j}}{v g_{i,j}}$
 ${}^lP_{i,j}^k(\theta, vw)$ zużycie energii pojazdu u_k , na jednostkę czasu, podczas przelotu między węzłami i, j (w zadanej podmisji lS) przy panujących warunkach pogodowych (θ, vw) .

$${}^lP_{i,j}^k(\theta, vw) = \frac{1}{2} C_D \times A \times D \times (v a_{i,j}(\theta, vw))^3 + \frac{\left((ep + {}^l f_{i,j}^k) \times g \right)^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{2 \times D \times A}} \quad (53)$$

Przyjmując, że $AD = \frac{1}{2} C_D \times A \times D$ oraz $WA = \frac{(W \times g)^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{2DA}}$ otrzymujemy:

$${}^lP_{i,j}^k(\theta, vw) = AD \times (v a_{i,j}(\theta, vw))^3 + WA \quad (54)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} & {}^lva_{i,j}(\theta, vw) \\ &= \sqrt{(vg_{i,j} \times \cos\vartheta_{i,j} - vw \times \cos\theta)^2 + (vg_{i,j} \times \sin\vartheta_{i,j} - vw \times \sin\theta)^2} \end{aligned} \quad (55)$$

Równanie (53) można zatem przedstawić jako:

$$CAP = \sum_{(i,j) \in \pi_k} t_{i,j} \times {}^lP_{i,j}^k(\theta, vw) \quad (56)$$

$$\sum_{(v_i, v_j) \in {}^l\pi_k} CAP_{i,j} = \sum_{(v_i, v_j) \in {}^l\pi_k} t_{i,j} \times {}^lP_{i,j}^k(\theta, vw) \quad (57)$$

gdzie:

$CAP_{i,j}$ maksymalna ilość energii jaka może zostać zużyta przez u_k w trakcie przelotu prze korytarz powietrzny łączący węzeł v_i z węzłem v_j .

Równanie (57) można zatem zapisać w uproszczonej formie:

$$CAP_{i,j} = t_{i,j} \times {}^lP_{i,j}^k(\theta, vw) \quad (58)$$

$$CT = {}^lP_{i,j}^k(\theta, vw) \quad (59)$$

gdzie: $CT = \frac{CAP_{i,j}}{t_{i,j}}$.

Wykorzystując zależność (54) otrzymujemy:

$$CT = AD \times ({}^lva_{i,j}(\theta, vw))^3 + WA \quad (60)$$

$$CW = {}^lva_{i,j}(\theta, vw) \quad (61)$$

gdzie: $CW = \sqrt[3]{\frac{CT-WA}{AD}}$.

Wykorzystując dalej zależność (41) otrzymujemy:

$$CW = \sqrt{(vg_{i,j} \times \cos\vartheta_{i,j} - vw \times \cos\theta)^2 + (vg_{i,j} \times \sin\vartheta_{i,j} - vw \times \sin\theta)^2} \quad (62)$$

$$CW^2 = (vg_{i,j} \times \cos\vartheta_{i,j} - vw \times \cos\theta)^2 + (vg_{i,j} \times \sin\vartheta_{i,j} - vw \times \sin\theta)^2 \quad (63)$$

dokonyując przekształceń: $VG = vg_{i,j} \times \cos\vartheta_{i,j}$, $VS = vg_{i,j} \times \sin\vartheta_{i,j}$:

$$CW^2 = (VG - vw \times \cos\theta)^2 + (VS - vw \times \sin\theta)^2 \quad (64)$$

$$\begin{aligned} CW^2 &= VG^2 - 2 \times VG \times vw \times \cos\theta + vw^2 \times \cos^2\theta + VS^2 \\ &\quad - 2 \times VS \times vw \times \sin\theta + vw^2 \times \sin^2\theta \end{aligned} \quad (65)$$

$$\begin{aligned} CW^2 - VG^2 - VS^2 \\ &= -2 \times VG \times vw \times \cos\theta - 2 \times VS \times vw \times \sin\theta \\ &\quad + vw^2 \times (\sin^2\theta + \cos^2\theta) \end{aligned} \quad (66)$$

$$CW^2 - (VG^2 + VS^2) = -2 \times VG \times vw \times \cos\theta - 2 \times VS \times vw \times \sin\theta + vw^2 \quad (67)$$

$$CW^2 - vg_{i,j}^2(\cos\vartheta_{i,j}^2 + \sin\vartheta_{i,j}^2) \quad (68)$$

$$= -2 \times VG \times vw \times \cos\theta - 2 \times VS \times vw \times \sin\theta + vw^2$$

$$CW^2 - vg_{i,j}^2 = -2 \times VG \times vw \times \cos\theta - 2 \times VS \times vw \times \sin\theta + vw^2 \quad (69)$$

dokonując przekształceń: $R = CW^2 - vg_{i,j}^2$:

$$R = -2 \times vw \times (VG \times \cos\theta + VS \times \sin\theta) + vw^2 \times (\sin\theta^2 + \cos\theta^2) \quad (70)$$

dokonując przekształceń: $X = VG \times \cos\theta + VS \times \sin\theta$ otrzymujemy ostateczną postać równania:

$$0 = vw^2 - 2 \times vw \times X - R \quad (71)$$

Rozwiązanie tego równania (dla zmiennej vw) ma następującą postać:

$$vw = X \mp \sqrt{X^2 + R} \quad (72)$$

Biorąc pod uwagę, że $X = VG \times \cos\theta + VS \times \sin\theta$, funkcja odporności przybiera postać:

$$Y_{k,l}(\theta) = (VG \times \cos\theta + VS \times \sin\theta) \mp \sqrt{(VG \times \cos\theta + VS \times \sin\theta)^2 + R} \quad (73)$$

2. **Wypukłość komponentów funkcji $Y_{k,l}(\theta)$.** Z postaci równania (55) wynika, że funkcja $Y_{k,l}(\theta)$ jest sumą dwóch funkcji:

$$A(\theta) = a \times \cos\theta + b \times \sin\theta \quad (74)$$

$$B(\theta) = \sqrt{(a \times \cos\theta + b \times \sin\theta)^2 + c} \quad (75)$$

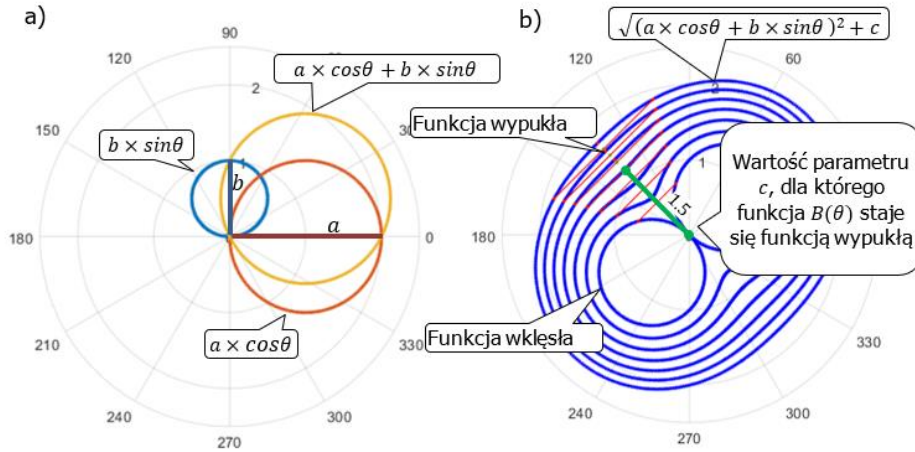
gdzie: $a, b, c \geq 0$

Z uwagi na fakt, iż funkcje $a \times \cos\theta, b \times \sin\theta$ są funkcjami wypukłymi w biegunowym układzie współrzędnych (patrz Rys. 3.11a) oraz suma funkcji wypukłych jest funkcją wypukłą, funkcja $A(\theta)$ jest również funkcją wypukłą.

Wypukłość funkcji $B(\theta)$ zależy z kolei od wielkości parametru c . Ogólnie można wykazać, że funkcja $B(\theta)$ jest wypukłą, gdy spełniony jest następujący warunek:

$$c > 3/8(b^2(4 + 2\sqrt{3}) + a^2(4 - 2\sqrt{3}) - 4ab) \quad (76)$$

Przykładowo, przyjmując wartość parametrów $a, b = 1$, funkcja $B(\theta)$ staje się funkcją wypukłą, dla $c > 1.5$ (patrz Rys. 3.11b).



Rys. 3.11 Wykresy funkcji: a) $A(\theta) = a \times \cos \theta + b \times \sin \theta$, b) $B(\theta) = \sqrt{(a \times \cos \theta + b \times \sin \theta)^2 + c}$ (opracowanie własne)

Wartość parametru c jest określana przez wartość parametru R , który zależy od parametrów środowiska, w którym wykonywany jest lot oraz od parametrów technicznych BSP:

$$R = \left(\frac{\text{CAP}_{i,j} - \frac{(W \times g)^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{2 \times D \times A}}}{0.5 \times C_D \times A \times D} \right)^{\frac{2}{3}} - v g_{i,j}^2 \quad (77)$$

Fakt, iż funkcja $Y_{k,l}(\theta)$ jest funkcją wypukłą implikuje wcześniej przyjęte założenia, np. (35) jak i następujące: $a = VG = v g_{i,j} \times \cos \vartheta_{i,j}$, $b = VS = v g_{i,j} \times \sin \vartheta_{i,j}$:

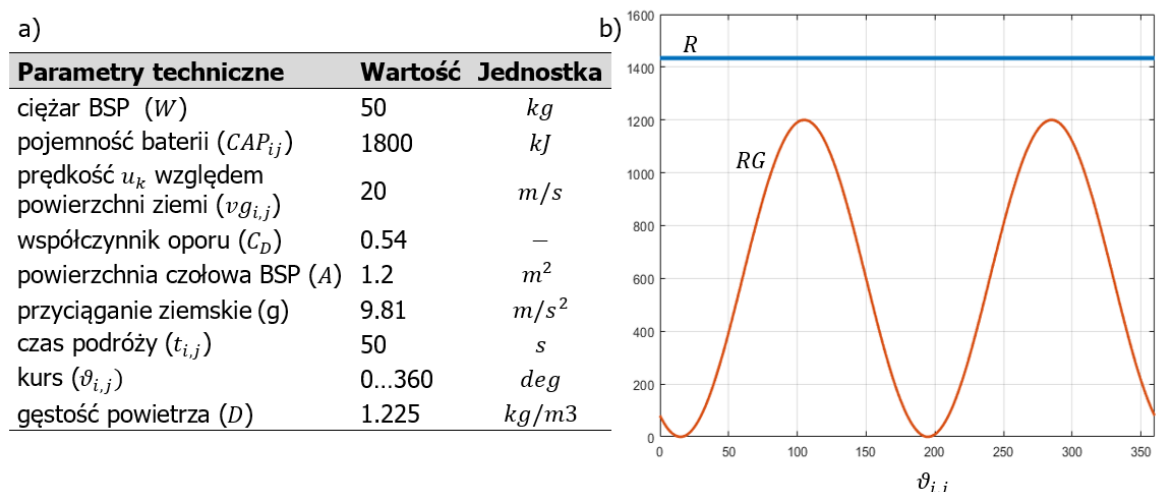
$$\begin{aligned} & \left(\frac{\text{CAP}_{i,j} - \frac{(W \times g)^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{2 \times D \times A}}}{0.5 \times C_D \times A \times D} \right)^{\frac{2}{3}} - v g_{i,j}^2 \\ & > \frac{3}{8} \left((v g_{i,j} \times \sin \vartheta_{i,j})^2 \times (4 + 2\sqrt{3}) \right. \\ & \quad \left. + (v g_{i,j} \times \cos \vartheta_{i,j})^2 \times (4 - 2\sqrt{3}) \right. \\ & \quad \left. - 4 \times (v g_{i,j} \times \cos \vartheta_{i,j}) \times (v g_{i,j} \times \sin \vartheta_{i,j}) \right) \end{aligned} \quad (78)$$

a więc:

$$R > RG \quad (79)$$

gdzie:

R parametr określony przez ograniczenie (34)
 RG parametr opisany formułą: $RG = \frac{3}{8} \left((v g_{i,j} \times \sin \vartheta_{i,j})^2 \times (4 + 2\sqrt{3}) + (v g_{i,j} \times \cos \vartheta_{i,j})^2 \times (4 - 2\sqrt{3}) - 4 \times (v g_{i,j} \times \cos \vartheta_{i,j}) \times (v g_{i,j} \times \sin \vartheta_{i,j}) \right)$



Rys. 3.12 Przykładowe parametry techniczne BSP a), odpowiadające im wartości R i RG b) (opracowanie własne)

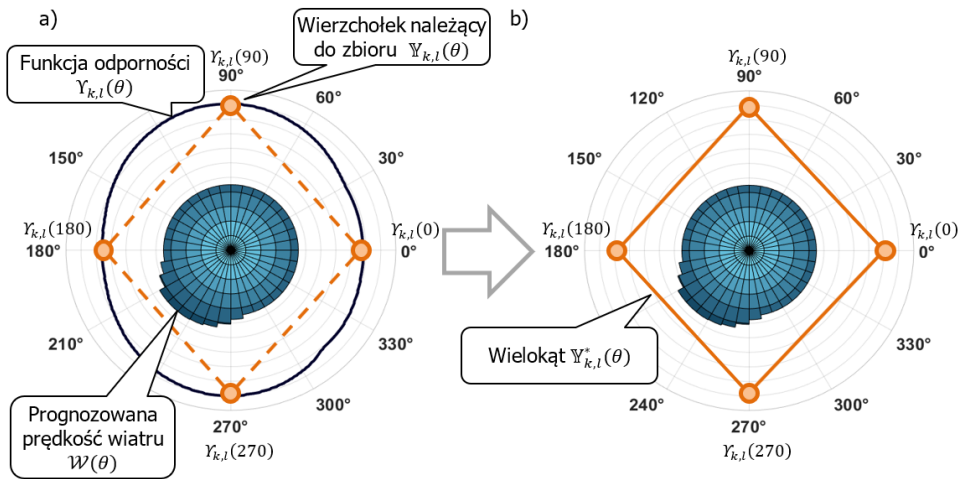
Na Rys. 3.12b przedstawiono wykres wartości parametru R oraz RG , dla przykładowych parametrów technicznych BSP (zestawionych w tabeli na Rys. 3.12a), powyżej których ($R > RG$) funkcja $B(\theta)$ staje się funkcją wypukłą. Ze względu na fakt, iż spotykane w praktyce wartości parametru R są bardzo wysokie (tj. $R \gg 100$) przyjmuje się, że funkcje $A(\theta)$ i $B(\theta)$ są wypukłe. W konsekwencji, ponieważ suma funkcji wypukłych, również jest funkcją wypukłą, funkcja odporności misji lotu $Y_{k,l}(\theta)$ opisana równaniem (73) jest również funkcją wypukłą.

3.3.2 Relaksacja ograniczeń

Przedstawioną własność, gwarantującą, że funkcja $Y_{k,l}(\theta)$ jest funkcją wypukłą można zastosować do uproszczenia ograniczenia (36) ($Y_{k,l}(\theta) \geq \mathcal{W}(\theta)$). W celu zastąpienia warunku (36) równoważnym ale mniej czasochłonnym obliczeniowo, przyjęto, że funkcja ciągła (gładka) $Y_{k,l}(\theta)$ będzie aproksymowana funkcją dyskretną, reprezentowaną przez skończony zbiór $\mathbb{Y}_{k,l} = \{Y_{k,l}(\theta_i) | i = 1 \dots lq; \theta_i < \theta_{i+1}\}$, gdzie: lq – przyjęta arbitralnie liczba próbek. Zbiór ten zawiera wierzchołki wielokąta $\mathbb{Y}_{k,l}^*(\theta)$, przedstawionego na Rys. 3.13b). Własność 1 gwarantująca wypukłości funkcji $Y_{k,l}(\theta)$ zapewnia, że wielokąt $\mathbb{Y}_{k,l}^*(\theta)$ zawsze obejmuje obszar ograniczony przez tę funkcję - Rys. 3.12b.

Oznacza to, że funkcja $Y_{k,l}(\theta)$ może być zastąpiona przez funkcję $\mathbb{Y}_{k,l}^*(\theta)$, a właściwie przez zbiór wierzchołków należących do $\mathbb{Y}_{k,l}$. W praktyce oznacza to zmniejszenie liczby instancji równania (36) do liczby wierzchołków przyjętego wielokąta. W konsekwencji ograniczenie (36) może zostać zastąpione poniższą nierównością:

$$\mathbb{Y}_{k,l}^*(\theta) \geq \mathcal{W}(\theta); \theta \in \{\theta_1, \dots, \theta_{lq}\}, k = 1 \dots m, l = 1 \dots L \quad (81)$$



Rys. 3.13 Dyskretyzacja funkcji $Y_{k,l}(\theta)$ a) funkcja $Y_{k,l}(\theta)$, b) wielokąt $Y_{k,l}^*(\theta)$ (opracowanie własne)

3.4 Podsumowanie

W rozdziale przedstawiono proaktywno-reaktywne podejście do planowania odpornych misji lotów BSP, tzn. umożliwiające reagowanie na wybrane zakłócenia związane m.in. ze zmianą: warunków pogodowych, struktury sieci transportowej, warunków realizacji zamówień (np. zmianą wielkości zapotrzebowania, terminów odbioru). Dodatkowo opisano model matematyczny odzwierciedlający planowanie misji floty BSP uwzględniający występowanie wybranych zakłóceń. Warty podkreślenia jest fakt, że w opracowanym modelu uwzględniono czynniki, decydujące o silnie nieliniowym charakterze rozważanego problemu planowania misji lotu floty BSP. Uwzględniane w proponowanym podejściu warunki pogodowe (kierunek wiatru, prędkość wiatru) oraz parametry techniczne drona (szerokość, powierzchnia czołowa, masa własna, prędkość oraz współczynnik oporu), są stosunkowo rzadko omawiane w modelach aktualnie dostępnych publikacji. Złożoność modeli integrujących ww. czynniki ogranicza rozwiązywanie formułowanych na ich bazie problemów. Dotyczy to w szczególności problemów marszrutyzacji floty BSP, w których długość marszrut zależna jest od zużycia zapasów energii. Przykładowo, łatwo zauważyć, silnie nieliniową zależność wielkości zużywanej energii BSP w zależności od turbulencji, mgły, opadów śniegu itp., a także zmieniającego się w czasie całkowitego ciężaru BSP (zmniejszającego się w trakcie realizacji misji).

W rozdziale przedstawiono twierdzenie o wypukłości funkcji odporności misji lotu pojazdu, pozwalające na sprowadzenie równania (36) do postaci (81), a w konsekwencji umożliwiające zmniejszenie czasu potrzebnego do wyznaczenia rozwiązania danej instancji problemu DRVRP. Tab. 3.3. zawiera wyniki eksperymentów przeprowadzonych w celu oceny zaproponowanej relaksacji. Eksperymenty przeprowadzono dla trzech funkcji prognozowanych warunków pogodowych $W(\theta) = 11, 12, 13 \frac{m}{s}$. Misja floty BSP odbywa się dla sieci n , losowo wyznaczonych punktów dostaw na obszarze $10 \times 10 \text{ km}$ wykorzystującej m pojazdów o parametrach technicznych przedstawionych w Tab. 3.2. Dla każdego z wariantów sieci opracowano proaktywny plan misji lotów gwarantujący dostawę wszystkich wymaganych towarów w horyzoncie czasowym $H = 10000s$. Przyjęto, że w chwili $t = 2000s$ następuje zmiana warunków pogodowych trwająca do końca przyjętego horyzontu planowania. Zmiana pogody polega na zwiększeniu prognozowanej prędkości wiatru o $2 \frac{m}{s}$, tzn. do wartości $W^*(\theta) = 13, 14, 15 \frac{m}{s}$. W tym kontekście poszukiwana jest odpowiedź na pytanie, czy istnieje misja S^* gwarantująca terminową realizację zleceń w nowych warunkach pogodowych?

Przedstawiony problem został zaimplementowany w środowisku programowania deklaratywnego IBM ILOG CPLEX przy wykorzystaniu jednostki obliczeniowej o parametrach: Intel Core i7-M4800MQ 2.7 GHz, 32 GB RAM.

Tab. 3.2 Parametry techniczne BSP

Parametry techniczne BSP	Wartość	Jednostka
Ładowność Q	25	kg
Pojemność baterii CAP	7500	kJ
Prędkość przelotu v	20	$\frac{m}{s}$
Współczynnik oporu C_D	0.54	–
Powierzchnia czołowa A	1.2	m^2
Szerokość b	8.7	m

Przeprowadzone testy pokazują, że dla sieci transportowej o wielkości do 80 punktów dostaw obsługiwanej przez 2 BSP, plany misji lotu są realizowalne dla różnych warunków pogodowych, jak również z uwzględnieniem określonych rodzajów zakłóceń. Proponowana relaksacja umożliwia liniową redukcję funkcji złożoności obliczeniowej. Wyniki eksperymentów pokazują, że w rozpatrywanym przypadku złożoność obliczeniowa jest około 70 razy mniejsza niż w przypadku bez relaksacji. Zastosowanie warunku (36) ogranicza możliwości wyznaczania planów misji dla instancji problemów w trybie on-line do 40 punktów dostaw.

Tab. 3.3 Wyniki przeprowadzonych eksperymentów (opracowanie własne)

n	m	$\mathcal{W}(\theta) = 11 \frac{m}{s}$ $\forall \theta \in [0^\circ, 360^\circ)$		$\mathcal{W}(\theta) = 12 \frac{m}{s}$ $\forall \theta \in [0^\circ, 360^\circ)$		$\mathcal{W}(\theta) = 13 \frac{m}{s}$ $\forall \theta \in [0^\circ, 360^\circ)$				
		NS	TCR[s]	TC[s]	NS	TCR[s]	TC[s]	NS	TCR[s]	TC[s]
40	2	7	18,76	1373,41	7	35,71	2534,7	7	27,69	2091,37
	3	6	154,16	t>600	6	147,46	t>600	7	541,51	t>600
	4	5	408,95	t>600	5	442,02	t>600	5	698,24	t>600
50	2	9	87,05	6351,54	10	103,85	t>600	10	39,64	2874,35
	3	9	287,4	t>600	9	534,11	t>600	9	365,627	t>600
	4	x	t>600	t>600	x	t>600	t>600	x	t>600	t>600
60	2	12	309,44	t>600	12	66,42	t>600	12	67,94	t>600
	3	11	334,01	t>600	x	t>600	t>600	9	236,8	t>600
	4	x	t>600	t>600	x	t>600	t>600	x	t>600	t>600
70	2	13	411,58	t>600	13	139,59	t>600	14	153,53	t>600
	3	12	756,58	t>600	x	t>600	t>600	x	t>600	t>600
	4	x	t>600	t>600	x	t>600	t>600	x	t>600	t>600
80	2	16	360,98	t>600	15	175,65	t>600	16	502,24	t>600
	3	x	t>600	t>600	x	t>600	t>600	x	t>600	t>600
	4	x	t>600	t>600	x	t>600	t>600	x	t>600	t>600
90	2	17	366,32	t>600	x	t>600	t>600	17	327,27	t>600
	3	x	t>600	t>600	x	t>600	t>600	x	t>600	t>600
	4	x	t>600	t>600	x	t>600	t>600	x	t>600	t>600
100	2	x	t>600	t>600	x	t>600	t>600	x	t>600	t>600
	3	x	t>600	t>600	x	t>600	t>600	x	t>600	t>600
	4	x	t>600	t>600	x	t>600	t>600	x	t>600	t>600
110	2	x	t>600	t>600	x	t>600	t>600	x	t>600	t>600
	3	x	t>600	t>600	x	t>600	t>600	x	t>600	t>600
	4	x	t>600	t>600	x	t>600	t>600	x	t>600	t>600

n – liczba węzłów (punktów dostaw), m – rozmiar floty BSP, TCR – czas obliczeń dla warunku (81), TC – czas obliczeń dla warunku (36), x – brak rozwiązania w czasie $t < 600s$, NS – liczba submisji

4 Metoda proaktywno-reaktywnego wyznaczania odpornych planów misji lotów floty BSP

Bazując na opracowanym referencyjnym modelu planowania misji lotu floty BSP jak również wybranym środowisku programowania z ograniczeniami opracowano metodę proaktywno-reaktywnego planowania odpornych misji floty BSP.

Potencjalnymi adresatami proponowanej metody są firmy świadczące usługi transportowe za pośrednictwem BSP. Proponowana metoda, integrując etapy planowania proaktywnego i reaktywnego, wspomaga procesy podejmowania decyzji przy planowaniu różnego rodzaju misjach BSP, od dystrybucji towarów w trybie „ostatniej mili” [12, 13, 14], poprzez rekonesanse terenów monitorowanych [177], na dystrybucji lekarstw i żywności w obszarach klęsk żywiołowych [39, 120] kończąc.

4.1 Opis metody

Idea metody proaktywno-reaktywnego planowania odpornych misji floty BSP została wstępnie przedstawiona w rozdziale 3 (Rys. 3.1). W niniejszym rozdziale jej koncepcja rozszerzona została o elementy wprowadzonego tam modelu.

Algorytm opisujący działanie opracowanej metody przedstawiono na Rys. 4.1. Zakłada on realizację dwóch etapów:

- przygotowanie misji związane z planowaniem proaktywnym,
- przyjęcia strategii dynamicznej korekty misji związane z planowaniem reaktywnym.

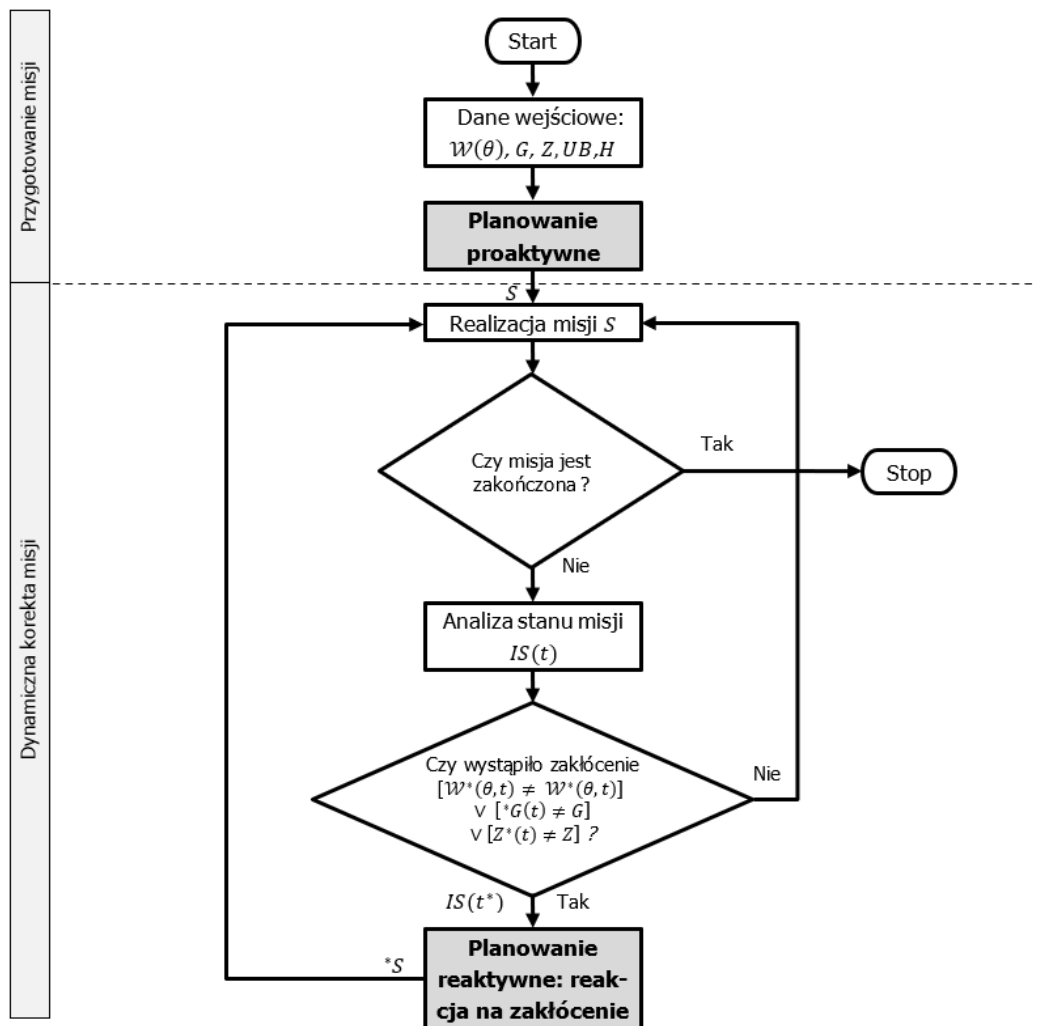
W tym ujęciu wsparcie procesu planowania obejmuje wyznaczanie misji S gwarantującej terminową realizację zamówień dla prognozowanych warunków pogodowych (planowanie proaktywne) oraz jej korektę (przeplanowanie) w sytuacjach wystąpienia zakłóceń (planowanie reaktywne).

Etap przygotowania misji wymaga jednorazowego wyznaczenia planu lotu floty BSP. W celu wykrycia zakłócenia $IS(t^*)$, stan realizowanej misji S monitorowany jest na bieżąco. Wystąpienie zakłócenia wymusza przeplanowanie przyjętego planu. Oznacza to, że proces planowania reaktywnego może być inicjowany wielokrotnie w ramach misji BSP realizującej jej wcześniej ustalony plan proaktywny.

Opracowana metoda zakłada, że na etapie wyznaczania misji znane są informacje o:

- sieci transportowej G (liczba punktów dostaw (\mathcal{V}_D), okna czasowe ($\mathcal{V}_{D_{TW}}$), liczba baz \mathcal{V}_B , zapotrzebowanie na towar w punktach (Z), rozmiar floty BSP (U), przynależność pojazdów do bazy (U^i) jak również horyzont czasowy (H)),
- parametrach technicznych BSP (prędkość pojazdu (va), pojemność baterii (CAP), szerokość (b), współczynnik oporu (C_D), powierzchnia czołowa pojazdu (A)),
- prognozowanych warunkach pogodowych (maksymalna prędkość wiatru dla kierunku θ ($\mathcal{W}(\theta)$), gęstość powietrza (D)).
- Ponadto zakłada się również, że:
- na etapie planowania proaktywnego: struktura sieci, parametry techniczne BSP, prognoza pogody, są niezmiennie w czasie,
- zakłócenie $IS(t^*)$ może obejmować zmianę: struktury sieci oraz warunków pogodowych
- flota BSP stacjonuje w rozproszonych geograficznie bazami zbioru \mathcal{V}_B , (w trakcie misji BSP nie zmieniają swoich macierzystych baz),
- w danej chwili w punkcie dostaw może przebywać tylko jeden BSP (warunek wzajemnego wykluczania),
- sektor łączący punkty dostaw w danym momencie może być zajęty przez tylko jeden BSP,

- wszystkie BSP dostarczają jeden, ten sam rodzaj produktu,
- po przylocie do bazy, następuje wymiana baterii,
- BSP podróżują ze stałą prędkością vg (prędkość względem powierzchni ziemi). W przypadku zmian prędkości wiatru, BSP dostosowuje swoją prędkość va (prędkość względem powietrza) tak aby utrzymać stałą prędkość vg (zmiana prędkości va powoduje zmienne zużycie energii),
- ciężar BSP zmienia się w trakcie realizacji misji,
- zużycie energii BSP opisane jest funkcją o nieliniowej charakterystyce opisaną wyrażeniem (40),
- misja powinna zakończyć się przed upływem horyzontu planowania H
- start BSP z bazy odbywa się z określonym odstępem czasowym ts .



Rys. 4.1 Algorytm proaktywno-reaktywnego planowania odpornych misji lotu floty BSP (opracowanie własne)

Przyjęte założenia ograniczają przestrzeń przeszukiwania, przez co zwiększają szanse na znalezienie rozwiązania dopuszczalnego. Nie oznacza to jednak, że dla każdego przypadku zbiór rozwiązań dopuszczalnych S zawiera co najmniej jedno rozwiązanie: $S \neq \emptyset$. Brak rozwiązań dopuszczalnych wynika z wzajemnej sprzeczności przyjętych ograniczeń. W praktyce mogą to być sytuacje związane z nakładającymi się na siebie oknami czasowymi \mathcal{V}_{DTW} (np. BSP w tym samym momencie

(oknie czasowym) musi dostarczyć towar do dwóch punktów dostaw), zbyt krótki horyzont planowania H , jak również zbyt mała flota BSP i/lub ograniczenia wnoszone przez parametry techniczne floty (zbyt mała pojemność baterii, zbyt mały udźwig, itp.).

4.2 Algorytm planowania proaktywnego

Pierwszym etapem opracowanej metody jest etap przygotowania misji, w ramach którego realizowany jest proces planowania proaktywnego. Planowanie proaktywne sprowadza się do wyznaczenia odpowiedzi na pytanie: *czy dla zadanej sieci transportowej G oraz floty U istnieje misja S gwarantująca terminową realizację zamówień dla prognozowanych warunków pogodowych $\mathcal{W}(\theta)$, przy jednoczesnym zużyciu energii każdego z $u_k \in U$ nieprzekraczającym 100%?* Inaczej mówiąc poszukiwana jest odpowiedź na pytanie: czy istnieje misja, której odporność spełnia ograniczenie (81)?

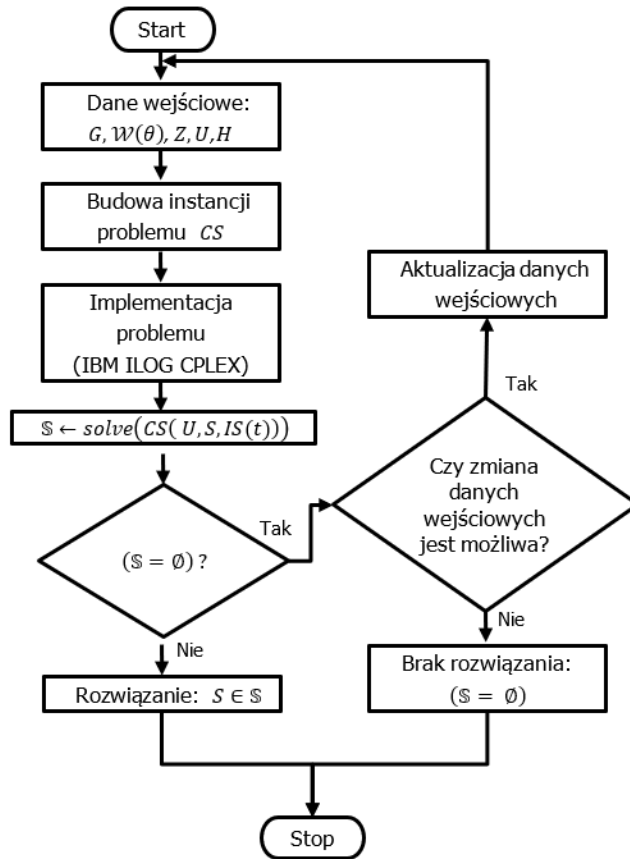
Algorytm proaktywnego planowania misji lotów floty BSP przedstawiono na Rys. 4.2. Najważniejszym jego elementem jest implementacja deklaratywnej instancji problemu spełniania ograniczeń CS (45) (przyjmuje się w tym przypadku, że zbiór zakłóceń jest pusty: $IS(t^*) = \emptyset$). Implementacja problemu CS odbywa się w środowisku programowania deklaratywnego (w rozważanym przypadku w środowisku IBM ILOG CPLEX). Rezultatem obliczeń (zwracanym przez funkcję *solve* z Rys. 4.2) jest zbiór rozwiązań dopuszczalnych \mathbb{S} (zbiór planów misji S lotów BSP) spełniających ograniczenia (10) – (44).

Możliwe jest, że dla zadanego zbioru danych wejściowych zbiór rozwiązań dopuszczalnych jest zbiorem pustym: $\mathbb{S} = \emptyset$ (tzn. nie istnieje misja S spełniająca ograniczenia (10) – (44)). Powodem takiego stanu rzeczy mogą być np. niesprzyjające warunki pogodowe, nakładające się terminy zamówień, zbyt mała flota BSP, itp. W sytuacji braku rozwiązania dopuszczalnego zbiór danych wejściowych jest aktualizowany (np. wprowadzenie korekt terminów zamówień, zmianę rozmiaru floty BSP). Przyjmuje się, że dziedziny danych wejściowych są zbiorami skończonymi. W skrajnych przypadkach oznacza to możliwość wystąpienia sytuacji, w których dane wejściowe przybierają wartości spoza przyjętych dziedzin – skutkujących brakiem rozwiązań dopuszczalnych. Praktyka pokazuje jednak, że takie przypadki należą do rzadkości.

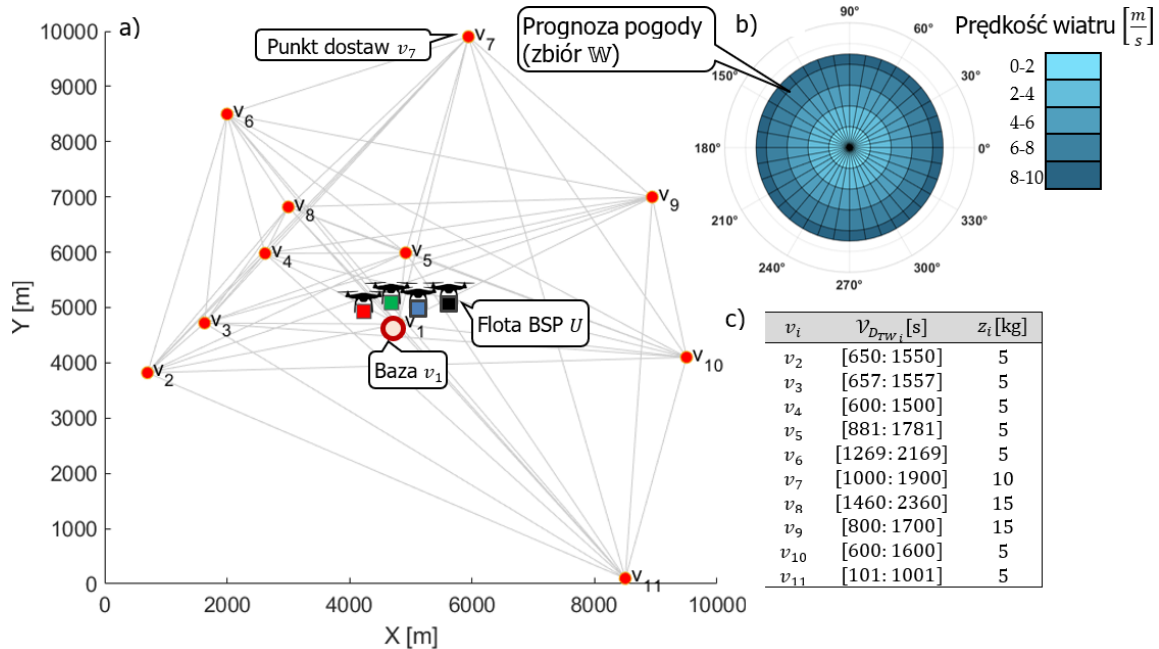
W przypadku istnienia co najmniej jednego rozwiązania dopuszczalnego $\mathbb{S} \neq \emptyset$, algorytm zwraca plan misji $S \in \mathbb{S}$, który może zostać wdrożony do realizacji.

Proces proaktywnego wyznaczania misji lotu floty BSP ilustruje następujący przykład.

Dana jest sieć transportowa G (Rys. 4.3a) złożona z 1 bazy ($\mathcal{V}_B = \{v_1\}$) oraz 10 punktów dostaw ($\mathcal{V}_D = \{v_2, \dots, v_{11}\}$). Przyjęte okna czasowe ($\mathcal{V}_{DTW_2} - \mathcal{V}_{DTW_{11}}$), jak również zdefiniowane zapotrzebowanie na towar ($Z = \{z_2, \dots, z_{11}\}$) zostały przedstawione na Rys. 4.3b). Prognozowane warunki pogodowe (\mathcal{W}), zakładają, że maksymalna prędkość wiatru ($\mathcal{W}(\theta)$) dla kierunku θ nie przekroczy $9 \frac{m}{s}$ - Rys. 4.3b).



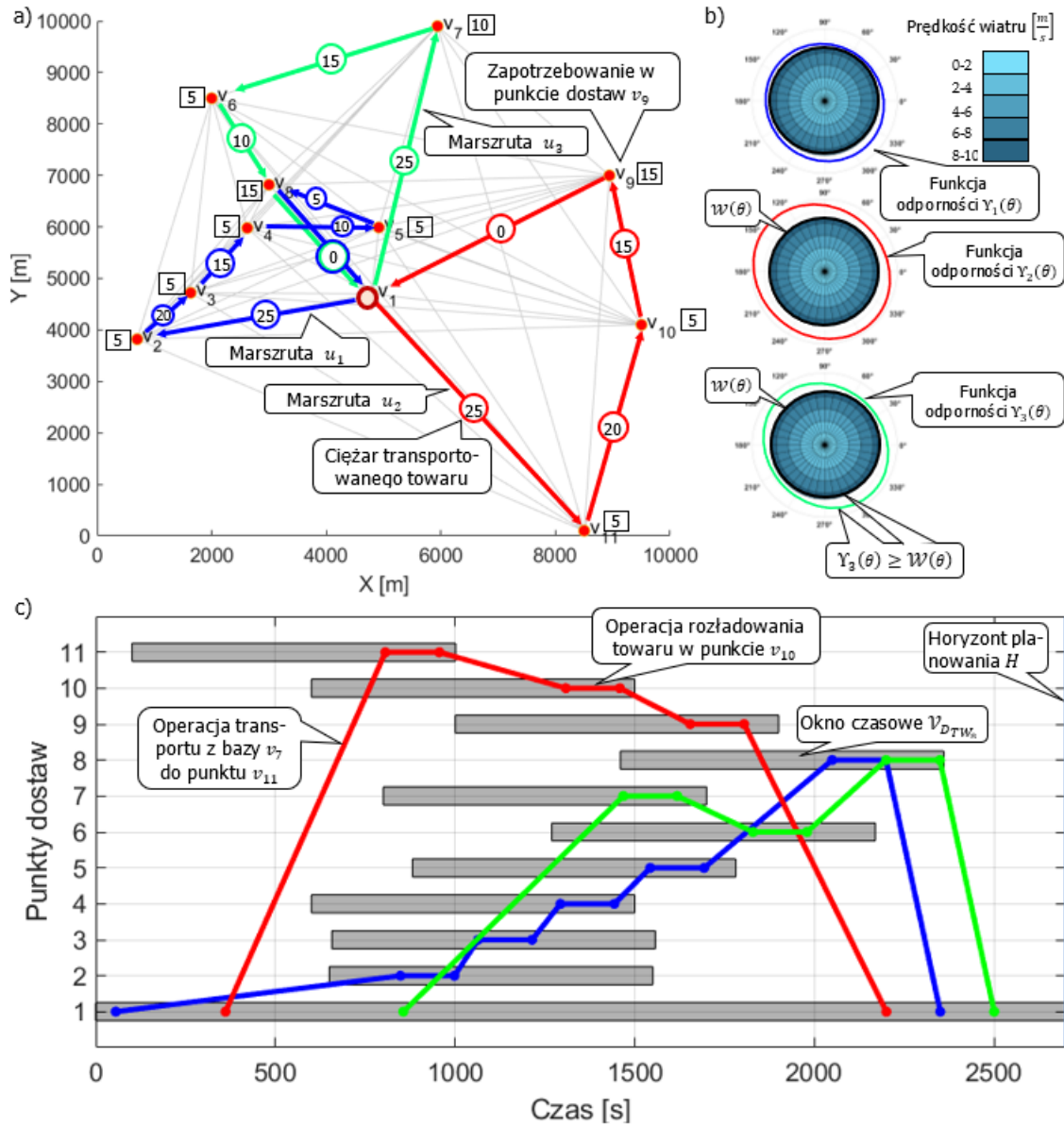
Rys. 4.2 Algorytm proaktywnego planowania misji lotów BSP (opracowanie własne)



Rys. 4.3 Dane wejściowe: sieć transportowa a), prognozowane warunki pogodowe b), okna czasowe oraz zapotrzebowanie na towar c) (opracowanie własne)

Tab. 4.1 Parametry techniczne BSP

Parametry techniczne BSP	Wartość	Jednostka
Ładowność Q	25	kg
Pojemność baterii CAP	7500	kJ
Prędkość przelotu v	20	$\frac{m}{s}$
Współczynnik oporu C_D	0.54	–
Powierzchnia czołowa A	1.2	m^2
Szerokość b	8.7	m



Rys. 4.4 Przykład proaktywnego planu misji S - marszruty BSP a), funkcje odporności b), harmonogram dostaw c)

Flota U składa się z 4 BSP (u_1, u_2, u_3, u_4), z czego 3 BSP (u_1, u_2, u_3) uwzględniono na etapie planowania misji, natomiast BSP (u_4) pełni rolę rezerwowego ($UB = \{u_4\}$). Parametry techniczne BSP przedstawiono w tabeli Tab. 4.1.

Zakłada się, że misja realizacji zamawianych towarów powinna zakończyć się w założonym horyzoncie czasowym $H = 2700s$.

Dla przedstawionych danych wejściowych, zgodnie ze schematem przedstawionym na Rys. 4.2, zbudowana została instancja problemu CS , która została zaimplementowana w środowisku programowania z ograniczeniami – IBM ILOG CPLEX. Wynikiem obliczeń jest niepusty zbiór dopuszczalnych misji S . Przykładową realizację misji przedstawiono na Rys. 4.4.

Otrzymane marszruty mają postać (Rys. 4.4a):

$$\pi_1 = (v_1, v_{11}, v_{10}, v_9, v_1);$$

$$\pi_2 = (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_8, v_1);$$

$$\pi_3 = (v_1, v_7, v_6, v_8, v_1).$$

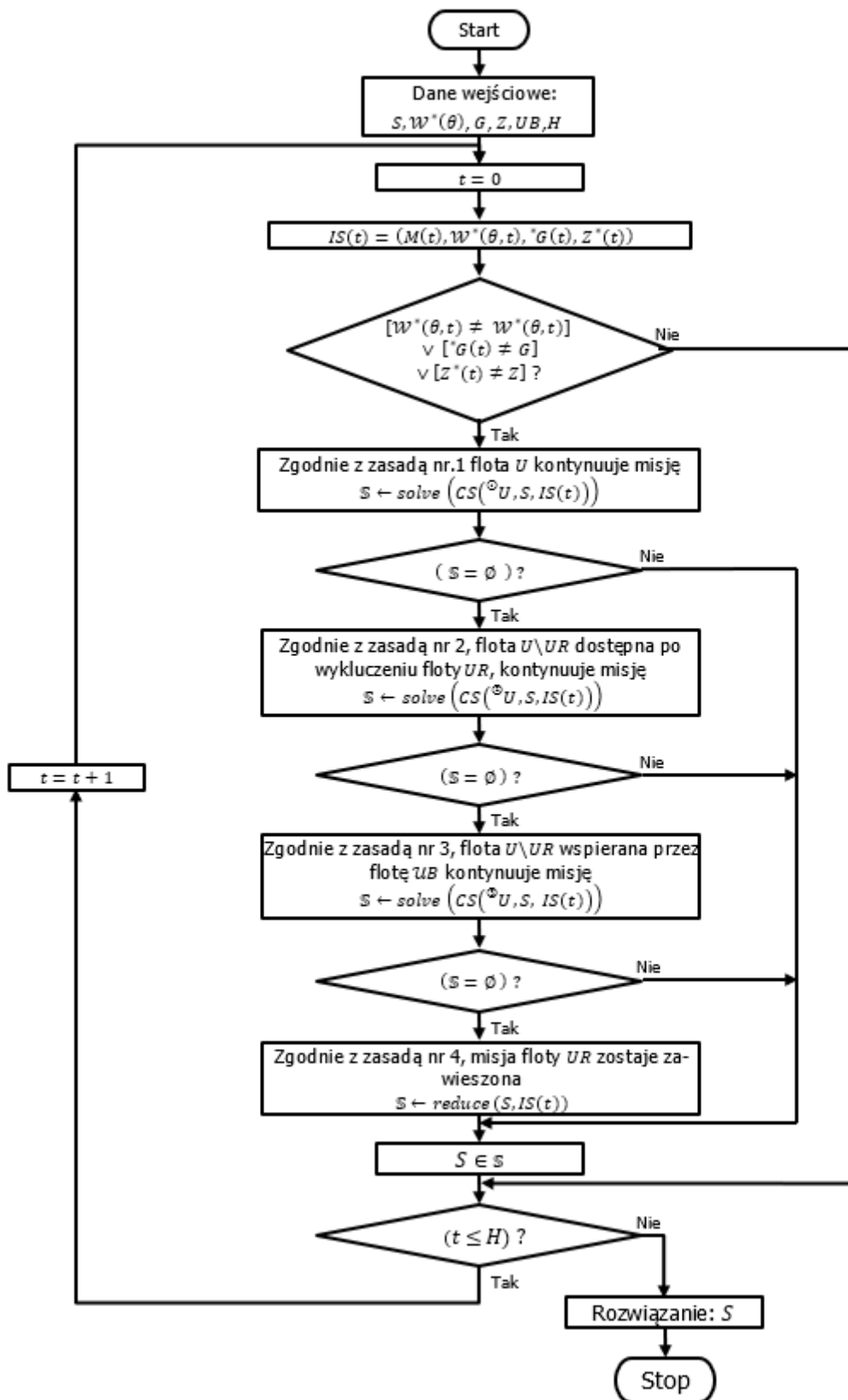
Jak łatwo zauważyć, gwarantują one terminową realizację dostaw do wszystkich punktów odbioru (Rys. 4.4c). Należy również zauważyć, że są one odporne na prognozowane warunki pogodowe (dla każdej marszruty spełniony jest warunek $Y_k(\theta) \geq \mathcal{W}(\theta)$ - Rys. 4.4b). Oznacza to, że plan ten może zostać wdrożony do realizacji w sytuacjach gwarantujących jego spełnienie (tzn. prędkość wiatru nie przekroczy 9 m/s).

4.3 Algorytm planowania reaktywnego

Drugim etapem opracowanej metody jest etap realizacji misji, w ramach którego przeprowadzana jest ciągła kontrola stanu realizacji misji S (stan misji został wprowadzony w rozdziale 3.1, równanie (8)). W momencie wystąpienia zakłócenia $IS(t^*)$ należy dokonać oceny wpływu zakłóceń na realizowalność misji S , tj. czy w nowych warunkach pogodowych $\mathcal{W}(\theta)$ misja S wciąż gwarantuje terminową realizację zleceń przy zużyciu energii nieprzekraczającym 100%? Jeśli $Y_{k,l}(\theta) \not\geq \mathcal{W}(\theta)$ to dotychczas realizowana, proaktywnie zaplanowana misja, musi zostać stosownie zreharmonogramowana.

Algorytm reaktywnego planowania misji lotów floty BSP przedstawiono na Rys. 4.5. Wykorzystuje on cztery następujące reguły reakcji na zakłócenie:

1. Jeśli przyjęty plan misji lotu S nie jest odporny na zakłócenie $IS(t^*)$ ($\exists_{k \in \{1, \dots, K\}, l \in \{1, \dots, L\}} Y_{k,l}(\theta) \not\geq \mathcal{W}(\theta)$), wówczas należy sprawdzić, czy istnieje możliwość jego adaptacji do nowych warunków. Decyzja ta jest warunkowana odpowiedzią na pytanie: czy wszystkie BSP będące w powietrzu, w momencie wystąpienia zakłócenia $IS(t^*)$, mogą kontynuować obecną misję, czy też należy wprowadzić odpowiednie korekty?
2. W sytuacji gdy dostępne BSP (zbiór UR), nie mogą kontynuować misji w warunkach zakłócenia $IS(t^*)$, wówczas zawracane są do bazy, po uprzednim upewnieniu się, że pozostałe BSP (zbiór $U \setminus UR$), znajdujące się w powietrzu, mogą przejąć ich zadania.
3. Jeżeli zadania powracających do bazy BSP (zbiór UR) nie mogą być kontynuowane przez pozostałe BSP (zbiór $U \setminus UR$) wykonujące swoje misje, wówczas należy sprawdzić, czy dostępne w bazie, rezerwowe pojazdy (zbiór UB) mogą przejąć ich obowiązki.
4. Jeżeli pozostające w rezerwie BSP (zbiór UB) nie są w stanie przejąć zadań BSP powracających do bazy (zbiór UR), wówczas należy przełożyć wykonywanie zadań do czasu ustania zakłócenia.



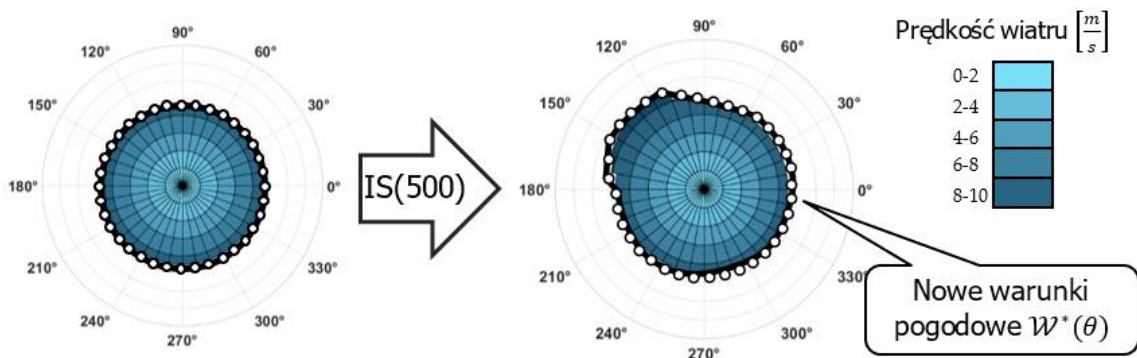
Rys. 4.5 Algorytm reaktywnego planowania misji lotów floty BSP

Powyższe zasady stanowią podstawę zaproponowanego podejścia reaktywnego planowania misji lotów S (Rys. 4.5). Przyjmując, że w czasie wykonywania misji lotu S , w trybie ciągłym, monitorowany jest stan $IS(t)$ (dla $t \in \{0, \dots, H\}$), w przypadku, gdy spełniony jest warunek $[\mathcal{W}^*(\theta, t^*) \neq \mathcal{W}^*(\theta)] \vee [G^*(t^*) \neq G] \vee [Z^*(t^*) \neq Z]$ (np. gdy nastąpiła zmiana prognozowanych warunków pogodowych, struktury sieci transportowej lub zapotrzebowanie na towar w danym węźle) oraz misja S jest zagrożona (tzn. co najmniej jeden z BSP nie zakończy swojej misji – brak energii koniecznej do realizacji zaplanowanych dostaw) wówczas podejmowana jest próba reharmonogramowania planu misji S . W praktyce, reharmonogramowanie misji sprowadza się do odpowiedzi na następujące pytanie: *Czy istnieje plan misji S , który gwarantuje terminowe dostawy wymaganej ilości towaru w sytuacji wystąpienia zakłócenia $IS(t^*)$?* Odpowiedź na to pytanie wiąże się z wyznaczeniem rozwiązania (funkcja *solve*) dla problemu spełnienia ograniczeń $CS({}^{\circ}U, S, IS(t))$ (45), gdzie ${}^{\circ}U$ oznacza flotę wyznaczoną zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku Rys. 4.5.

Proces przydzielania odpowiednich ograniczeń, przebiega zgodnie z zadaną sekwencją, w której najpierw podejmowana jest próba wyznaczenia misji lotu S , dla floty ${}^{\circ}U = U$ (zgodnie z zasadą nr 1). Następnie, w przypadku niepowodzenia podejmowana jest próba wyznaczenia misji S dla floty ${}^{\circ}U = U \setminus UR$ (zgodnie z zasadą nr 2) oraz dla floty ${}^{\circ}U = (U \setminus UR) \cup UB$ (zgodnie z zasadą nr 3). W przypadku, w którym dopuszczalne rozwiązanie (tj. realizowalna misja lotu) S nie istnieje ($S = \emptyset$), aktualnie realizowany obecny plan misji powinien zostać zmodyfikowany, poprzez usunięcie podmisji (funkcja *reduce*), które nie są odporne na zakłócenia $IS(t^*)$ (zgodnie z zasadą nr 4).

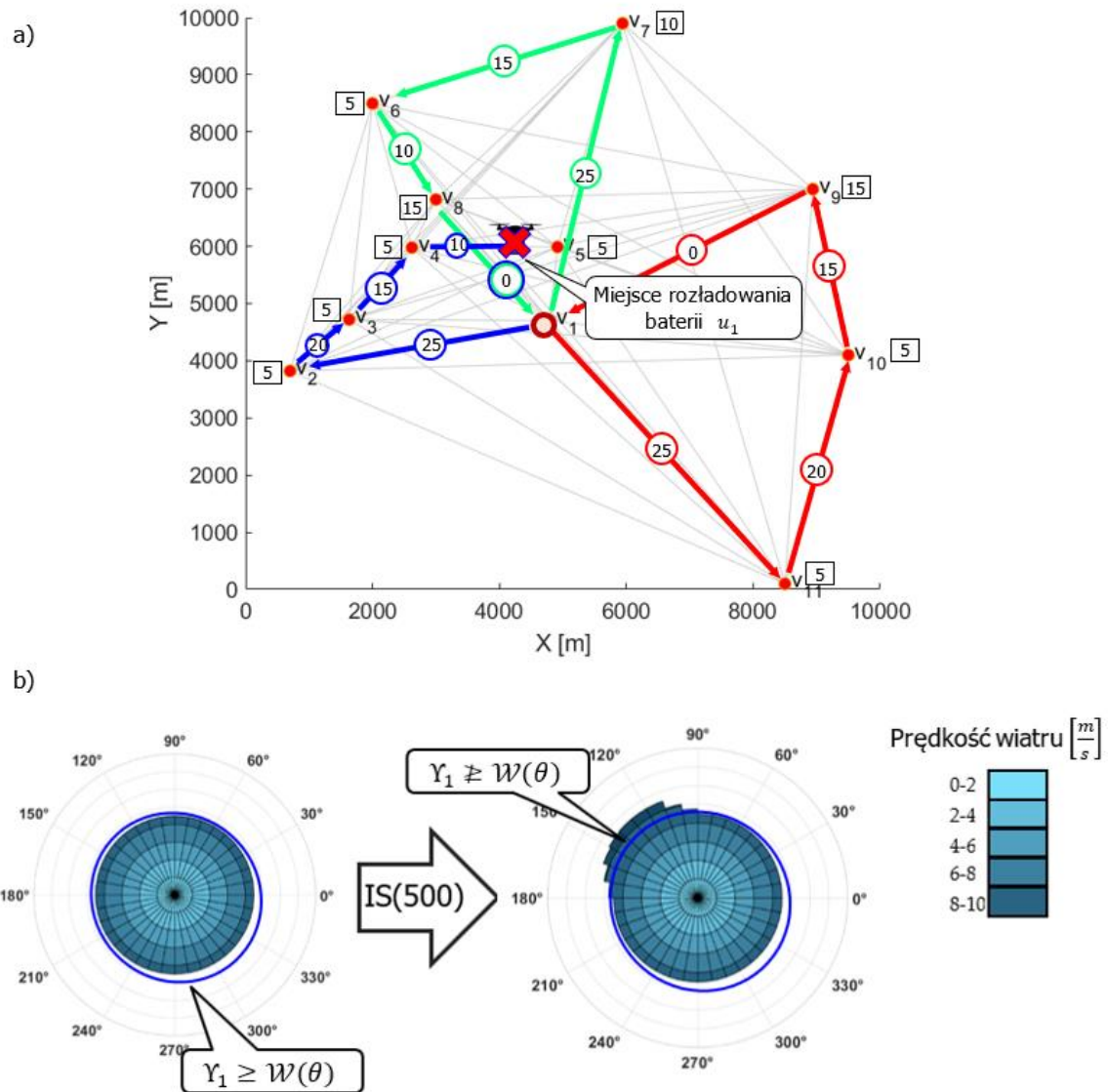
Proces proaktywnego wyznaczania misji lotu floty BSP ilustruje poniższy przykład.

Realizowany jest plan misji lotu floty BSP S , wyznaczony na etapie planowania proaktywnego (Rys. 4.4). W chwili $t = 500$ s następuje zmiana warunków pogodowych, z zakładanych $vw = 9 \frac{m}{s}$ na $vw = 11 \frac{m}{s}$ (w kierunku $\theta = 110^\circ - 130^\circ$).



Rys. 4.6 Zmiana warunków pogodowych (opracowanie własne)

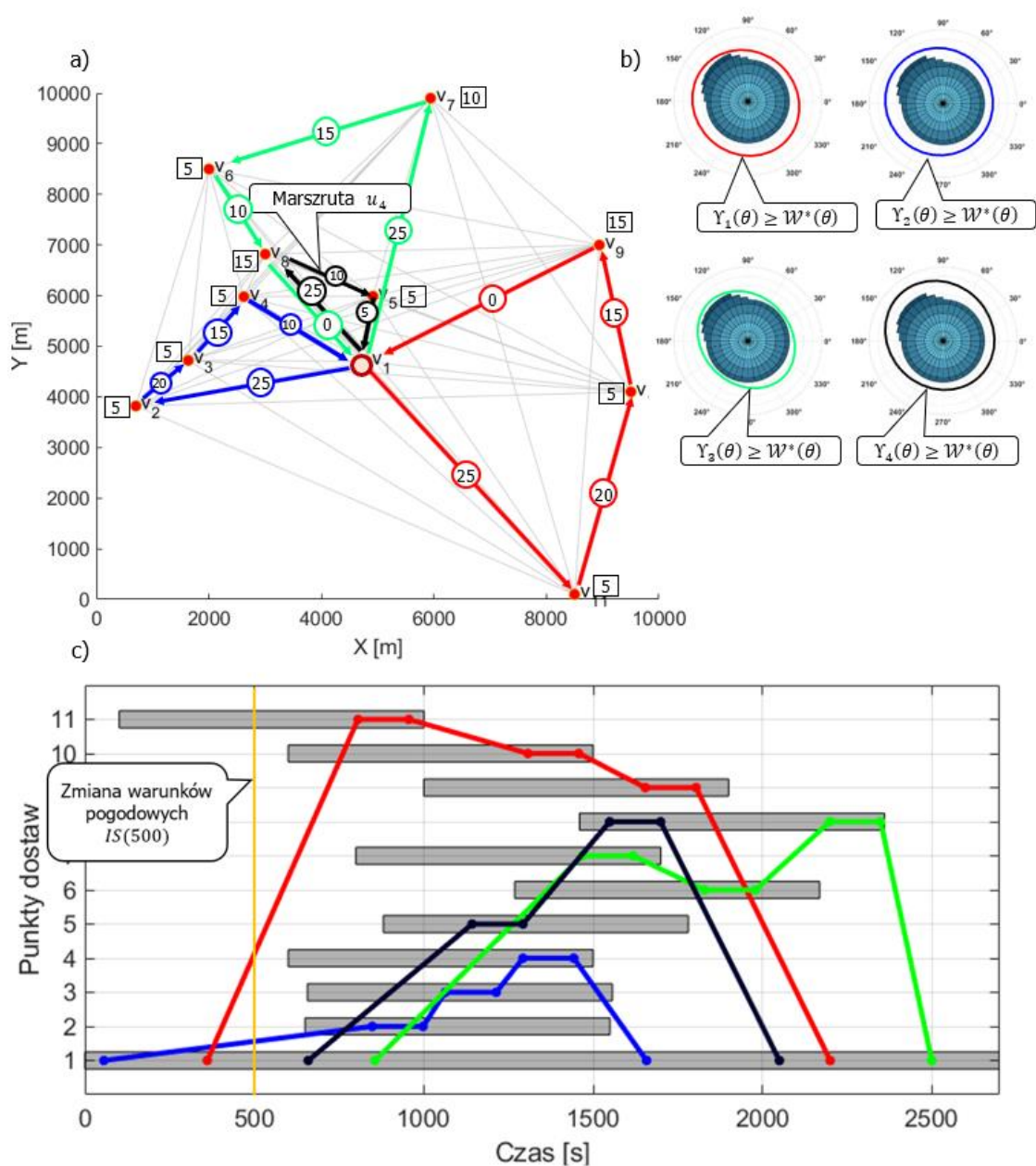
Zmiana warunków pogodowych sprawia, że misja lotu pojazdu u_1 przestaje być realizowalna ponieważ, w trakcie przelotu z punktu dostaw v_4 do punktu v_5 dochodzi do przedwczesnego wyczerpania baterii pojazdu u_1 (Rys. 4.7a). Wartość funkcji odporności $Y_1(\theta)$ dla pojazdu u_1 (wyznaczonej proaktywnie – przy założeniu, że prędkość wiatru $vw = 9 \frac{m}{s}$) nie spełnia założenia odporności misji lotu ($Y_1(\theta) \geq \mathcal{W}(\theta)$). Sytuację tę przedstawia Rys. 4.7b.



Rys. 4.7 Misja S po zmianie warunków pogodowych a), funkcja odporności $Y_1(\theta)$ przed i po zmianie warunków pogodowych (opracowanie własne)

W związku ze zmianą (zakłóceniem $IS(t^*)$) warunków pogodowych należy wyznaczyć plan, który umożliwi realizację misji w nowych warunkach, zgodnie ze schematem postępowania przedstawionym na Rys. 4.5. Zasada nr 1 nie może zostać wykorzystana, ponieważ BSP u_1 nie może kontynuować swojej misji, w związku z tym zostaje zawrócony do bazy ($UR = \{u_1\}$). Pozostałe BSP ($U \setminus UR = \{u_2, u_3\}$) nie są w stanie przejąć jego zadań (zapotrzebowanie na towar przekracza ich ładowność), tak więc zasada nr 2 również nie znajduje swojego zastosowania. W bazie znajduje się rezerwowy BSP $UB = \{u_4\}$, który zgodnie z zasadą nr 3 może wspomóc realizację misji przez flotę $U \setminus UR$. Przykładowy plan misji ilustruje Rys. 4.8.

Wyznaczony w ten sposób, reaktywny plan misji floty BSP umożliwia kontynuację dostaw pomimo zmiany warunków pogodowych wykraczających poza przewidywany zakres. Staje się to możliwe dzięki wykorzystaniu rezerwowego BSP (u_4), aktualnie przebywającego w bazie. W ogólnym przypadku alternatywnych scenariuszy reakcji na zakłócenie może być znacznie więcej niż przewidują to wyżej przyjęte reguły. Mogą one dotyczyć zarówno decyzji w zakresie zmian zachowań BSP (tak będących już w powietrzu jak i przebywających w bazie) jak i decyzji w zakresie opóźnień realizowanych zleceń.



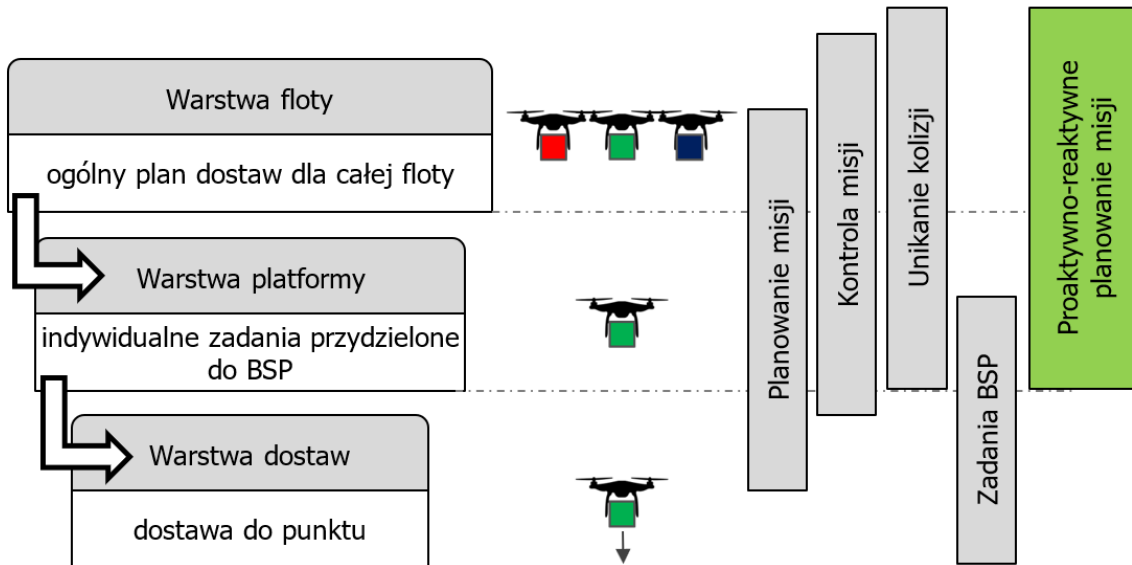
Rys. 4.8 Przykład reaktywnego planowania misji *S plan misji: marszruty BSP a), funkcje odporności misji b), harmonogram dostaw c) (opracowanie własne)

4.4 Podsumowanie

Przedstawione etapy składające się na metodę proaktywno-reaktywnego planowania misji floty BSP uwzględniają przewidywane zakłócenia (prognozowane warunki pogodowe) oraz pojawiające się ad hoc, tak związane z naturą środowiska (np. przekroczeniem prognozowanych prędkości wiatrów, skokami temperatury itp.), jak i specyfiką realizowanych zamówień (np. zmianą wielkości zamówień, terminów ich odbioru itp.). Przyjęte w dysertacji rodzaje czynników zakłócających realizację misji BSP nie wyczerpują oczywiście wszystkich spotykanych w praktyce. Nie uwzględniają np. awarii BSP wchodzących w skład floty realizującej daną misję, przeszkód statycznych (np. wieże,

kominy) i ruchomych (migrujące ptactwo, kolizja z BSP innej floty). Oznacza to potrzebę opracowania zadaniowo zorientowanych procedur planowania uwzględniających tak różne środowiska (np. górskie, morskie, zurbanizowane), jak i różne wymagania/oczekiwania (np. natury militarnej, ratowniczej, usługowej). Przedstawiona metodyka proaktywno-reaktywnego planowania misji BSP, jak również, gwarantowana naturą modeli proaktywnych otwarta, struktura modelu referencyjnego zapewnia stosowne możliwości.

Podsumowując, opracowana metoda proaktywno-reaktywnego planowania misji floty BSP wspiera planowanie zarówno na poziomie floty (decyzje w zakresie zachowania wszystkich BSP) jak i pojedynczego pojazdu (decyzje w zakresie zachowania pojedynczego BSP), co zostało zilustrowane na Rys. 4.9.



Rys. 4.9 Hierarchiczna reprezentacja systemu transportowego planowania misji floty BSP (opracowanie własne na podstawie literatury [27])

5 Weryfikacja metody

Niniejszy rozdział zawiera opis przeprowadzonych eksperymentów weryfikujących zaproponowaną metodę proaktywno-reaktywnego planowania misji lotu BSP. Badania zostały podzielone na 2 części.

Pierwsza część dotyczy weryfikacji zaproponowanej metody na przykładzie sieci dystrybucji towarów o skali spotykanej w praktyce (39 punktów dostaw oraz 4 BSP). W ramach przeprowadzonych eksperymentów podjęto próbę wyznaczenia proaktywnego planu misji lotów S . Następnie, w trakcie jej realizacji zasymulowano przykładowe sytuacje kryzysowe związane z trzema rodzajami zakłóceń: zmianą warunków pogodowych, wprowadzeniem nowych odbiorców, jak również zmianą okien czasowych. Każde z zakłóceń wymusza inny rodzaj reakcji (zgodnych z algorytmem przedstawionym na Rys. 4.5).

Drugą część poświęcono badaniom ilościowym umożliwiającym określenie wielkości instancji problemu, dla których możliwe jest efektywne (tzn. w trybie on-line) wsparcie planowania lotów floty BSP. Prowadzone badania dotyczyły oceny wykorzystania dostępnych komercyjnie środowisk programowania deklaratywnego (IBM ILOG CPLEX). W szczególności celem przeprowadzonych eksperymentów było porównanie metod dokładnych (IBM ILOG CPLEX) oraz metaheurystycznych (algorytm genetyczny [178]) w kontekście oceny efektywności rozwiązywania spotykanych w praktyce instancji problemów DRVRP. Ocenie podlegał zarówno czas obliczeń jak i otrzymana wartość funkcji celu.

Wszystkie przeprowadzone badania uwzględniały opracowaną relaksację ograniczeń zużycia energii (81), której korzystny wpływ na czas wyznaczania rozwiązania przedstawiono w Tab. 3.3.

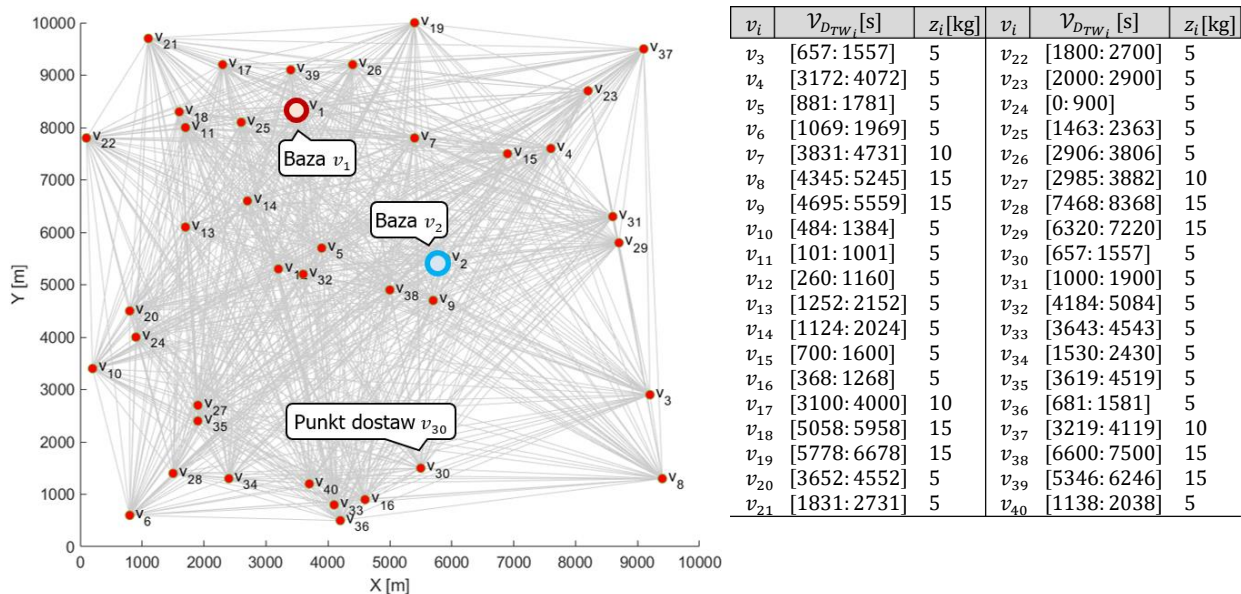
5.1 Planowanie proaktywno-reaktywne

Dana jest sieć transportowa (Rys. 5.1) o powierzchni 100 km^2 składająca się z dwóch baz $\mathcal{V}_B = \{v_1, v_2\}$ oraz 38 punktów dostaw $\mathcal{V}_D = \{v_3, \dots, v_{40}\}$. Dla każdego z nich określono okna czasowe realizacji dostaw: $\mathcal{V}_{DTW_3} \div \mathcal{V}_{DTW_{40}}$.

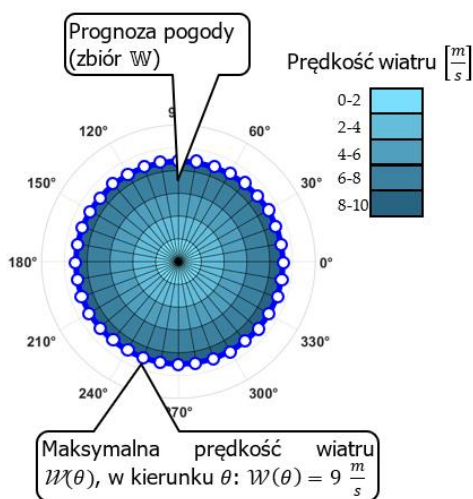
Transport towarów realizowany jest za pośrednictwem floty pięciu jednakowych BSP: $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\}$, gdzie: flota $U^1 = \{u_1, u_2\}$ realizuje dostawy z bazy v_1 , natomiast flota $U^2 = \{u_3, u_4, u_5\}$ realizuje dostawy z bazy v_2 . Przyjęto że 4 BSP ($u_1 - u_4$) są wykorzystywane na etapie planowania misji, natomiast BSP u_5 pełni rolę rezerwowego ($UB = \{u_5\}$). Parametry techniczne BSP przedstawiono w Tab. 5.1.

Zapotrzebowania punktów dostaw z_i przyjmują wartości przedstawione na Rys. 5.1b). Zakłada się, że w czasie realizacji misji panować będą warunki pogodowe przedstawione na Rys. 5.2. Jak można zauważyć maksymalna prognozowana prędkość wiatru (funkcja $\mathcal{W}(\theta)$) nie przekracza $9 \frac{m}{s}$.

Przy tych założeniach poszukiwana jest misja S floty BSP gwarantująca terminowe dostawy (w zakładanym horyzoncie czasowym $H = 2.5h$ (9000s)) wymaganych ilości towaru.



Rys. 5.1 Sieć transportowa a) oraz zdefiniowane zapotrzebowania na towar b) (opracowanie własne)



Rys. 5.2 Prognozowane warunki pogodowe (opracowanie własne)

Tab. 5.1 Parametry techniczne BSP

Parametry techniczne BSP	Wartość	Jednostka
Ładowność Q	25	kg
Pojemność baterii CAP	7500	kJ
Prędkość przelotu v	20	$\frac{m}{s}$
Współczynnik oporu C_D	0.54	–
Powierzchnia czołowa A	1.2	m^2
Szerokość b	8.7	m

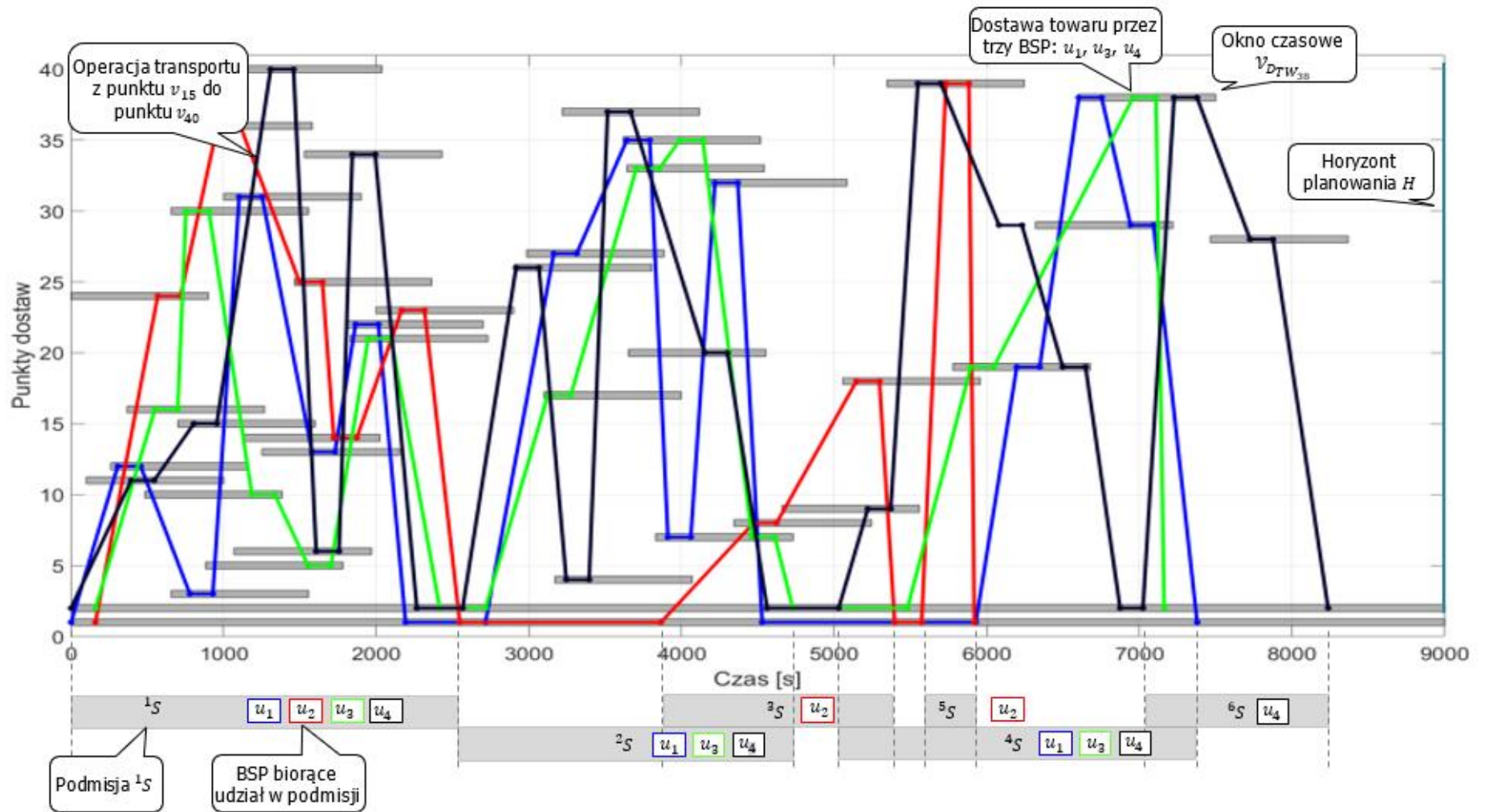
5.1.1 Planowanie proaktywne

W ramach przygotowania planu misji poszukiwana jest odpowiedź na następujące pytanie (Rys. 4.2):

Czy dla zadanej sieci transportowej G (Rys. 5.1) oraz floty $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\}$ istnieje misja S gwarantująca terminową realizację zamówień dla prognozowanych warunków pogodowych $\mathcal{W}(\theta)$ (Rys. 5.2), przy jednoczesnym zużyciu energii BSP nieprzekraczającym 100%?

Odpowiedź na to pytanie wymaga sformułowania i rozwiązania stosownej instancji problemu CS (45). Rozwiązaniem przygotowanej instancji problemu, zaimplementowanego w środowisku programowania deklaratywnego (IBM ILOG CPLEX), jest niepusty zbiór rozwiązań dopuszczalnych ($S \neq \emptyset$). Przykładową realizację misji S zilustrowano na Rys. 5.3. Przedstawiona misja składa się z 6 podmisji $S = ({}^1S, {}^2S, \dots, {}^6S)$. Misję tę wyznaczono przy użyciu jednostki obliczeniowej o parametrach Intel Core i7-M4800MQ 2.7 GHz, 32 GB RAM. Czas obliczeń wyniósł $TC = 18,32s$. Marszruty BSP dla poszczególnych podmisji mają postać:

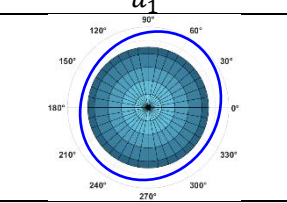
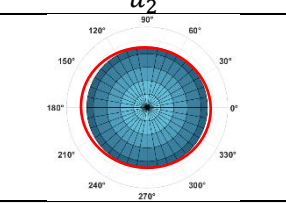
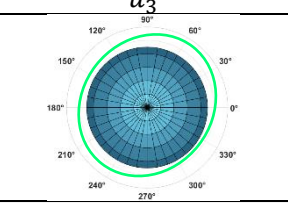
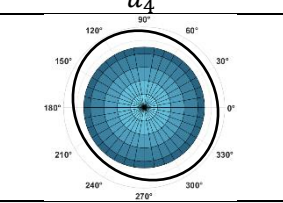
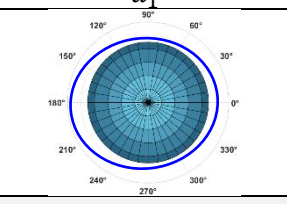
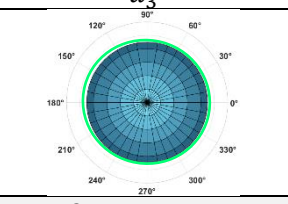
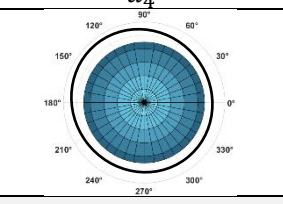
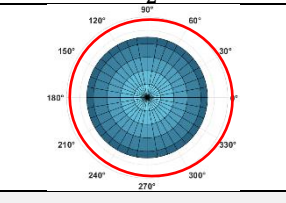
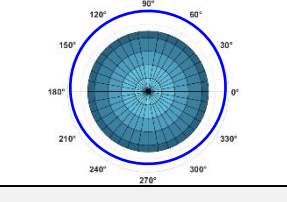
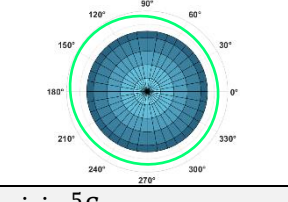
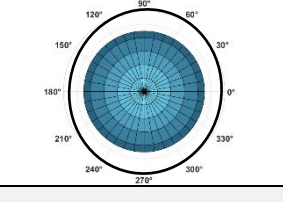
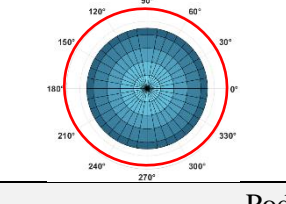
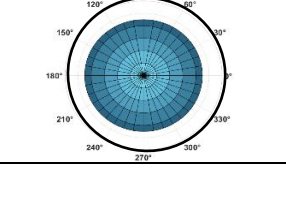
- Podmisja 1S :
 ${}^1\pi_1 = (v_1, v_{12}, v_3, v_{31}, v_{13}, v_{22}, v_1);$
 ${}^1\pi_2 = (v_1, v_{24}, v_{36}, v_{25}, v_{14}, v_{23}, v_1);$
 ${}^1\pi_3 = (v_2, v_{16}, v_{30}, v_{10}, v_5, v_{22}, v_2);$
 ${}^1\pi_4 = (v_2, v_{11}, v_{15}, v_{40}, v_6, v_{34}, v_2);$
- Podmisja 2S :
 ${}^2\pi_1 = (v_1, v_{27}, v_{35}, v_7, v_{32}, v_1);$
 ${}^2\pi_3 = (v_2, v_{17}, v_{33}, v_{35}, v_7, v_2);$
 ${}^2\pi_4 = (v_2, v_{26}, v_4, v_{37}, v_{20}, v_2);$
- Podmisja 3S :
 ${}^3\pi_2 = (v_1, v_{18}, v_8, v_1);$
- Podmisja 4S :
 ${}^4\pi_1 = (v_1, v_{19}, v_{38}, v_{29}, v_1);$
 ${}^4\pi_3 = (v_2, v_{19}, v_{38}, v_2);$
 ${}^4\pi_4 = (v_2, v_9, v_{39}, v_{29}, v_{19}, v_2);$
- Podmisja 5S :
 ${}^5\pi_2 = (v_1, v_{39}, v_1);$
- Podmisja 6S :
 ${}^6\pi_4 = (v_2, v_{38}, v_{28}, v_2).$



Rys. 5.3 Plan proaktywny realizacji misji floty BSP dla sieci z Rys. 5.1 (opracowanie własne)

Ich realizacja zgodnie z planem przedstawionym na Rys. 5.3. gwarantuje terminowe dostawy do wszystkich punktów dostaw. Przyjęty plan misji gwarantuje również odporność na zmiany pogody, w których prędkość wiatru nie przekracza $9 \frac{m}{s}$. Wartości funkcji odporności zilustrowano w Tab. 5.2. Warto zwrócić uwagę, że dla każdej podmisji zachowany jest warunek $Y_{k,l}(\theta) \geq \mathcal{W}(\theta)$.

Tab. 5.2 Wykresy odporności misji floty BSP (opracowanie własne)

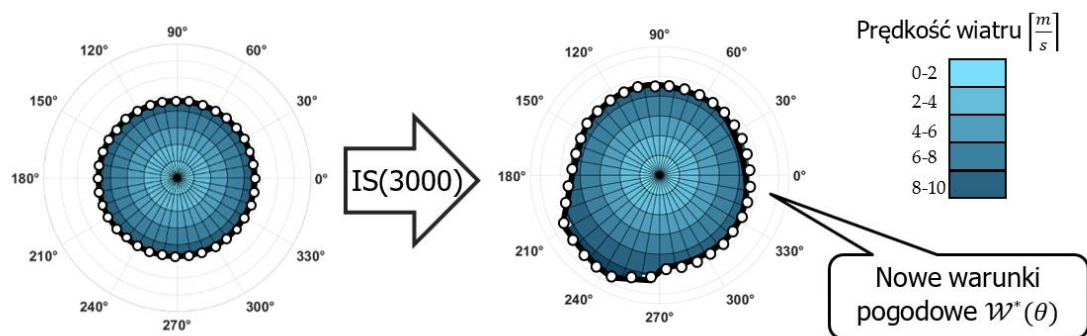
Podmisja 1S			
u_1	u_2	u_3	u_4
			
Podmisja 2S			
u_1	u_2	u_3	u_4
	n/d		
Podmisja 3S			
u_1	u_2	u_3	u_4
n/d		n/d	n/d
Podmisja 4S			
u_1	u_2	u_3	u_4
	n/d		
Podmisja 5S			
u_1	u_2	u_3	u_4
n/d		n/d	n/d
Podmisja 6S			
u_1	u_2	u_3	u_4
n/d	n/d	n/d	

5.1.2 Planowanie reaktywne

Wyznaczony proaktywny plan misji gwarantuje jej realizowalność w zakresie przyjętych, prognozowanych zmian warunków pogodowych. W niniejszym rozdziale przedstawiono rezultaty przeprowadzonych eksperymentów mających na celu weryfikację poprawności opracowanej metodologii planowania reaktywnego w sytuacji występowania wybranych rodzajów zakłóceń.

5.1.2.1 Zmiana warunków pogodowych

W trakcie realizacji planu proaktywnego, w chwili $t^* = 3000s$ (w trakcie trwania misji 2S) następuje nagle zmiana warunków pogodowych, z zakładanych $vw = 9 \frac{m}{s}$ na $vw = 11 \frac{m}{s}$ (w kierunku $\theta = 210^\circ - 230^\circ$) (Rys. 5.4).



Rys. 5.4 Zmiana warunków pogodowych (opracowanie własne)

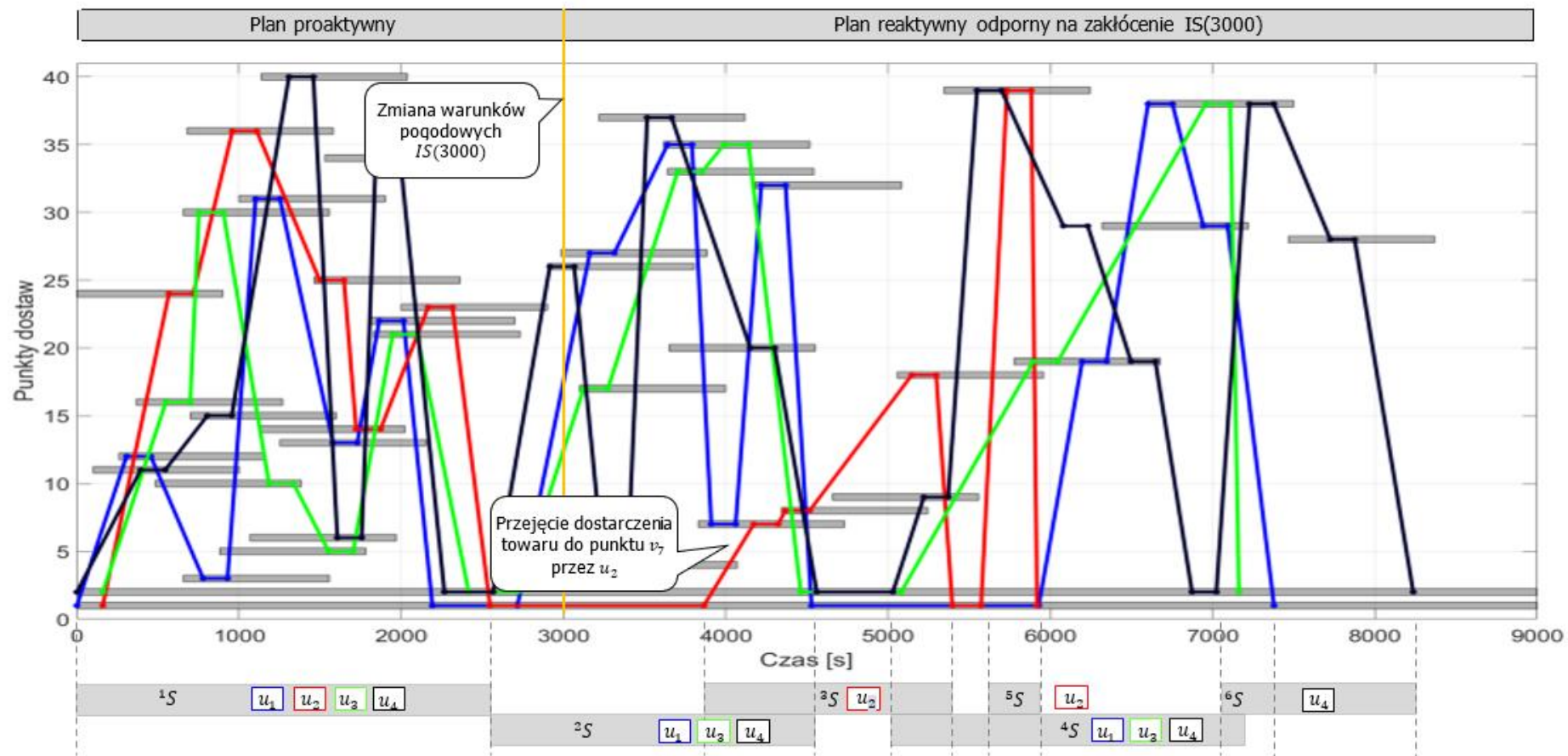
Zmiana warunków pogodowych sprawia, że misja lotu BSP u_3 przestaje być realizowalna ponieważ, w trakcie przelotu z punktu dostaw v_{35} do punktu v_7 dochodzi do przedwczesnego wyczerpania baterii BSP u_3 . W takiej sytuacji poszukiwana jest odpowiedź na następujące pytanie:

Czy istnieje plan misji S , który gwarantuje terminowe dostawy wymaganej ilości towaru w sytuacji wystąpienia zakłócenia $IS(3000)$?

Zgodnie z algorytmem Rys. 4.5, w pierwszej kolejności podjęto próbę oceny, czy istnieje możliwość adaptacji istniejącego planu do nowych warunków (zasada nr 1). Rozwiązaniem odpowiedniego problemu spełnienia ograniczeń był zbiór pusty $S = \emptyset$ (czas obliczeń $TC = 12,83s$) - oznacza to, że konieczne jest zawrócenie u_3 do bazy.

Zgodnie z zasadą nr 2 algorytmu planowania reaktywnego podjęta została próba wyznaczenia planu dla pozostałych BSP $U \setminus UR = \{u_1, u_2, u_4\}$, które kontynuują swoje misje z uwzględnieniem dostawy do punktu v_7 . W rozważanym przypadku zbiór rozwiązań dopuszczalnych zawierał plan misji *S , przedstawiony na Rys. 5.5 (czas obliczeń $TC = 56,24s$).

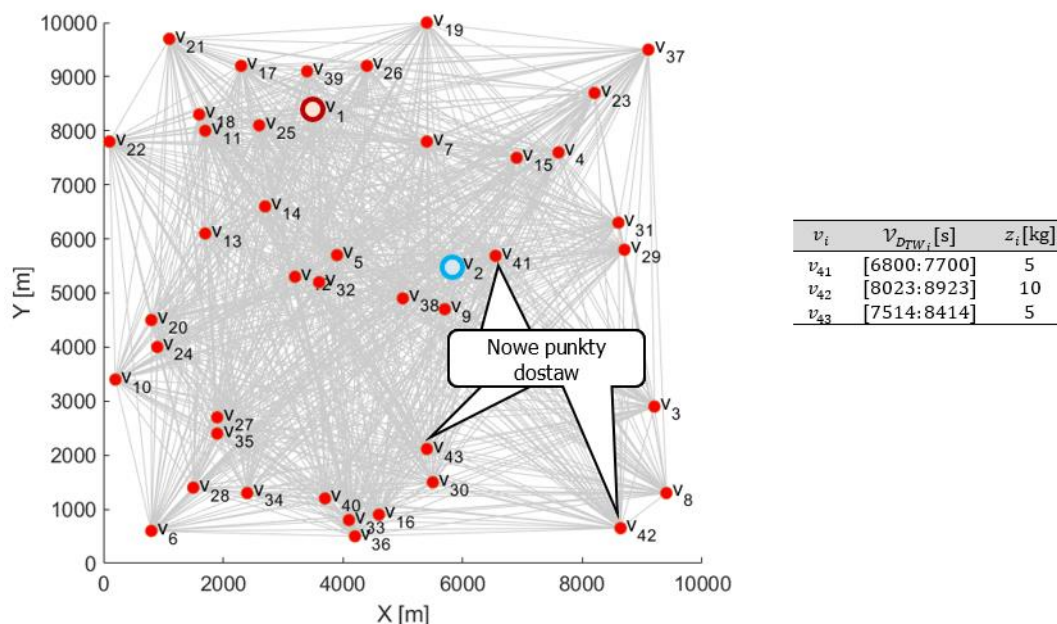
Był to plan, który gwarantował terminowe dostawy do wszystkich punktów w nowych warunkach pogodowych. W analizowanym przypadku towar do punktu v_7 (obsługiwany pierwotnie przez u_3) dostarczany był przez u_2 .



Rys. 5.5 Reaktywny plan misji lotu wyznaczony zgodnie z zasadą nr 2 (opracowanie własne)

5.1.2.2 Wprowadzenie nowych odbiorców do sieci transportowej

W trakcie realizacji planu proaktywnego, w chwili $t^* = 6500s$, w trakcie trwania misji 4S otrzymano informację o pojawieniu się 3 nowych odbiorców v_{41}, v_{42}, v_{43} . Ich lokalizację, zapotrzebowanie na towar oraz okna czasowe przedstawiono na Rys. 5.6.



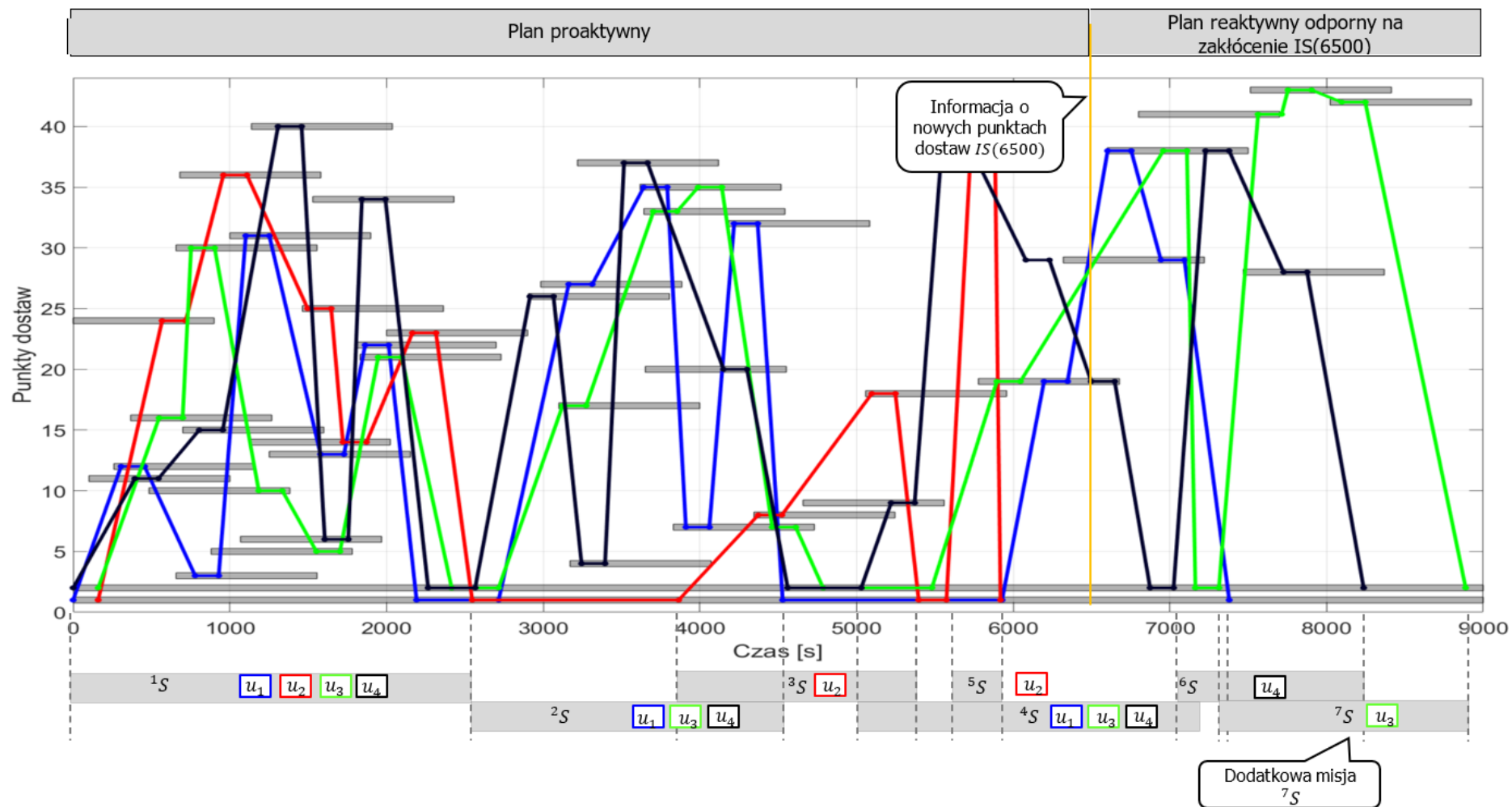
Rys. 5.6 Sieć transportowa a) oraz zdefiniowane zapotrzebowania na towar nowych punktów dostaw b) (opracowanie własne)

Wprowadzenie nowych punktów dostaw implikuje dezaktualizację dotychczas realizowanego proaktywnego planu misji S (nie gwarantującego już dostarczenia wymaganej ilości towarów do wszystkich punktów). Oznacza to konieczność poszukiwania odpowiedzi na pytanie:

Czy istnieje plan misji S , który gwarantuje terminowe dostawy wymaganej ilości towaru w sytuacji wystąpienia zakłócenia $IS(6500)$?

Zgodnie z algorytmem Rys. 4.5, w pierwszej kolejności podjęto próbę oceny, czy istnieje możliwość adaptacji istniejącego planu do nowych warunków (zasada nr 1). Rozwiązaniem odpowiedniego problemu spełnienia ograniczeń był niepusty zbiór $S \neq \emptyset$ (czas obliczeń $TC = 85,15s$). Oznaczało to, że pojawienie się nowych punktów dostaw nie wymagało reharmonogramowania planu proaktywnego – i ograniczało się jedynie do jego rozszerzenia. W rozważanym przypadku zbiór rozwiązań dopuszczalnych zawierał plan misji *S , przedstawiony na Rys. 5.7.

Jest to plan, który gwarantuje terminowe dostawy do wszystkich punktów (uwzględniając w tym nowych odbiorców). W analizowanym przypadku towar do punktów v_{41}, v_{42}, v_{43} dostarczany jest przez u_3 .



Rys. 5.7 Reaktywny plan misji lotu wyznaczony zgodnie z zasadą nr 1 (opracowanie własne)

5.1.2.3 Zmiana zleceń

W trakcie realizacji planu proaktywnego, w chwili $t = 1000$ (w trakcie trwania misji 1S) nastąpiła zmiana terminu dostaw (okna czasowego) w punkcie v_{28} z $\mathcal{V}_{D_{TW_{28}}} = [7468; 8368]$ na ${}^*\mathcal{V}_{D_{TW_{28}}} = [1245; 2145]$.

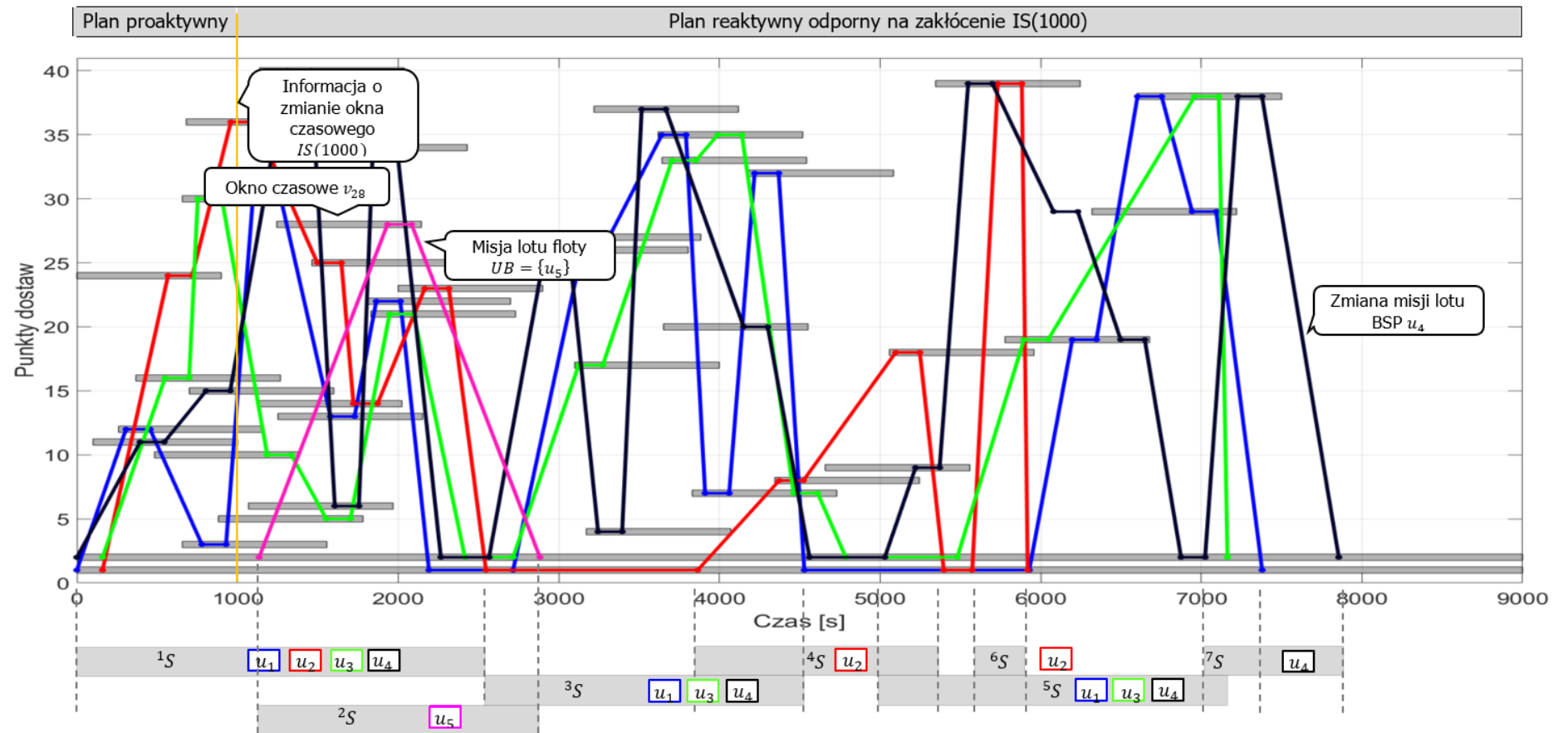
Zmiana terminu dostaw sprawia, że dotychczas realizowany proaktywny plan misji S nie może być kontynuowany, ponieważ nie uwzględnia dostawy towaru do punktu v_{28} w nowym oknie czasowym ${}^*\mathcal{V}_{D_{TW_{28}}}$. W sytuacji tej poszukiwana jest odpowiedź na pytanie:

Czy istnieje plan misji S , który gwarantuje terminowe dostawy wymaganej ilości towaru w sytuacji wystąpienia zakłócenia $IS(1000)$?

Zgodnie z algorytmem z Rys. 4.5, w pierwszej kolejności podjęto próbę odpowiedzi na pytanie: czy istnieje możliwość adaptacji istniejącego planu do nowych warunków (zasada nr 1). Rozwiązaniem odpowiedniego problemu spełnienia ograniczeń był pusty zbiór $\mathbb{S} = \emptyset$ (czas obliczeń $TC = 13,81s$). Oznacza to, że aktualnie realizowanego planu nie można było zaadaptować do sytuacji uwzględniającej nowy termin dostawy do punktu v_{28} . Zasada nr 2 również nie znajduje tutaj swojego zastosowania, ponieważ flota BSP U nie jest w stanie dostarczyć towaru do węzła v_{28} (wyznaczony plan proaktywny misji 1S , zakłada, że łączny ciężar dostarczonych w ramach tej misji towarów jest równy całkowitej pojemności floty U (100 kg)).

W bazie znajdował się rezerwowany BSP $UB = \{u_5\}$, który zgodnie z zasadą nr 3 mógł wesprzeć realizację misji przez flotę $U \setminus UR$. W rozważanym przypadku zbiór rozwiązań dopuszczalnych zawierał plan misji *S , przedstawiony na Rys. 5.8.

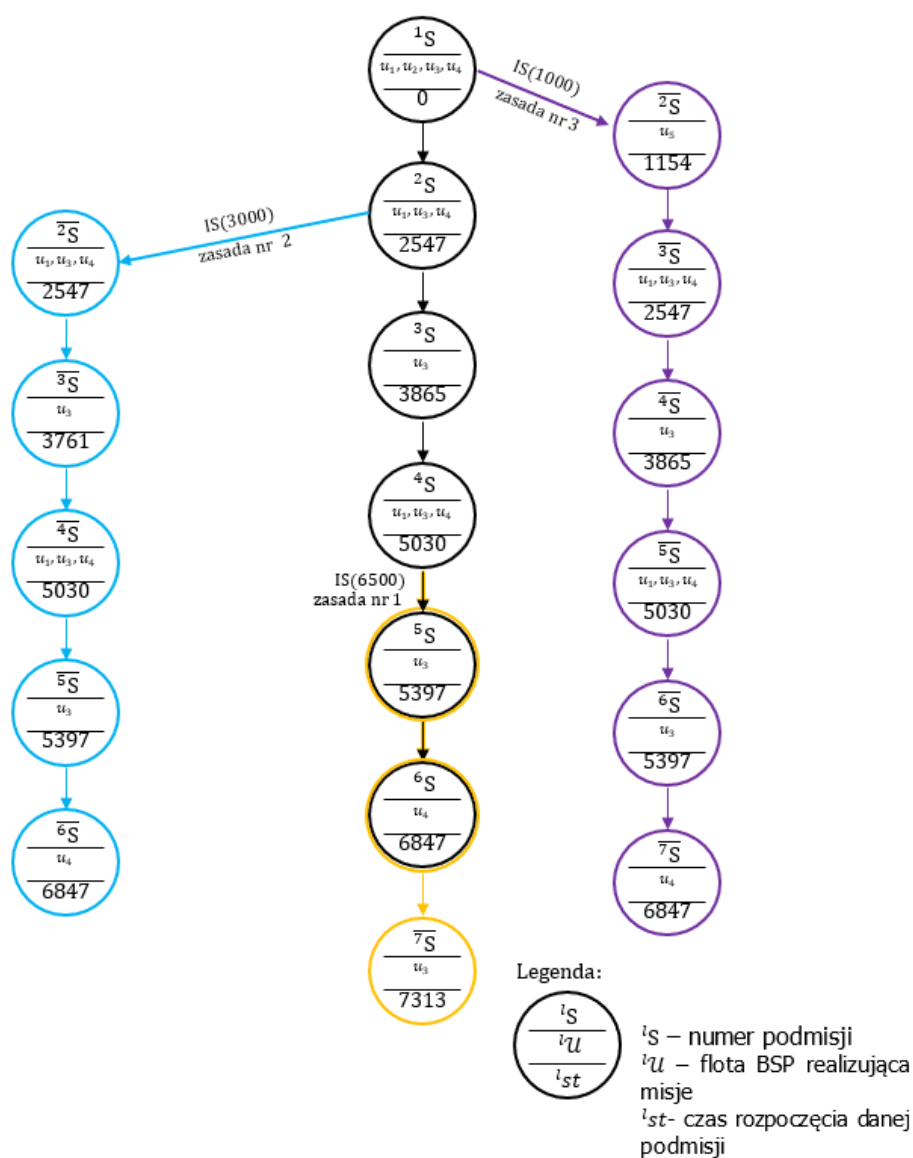
Był to plan gwarantujący terminowość dostaw uwzględniający zmianę terminów okna czasowego dla punktu v_{28} . W analizowanym przypadku transport towaru do punktu v_{28} realizowany był przez u_5 .



Rys. 5.8 Reaktywny plan misji lotu wyznaczony zgodnie z zasadą nr 3

5.1.3 Podsumowanie

W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki badań poświęconych proaktywno-reaktywnemu planowaniu misji floty BSP. Pierwszym etapem testów opracowanej metody było wyznaczenie misji S (dla sieci transportowej G złożonej z 38 punktów dostaw oraz floty 5 BSP) przy wykorzystaniu metody planowania proaktywnego. Następnie zasymulowane zostały trzy rodzaje zakłóceń: zmiana warunków pogodowych, pojawienie się nowych odbiorców oraz zmiana terminów dostaw (okien czasowych). Dla każdego z nich poszukiwana była odpowiedź na pytanie: *Czy istnieje plan misji S , który gwarantuje terminowe dostawy wymaganej ilości towaru w sytuacji wystąpienia zakłócenia $IS(t^*)$?* Poszukując odpowiedzi wykorzystano algorytm reaktywnego planowania misji (Rys. 4.5). Dla każdego z trzech zasymulowanych zakłóceń zbudowano instancje problemu, które zostały zaimplementowane w środowisku programowania z ograniczeniami (IBM ILOG CPLEX). Scenariusz przeprowadzonych eksperymentów zilustrowano na Rys. 5.9.



Rys. 5.9 Graficzna reprezentacja scenariusza testowego (opracowanie testów)

Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że zaproponowana metoda proaktywno-reaktywnego planowania misji lotów umożliwia proaktywne wyznaczanie planów misji floty BSP, jak również ich reharmonogramowania (w sytuacjach powodowanych wystąpieniem zakłócenia $IS(t^*)$) w trybie on-line (czas obliczeń nie przekroczył 600s).

5.2 Eksperymenty obliczeniowe

5.2.1 Ocena skalowalności

W celu oceny skalowalności proponowanego podejścia pod kątem możliwości jego wykorzystania w trybie on-line (tj. czas znalezienia rozwiązania $t < 600s$) w systemach wspomagania decyzji przeprowadzono szereg testów ilościowych. W tabelach 5.4, 5.5, 5.6 zebrano wyniki przeprowadzonych eksperymentów dla trzech funkcji prognozowanej pogody $\mathcal{W}_1(\theta) = 9 \frac{m}{s}$, $\mathcal{W}_2(\theta) = 10 \frac{m}{s}$, $\mathcal{W}_3(\theta) = 11 \frac{m}{s}$ sieci transportowej G złożonej z $n = 40, 60, \dots, 220$ losowo wyznaczonych punktów dostaw (na obszarze $100 km^2$) oraz floty U złożonej z $m = 2, 3, 4$ jednakowych BSP. Parametry techniczne BSP przedstawiono w Tab. 5.3. Dla każdego z wariantów sieci wyznaczono proaktywny plan misji gwarantujący dostawy w założonym horyzoncie czasowym $H = 10000s$.

Założono, że w chwili $t^* = 2000s$ występuje zakłócenie ($IS(2000)$) polegające na zmianie prognozy pogody trwającej aż do zakończenia misji. Zmiana warunków pogodowych dotyczy zwiększenia oczekiwanej prędkości wiatru o $2 \frac{m}{s}$, w związku z tym: $\mathcal{W}_1^*(\theta) = 11 \frac{m}{s}$, $\mathcal{W}_2^*(\theta) = 12 \frac{m}{s}$, $\mathcal{W}_3^*(\theta) = 13 \frac{m}{s}$.

W ramach przeprowadzanych eksperymentów poszukiwane były reaktywne plany misji gwarantujące ich realizowalność dla każdego z wariantu sieci transportowej dla nowych warunków pogodowych $\mathcal{W}^*(\theta)$. Należy podkreślić, że rozwiązywany był problem optymalizacyjny COP (46), którego celem było wyznaczenie misji gwarantującej maksymalną satysfakcję klientów wystąpieniu zakłócenia. Satysfakcja klienta rozumiana jest jako suma iloczynu łącznego ciężaru towaru dostarczonego do węzła v_i (w trakcie realizacji podmisji lS) oraz zadanego priorytetu punktu dostaw (patrz równanie (47)). Przyjęcie optymalizacyjnego wariantu problemu DRVRP pozwoliło na porównanie stosowanych metod dokładnych (programowanie z ograniczeniami) z metodami przybliżonymi (algorytm genetyczny).

Tab. 5.3 Parametry techniczne BSP

Parametry techniczne BSP	Wartość	Jednostka
Ładowność Q	25	kg
Pojemność baterii CAP	7500	kJ
Prędkość przelotu v	20	$\frac{m}{s}$
Współczynnik oporu C_D	0.54	–
Powierzchnia czołowa A	1.2	m^2
Szerokość b	8.7	m

5.2.2 Metody przybliżone i dokładne

W ramach przeprowadzonych eksperymentów porównano efektywność metody dokładnej zaimplementowanej w środowisku programowania z ograniczeniami IBM ILOG CPLEX (w skrócie ILOG) z metodą metaheurystyczną (zaimplementowany w środowisku Matlab algorytm genetyczny (w skrócie GA)) w kontekście optymalizacji poszukiwanego rozwiązywania problemu DRVRP.

Dla poszczególnych metod przyjęto następujące warunki stopu:

- Warunek stopu procedury poszukiwania rozwiązania implementowanej w środowisku programowania z ograniczeniami (IBM ILOG CPLEX):
 - $C0$ – osiągnięto rozwiązanie optymalne f_0^{ILOG} , lub przekroczone czas (600s) założony dla trybu on-line.
- Warunki stopu procedury poszukiwania rozwiązania implementowanej w autorskiej wersji algorytmu genetycznego (szczegółowy opis przedstawiono w publikacji [178]):
 - $C1$ – wartość funkcji celu f_0^{GA} osiągnęła wartość rozwiązania optymalnego ($f_0^{GA} = f_0^{ILOG}$) (patrz warunek stopu $C0$);
 - $C2$ – przez okres 10 pokoleń ($q = 10$) wartość funkcji celu f_0^{GA} jest wartością stałą;
 - $C3$ – liczba pokoleń osiągnęła wartość graniczną $le: j = 200$.

Parametry algorytmu: rozmiar populacji $LP = 1000$; prawdopodobieństwo selekcji $ps = 0,25$; prawdopodobieństwo mutacji $pm = 0,01$.

Zgodnie z przyjętymi założeniami obie metody (dla różnych warunków stopu $C1-C3$) wykorzystano do wyznaczania planu reaktywnego gwarantującego realizowalność misji w nowych warunkach pogodowych ($\mathcal{W}_1^*(\theta) = 11 \frac{m}{s}$, $\mathcal{W}_2^*(\theta) = 12 \frac{m}{s}$, $\mathcal{W}_3^*(\theta) = 13 \frac{m}{s}$). Zbiorcze wyniki przeprowadzonych eksperymentów zestawiono w tabelach Tab. 5.4, Tab. 5.5, Tab. 5.6.

Tab. 5.4 Wyniki eksperymentów przeprowadzonych dla $\mathcal{W}_1(\theta) = 9 \frac{m}{s}, \forall \theta \in [0^\circ, 360^\circ)$

		$\mathcal{W}_1(\theta) = 9 \frac{m}{s}, \forall \theta \in [0^\circ, 360^\circ)$													
		ILOG		Algorytm genetyczny											
				C1				C2				C3			
n	m	TC	f_0^{ILOG}	mT	σ	f_0^{GA}	%	mT	σ	f_0^{GA}	%	mT	σ	f_0^{GA}	%
40	2	2,17	300	60	34,214	300	100	0,06	0,015	205	68,33	58,51	0,45	285	95,00
	3	3,73	450	15,45	4,726	450	100	5,68	1,883	300	66,67	78,37	23,258	330	73,33
	4	151,69	600	11,27	4,472	600	100	15,69	0,236	355	59,17	111,36	1,133	420	70,00
60	2	6,62	300	57,33	27,25	300	100	5,28	1,903	240	80,00	92,11	0,577	285	95,00
	3	34,25	450	3,52	8,94	450	100	9,78	0,264	275	61,11	142,55	0,618	375	83,33
	4	230	600	14,86	5,613	600	100	24,17	0,592	385	64,17	212,7	1,009	435	72,50
80	2	11,1	300	68,7	35,29	300	100	8,52	0,059	240	80,00	141,76	0,585	270	90,00
	3	80	450	25,7	12,96	450	100	16,05	0,307	355	78,89	230,05	0,934	390	86,67
	4	382,29	600	20,97	12,468	600	100	34,66	0,89	360	60,00	339,92	1,729	420	70,00
100	2	53,41	300	23,03	6,041	300	100	12,39	0,064	220	73,33	212,62	1,625	270	90,00
	3	131	450	31	0,407	450	100	23,68	0,435	320	71,11	318,17	3,49	360	80,00
	4	t>600	✗	29,24	15,966	600	100	71,84	1,832	345	57,50	600	2,834	480	80,00
120	2	64,56	300	70	9,36	300	100	30,57	0,118	265	88,33	272,3	1,079	300	100,00
	3	226,34	450	34	0,997	450	100	70,12	1,282	330	73,33	591,49	2,769	370	82,22
	4	t>600	✗	29	22,613	600	100	136,26	1,768	360	60,00	t>600	✗	✗	✗
140	2	136,67	300	42	17,73	300	100	65,05	0,059	255	85,00	495,11	0,75	285	95,00
	3	599,32	450	21,68	1,25	450	100	62,51	1,03	335	74,44	t>600	✗	✗	✗
	4	t>600	✗	66,53	26,45	600	100	143,45	0,74	375	62,50	t>600	✗	✗	✗
160	2	368,99	300	40,21	22,58	300	100	43,19	0,43	225	75,00	599,98	0,58	300	100,00
	3	t>600	✗	24,11	7,06	450	100	78,12	1,01	315	70,00	t>600	✗	✗	✗
	4	t>600	✗	81	37,04	600	100	180,77	1,43	380	63,33	t>600	✗	✗	✗
180	2	415,55	300	91	15,15	300	100	54,27	0,47	285	95,00	t>600	✗	✗	✗
	3	t>600	✗	37	12,55	450	100	103,34	0,98	290	64,44	t>600	✗	✗	✗

	4	t>600	×	119,66	45,72	600	100	241,23	1,6	375	62,50	t>600	×	×	×
200	2	576,72	300	65,66	8,2	300	100	66,61	0,74	250	83,33	t>600	×	×	×
	3	t>600	×	38,7	6,54	450	100	133,09	0,67	305	67,78	t>600	×	×	×
	4	t>600	×	171,35	61,81	600	100	318,89	1,7	360	60,00	t>600	×	×	×
220	2	t>600	×	79,22	11,21	300	100	82,72	1,59	225	75,00	t>600	×	×	×
	3	t>600	×	49,89	8,73	450	100	156,67	1,01	290	64,44	t>600	×	×	×
	4	t>600	×	200,73	78,4	600	100	363,03	1,65	350	58,33	t>600	×	×	×

n – liczba węzłów (punktów dostaw); m – rozmiar floty BSP; TC – czas obliczeń dla ILOG; mT – średni czas obliczeń dla algorytmu genetycznego; σ – odchylenie standardowe czasu obliczeń; f_0 – wartość funkcji celu; % - procentowa ocena różnicy jakości rozwiązania dla IBM ILOG CPLEX oraz dla algorytmu genetycznego: $\frac{f_0^{GA}}{f_0^{ILOG}}$ [%]

Tab. 5.5 Wyniki eksperymentów przeprowadzonych dla $\mathcal{W}_2(\theta) = 10 \frac{m}{s}, \forall \theta \in [0^\circ, 360^\circ]$

		$\mathcal{W}_2(\theta) = 10 \frac{m}{s}, \forall \theta \in [0^\circ, 360^\circ]$													
		ILOG		Algorytm genetyczny											
				C1				C2				C3			
n	K	TC	f_0^{ILOG}	mT	σ	f_0^{GA}	%	mT	σ	f_0^{GA}	%	mT	σ	f_0^{GA}	%
40	2	3,845	300	48,2	14,928	300	100	3,26	1,592	235	78,33	47,85	18,871	255	85,00
	3	5,131	450	2,45	3,773	450	100	6,2	1,838	275	61,11	71,74	18,385	390	86,67
	4	40,021	555	13,46	34,729	600	100	18,27	0,51	350	58,33	107,18	8,773	405	67,50
60	2	7,859	300	65,32	21,081	300	100	5,67	1,771	215	71,67	83,56	16,7	270	90,00
	3	28,583	450	4,14	6,781	450	100	10,51	1,666	305	67,78	132,41	10,643	370	82,22
	4	394,009	600	17,67	12,881	600	100	28,24	1,576	340	56,67	200,59	6,408	410	68,33
80	2	18,647	300	25	3,83	300	100	9,13	0,614	255	85,00	135,9	16,463	285	95,00
	3	167,592	450	5,7	4,599	450	100	16,26	0,625	310	68,89	216,76	7,469	400	88,89
	4	t>600	×	23,07	6,502	600	100	40,63	0,607	350	58,33	318,51	1,111	370	61,67
100	2	49,724	300	3,04	26,858	300	100	12,5	1,027	240	80,00	197,63	13,839	285	95,00
	3	49,194	450	145	10,953	450	100	25,42	1,213	295	65,56	317,09	1,416	355	78,89
	4	t>600	×	152	12,186	600	100	79,71	1,639	375	62,50	t>600	×	×	×
120	2	52,216	300	196	0,912	300	100	17,39	1,71	235	78,33	271,71	2,794	285	95,00
	3	t>600	×	212	8,147	450	100	45,84	0,991	310	68,89	t>600	×	×	×
	4	t>600	×	61,28	7,747	600	100	103,37	1,571	350	58,33	t>600	×	×	×
140	2	131,188	300	9,71	10,639	300	100	32,44	1,324	225	75,00	499,47	7,476	280	93,33
	3	t>600	60	21,54	3,511	450	100	61,14	0,935	315	70,00	t>600	×	×	×
	4	t>600	×	83,21	3,003	600	100	144,88	1,046	390	65,00	t>600	×	×	×
160	2	356,773	300	10,24	5,985	300	100	42,83	0,453	255	85,00	t>600	×	×	×
	3	t>600	×	28,05	4,633	450	100	80,28	1,808	315	70,00	t>600	×	×	×
	4	t>600	×	65	6,726	600	100	202,13	0,641	400	66,67	t>600	×	×	×
180	2	541,505	300	98	15,498	300	100	53,36	1,072	225	75,00	t>600	×	×	×
	3	t>600	×	35,02	8,192	450	100	102,86	0,62	330	73,33	t>600	×	×	×
	4	t>600	×	150,85	8,599	600	100	268	1,556	365	60,83	t>600	×	×	×
200	2	599,257	300	19,27	0,625	300	100	72,3	1,418	245	81,67	t>600	×	×	×
	3	t>600	×	44,91	1,009	450	100	135,6	1,036	305	67,78	t>600	×	×	×
	4	t>600	×	202,68	1,436	600	100	354,15	1,509	365	60,83	t>600	×	×	×
220	2	t>600	×	19,37	0,54	300	100	81,89	0,754	235	78,33	t>600	×	×	×
	3	t>600	×	57,78	5,329	450	100	165,16	1,751	300	66,67	t>600	×	×	×
	4	t>600	×	239,33	0,801	600	100	428,7	0,626	365	60,83	t>600	×	×	×

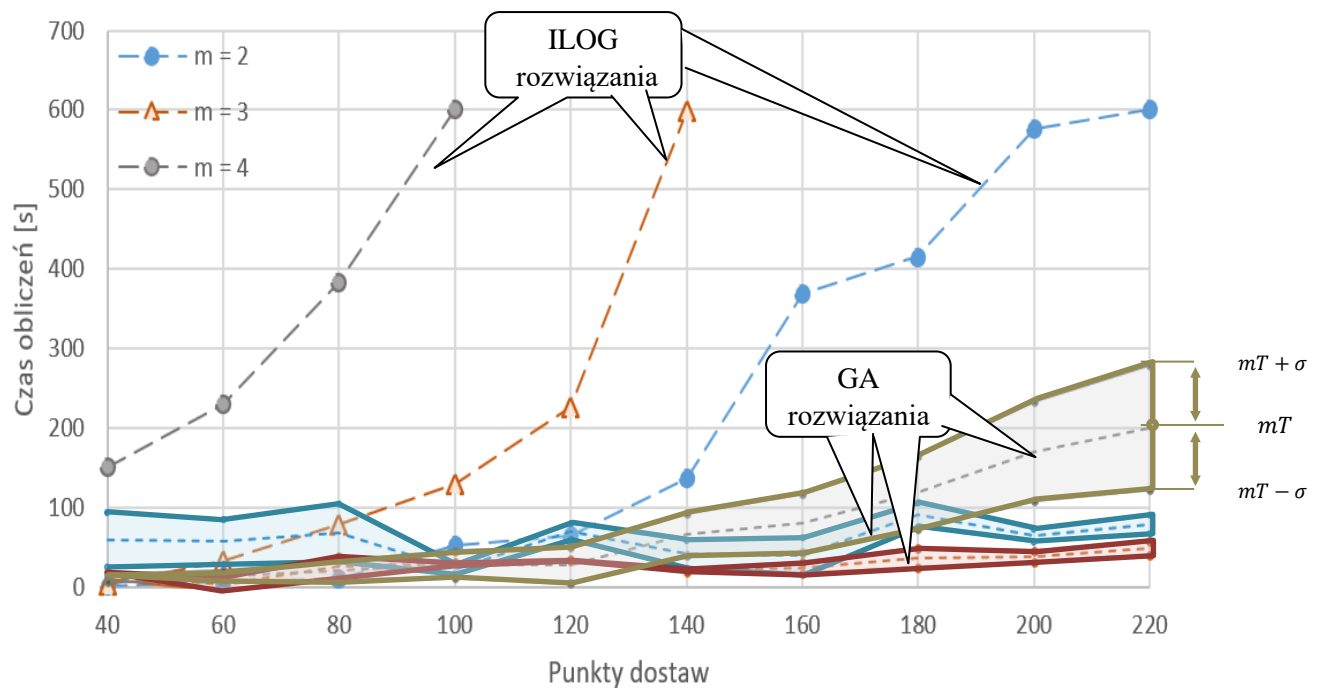
n – liczba węzłów (punktów dostaw); m – rozmiar floty BSP; TC – czas obliczeń dla ILOG; mT – średni czas obliczeń dla algorytmu genetycznego; σ – odchylenie standardowe czasu obliczeń; f_0 – wartość funkcji celu; % - procentowa ocena różnicy jakości rozwiązania dla IBM ILOG CPLEX oraz dla algorytmu genetycznego: $\frac{f_0^{GA}}{f_0^{ILOG}}$ [%]

Tab. 5.6 Wyniki eksperymentów przeprowadzonych dla $\mathcal{W}_3(\theta) = 11 \frac{m}{s}, \forall(\theta) \in [0^\circ, 360^\circ)$

		$\mathcal{W}_3(\theta) = 11 \frac{m}{s}, \forall \theta \in [0^\circ, 360^\circ)$													
		ILOG			Algorytm genetyczny										
		C1				C2				C3					
n	K	TC	f_0^{ILOG}	mT	σ	f_0^{GA}	%	mT	σ	f_0^{GA}	%	mT	σ	f_0^{GA}	%
40	2	3,957	300	96	30,905	300	100	3,53	1,058	225	75,00	47,771	21,925	270	90,00
	3	5,599	450	9,32	34,56	450	100	6,95	1,37	270	60,0	71,685	20,719	330	73,33
	4	342,59	555	19,72	31,30	600	100	24,3	1,78	390	65,00	112,225	16,231	390	65,00
60	2	6,845	300	32	7,138	300	100	6,11	1,083	205	68,33	83,249	21,772	255	85,00
	3	12,292	450	45,61	9,525	450	100	11,43	0,841	270	60,00	131,21	14,801	325	72,22
	4	29,543	600	25,54	10,312	600	100	38,16	1,102	330	55,00	204,368	14,424	385	64,17
80	2	14,705	300	12	11,621	300	100	9,85	1,296	220	73,33	134,987	16,747	285	95,00
	3	31,342	450	7,27	6,468	450	100	18,72	1,435	285	63,33	213,583	15,717	345	76,67
	4	464,70	✗	32,29	5,84	600	100	53,94	1,32	365	60,83	332,77	21,899	440	73,33
100	2	47,528	300	3,73	5,277	300	100	14,25	0,485	240	80,00	196,489	5,106	285	95,00
	3	▷600	✗	24	5,703	450	100	26,79	1,146	300	66,67	320,935	17,292	405	90,00
	4	▷600	✗	36	5,605	600	100	105,38	1,101	350	58,33	▷600	✗	✗	✗
120	2	69,069	300	58	12,056	300	100	20,05	1,357	250	83,33	272,852	22,023	285	95,00
	3	271,93	450	18,2	5,425	450	100	47,08	1,23	305	67,78	595,066	20,186	360	80,00
	4	486,909	600	35	1,515	600	100	119,51	1,746	365	60,83	▷600	✗	✗	✗
140	2	93,477	300	98	8,019	300	100	33,55	1,701	225	75,00	493,384	5,415	270	90,00
	3	476,9	450	24,52	5,884	450	100	62,62	1,753	310	68,89	▷600	✗	✗	✗
	4	578,965	600	118,43	3,601	600	100	164,53	1,592	340	56,67	▷600	✗	✗	✗
160	2	155,018	300	12,71	6,243	300	100	43,23	1,808	235	78,33	▷600	✗	✗	✗
	3	▷600	✗	32,04	1,503	450	100	85,6	0,579	295	65,56	▷600	✗	✗	✗
	4	▷600	✗	154	5,646	600	100	226,91	1,781	370	61,67	▷600	✗	✗	✗
180	2	351,507	300	222	30,871	300	100	53,73	0,867	220	73,33	▷600	✗	✗	✗
	3	▷600	✗	40,46	3,673	450	100	102,23	0,861	285	63,33	▷600	✗	✗	✗
	4	▷600	✗	193,15	18,532	600	100	292,14	1,027	410	68,33	▷600	✗	✗	✗
200	2	584,659	300	50	0,621	300	100	66,79	1,518	220	73,33	▷600	✗	✗	✗
	3	▷600	✗	48	1,259	450	100	129,77	1,351	330	73,33	▷600	✗	✗	✗
	4	▷600	✗	281,58	1,426	600	100	420,34	0,77	345	57,50	▷600	✗	✗	✗
220	2	▷600	✗	23,56	0,7	300	100	82,01	1,361	220	73,33	▷600	✗	✗	✗
	3	▷600	✗	65,46	1,086	450	100	167,36	0,671	310	68,89	▷600	✗	✗	✗
	4	▷600	✗	331,64	1,112	600	100	485,18	0,854	365	60,83	▷600	✗	✗	✗

n – liczba węzłów (punktów dostaw); m – rozmiar floty BSP; TC – czas obliczeń dla ILOG; mT – średni czas obliczeń dla algorytmu genetycznego; σ – odchylenie standardowe czasu obliczeń; f_0 – wartość funkcji celu; % - procentowa ocena różnicy jakości rozwiązania dla IBM ILOG CPLEX oraz dla algorytmu genetycznego: $\frac{f_0^{GA}}{f_0^{ILOG}} [\%]$

Wyznaczanie rozwiązania optymalnego. W pierwszej kolejności dokonano porównania czasów obliczeń wymaganych do uzyskania rozwiązania optymalnego. W przypadku środowiska IBM ILOG CPLEX zastosowano warunek stopu C0, a dla algorytmu genetycznego warunek stopu C1. Wyniki przeprowadzonych eksperymentów zestawiono w Tab. 5.4 (kolumna ILOG oraz kolumna C1) oraz zilustrowano na Rys. 5.10.



Rys. 5.10 Porównanie czasu obliczeń dla środowiska IBM ILOG CPLEX oraz algorytmu genetycznego (warunek stopu C1) dla $\mathcal{W}_1(\theta) = 9 \frac{m}{s}, \forall \theta \in [0^\circ, 360^\circ)$

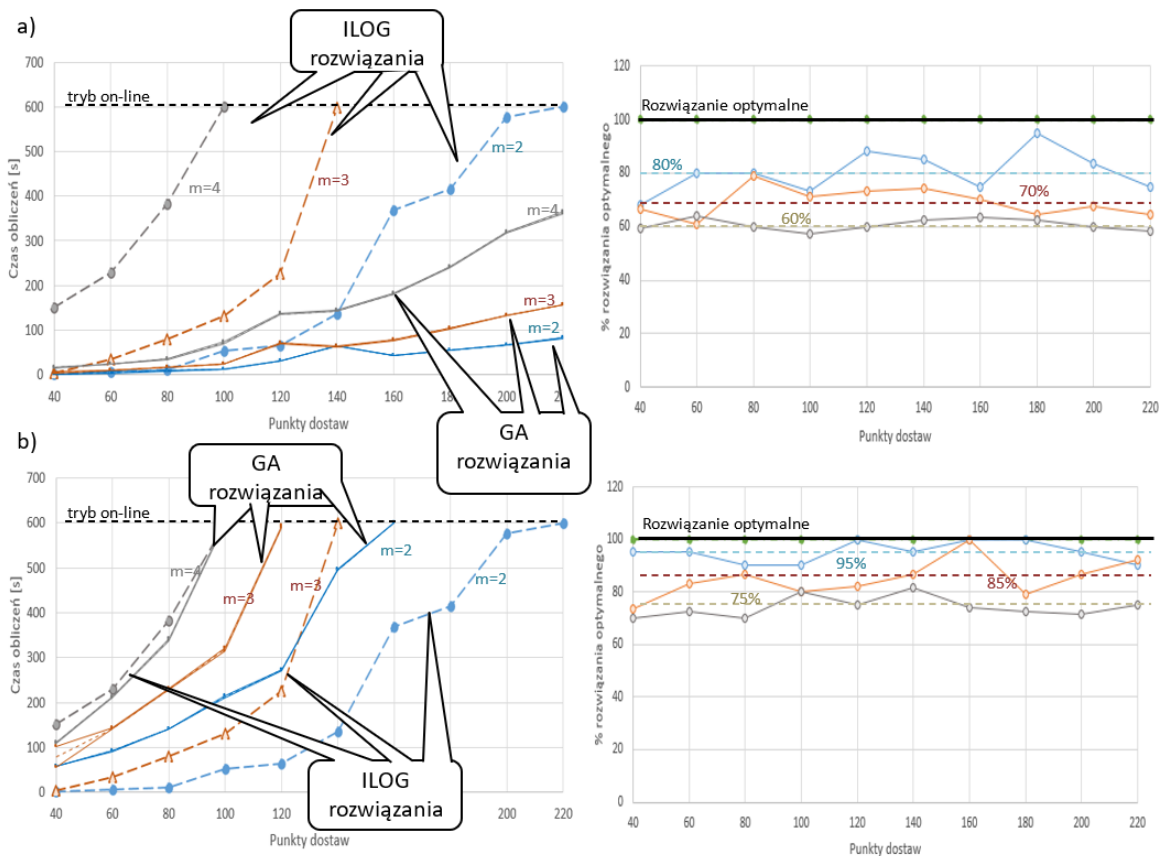
Obliczenia przeprowadzono dla warunków pogodowych określonych funkcją $\mathcal{W}_1(\theta) = 9 \frac{m}{s}, \forall \theta \in [0^\circ, 360^\circ)$. Zakłócenie (dla którego poszukuje się planu reaktywnego) polega na zmianie prędkości wiatru na $\mathcal{W}_1^*(\theta) = 11 \frac{m}{s}$.

Wyznaczenie rozwiązania optymalnego (47) w środowisku IBM ILOG CPLEX związane jest z dużym nakładem czasowym (problem należy do klasy *NP – trudnych*). Skala problemów (liczba punktów dostaw n), dla których możliwe jest określenie rozwiązania w trybie on-line ($t < 600s$) maleje wraz ze wzrostem wielkości floty BSP i wynosi: $n = 220$ dla $m = 2$; $n = 140$ dla $m = 3$; oraz $n = 100$ dla $m = 4$.

Wyznaczanie planów reaktywnych dla zadanych wartości funkcji celu (wartości optymalnych otrzymywanych ze środowiska ILOG) z wykorzystaniem zaimplementowanego algorytmu genetycznego wymaga z kolei znacznie krótszego czasu obliczeń.

Rozwiązania, dla wszystkich wariantów sieci, otrzymano w czasie $t < 300s$. Linia przerywaną zaznaczono wartości średnie czasu obliczeń mT , linią ciągłą oznaczono zakres zmienności ($mT \pm \sigma$) – Rys. 5.10. Kolejne eksperymenty przeprowadzono przy założeniu, że wartość funkcji celu jest nieznaną (zastosowane warunki stopu to C2 i C3).

Na Rys. BB przedstawiono wyniki eksperymentów, w których założono koniec obliczeń algorytmu genetycznego w momencie spełnienia warunku stopu C2 (Rys. 5.11a) oraz C3 (Rys. 5.11b) – dane z Tab. 5.4(kolumny C2 oraz C3). W pierwszym przypadku (podobnie jak poprzednio), czasy wymagane dla wyznaczenia rozwiązania dla algorytmu genetycznego nie przekraczają $TC < 400s$ przy skali sieci $n \leq 220$.



Rys. 5.11 Porównanie wyników eksperymentów przeprowadzonych dla środowiska IBM ILOG CPLEX oraz algorytmu genetycznego (warunek stopu C2 a) oraz C3 b)) dla $\mathcal{W}_1(\theta) = 9 \frac{m}{s}, \forall \theta \in [0^\circ, 360^\circ]$

Krótszy czas obliczeń okupiony jest jednak jakością otrzymanego rozwiązania. Różnice między rozwiązaniem optymalnym (wyznaczonym w środowisku IBM ILOG CPLEX), a wartościami funkcji celu dla algorytmu genetycznego przedstawiono na Rys. 5.11. Plany misji wyznaczone za pomocą algorytmu genetycznego (warunek stopu C2) charakteryzują się niższą wartością funkcji celu i stanowią odpowiednio: $\approx 80\%$ (dla $m = 2$); $\approx 70\%$ (dla $m = 3$); oraz $\approx 60\%$ (dla $m = 4$) wartości uzyskanych przy wykorzystaniu środowiska programowania deklaratywnego IBM ILOG CPLEX. Lepsze rezultaty otrzymano w przypadku stosowania warunku stopu C3, w którym uzyskane wartości funkcji celu stanowią odpowiednio: $\approx 95\%$ (dla $m = 2$); $\approx 85\%$ (dla $m = 3$); oraz $\approx 75\%$ (dla $m = 4$) wartości optymalnych.

Uzyskanie podobnych wartości wymaga jednak znacznych nakładów obliczeniowych niż ma to miejsce w środowisku IBM ILOG CPLEX (patrz Rys. 5.11).

Warto również zauważyć, że czasy obliczeń w obu przypadkach (C2 i C3) charakteryzują się bardzo niską wartością odchylenia standardowego ($\sigma < 2$ dla warunku stopu C2 i $\sigma < 25$ dla warunku stopu C3), co oznacza, że pomimo losowo generowanej populacji, rozwiązanie jest zwykle otrzymywane w tym samym czasie.

Z przedstawionych eksperymentów wynika, że planowanie misji reaktywnych metodami dokładnymi (np. w środowisku IBM ILOG CPLEX) ogranicza się do sieci o małej skali (do 100 – 220 punktów dostaw). Zakres ten można zwiększyć, stosując zaproponowane metody aproksymacyjne (realizujące warunek stopu C2); rozwiązanie w trybie on-line ($< 600s$) uzyskiwane jest kosztem niższych wartości funkcji celu najlepszego osobnika (np. na poziomie 60% – 80% rozwiązań optymalnych).

Wpływ warunków pogodowych. Pozostałe badania poświęcone zostały ocenie wpływu warunków pogodowych na jakość otrzymywanych rozwiązań. Rys. 5.12 oraz Rys. 5.13 ilustrują rezultaty eksperymentów przeprowadzonych dla misji wyznaczonych proaktywnie w warunkach $\mathcal{W}_2(\theta) = 10 \frac{m}{s}$, $\mathcal{W}_3(\theta) = 11 \frac{m}{s}$, w których dochodzi do zmiany warunków pogodowych (zakłócenia) $\mathcal{W}_2^*(\theta) = 12 \frac{m}{s}$, $\mathcal{W}_3^*(\theta) = 13 \frac{m}{s}$.

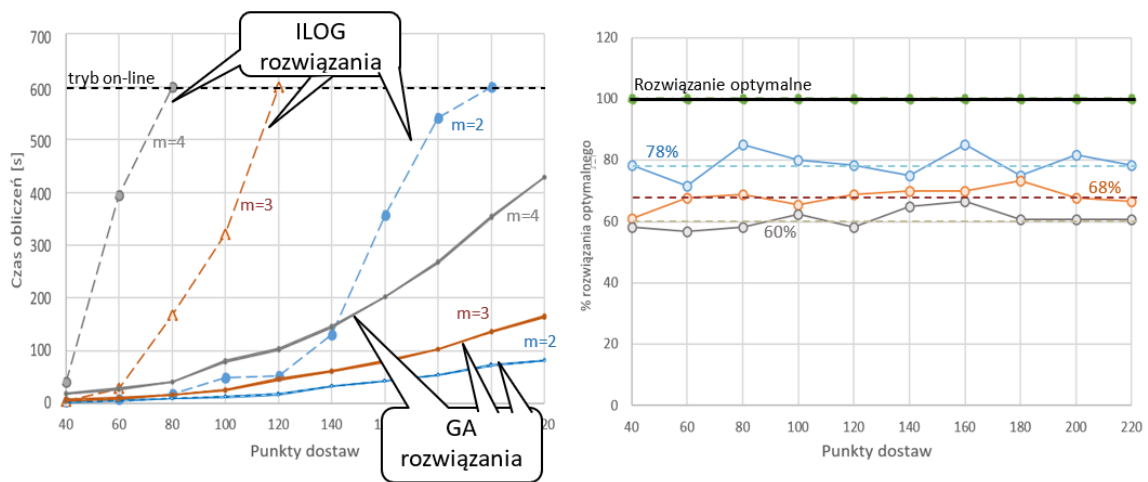
Rysunki Rys. 5.12i Rys. 5.13 przedstawiają wykresy czasu obliczeń dla środowiska deklaratywnego IBM ILOG CPLEX jak i algorytmu genetycznego z warunkiem stopu $C2$. Wynika z nich, że zmiana warunków pogodowych wpływa na czas uzyskania rozwiązania w środowisku IBM ILOG CPLEX:

- dla $\mathcal{W}_2(\theta) = 10 \frac{m}{s}$ skala problemów, dla których można określić rozwiązanie on-line ($< 600s$) wynosi: $n = 200$ dla $m = 2$; $n = 120$ dla $m = 3$ i $n = 80$ dla $m = 4$;
- dla $\mathcal{W}_3(\theta) = 11 \frac{m}{s}$ skala problemów, dla których można określić rozwiązanie on-line ($< 600s$) wynosi: $n = 200$ dla $m = 2$; $n = 100$ dla $m = 3$ i $n = 80$ dla $m = 4$

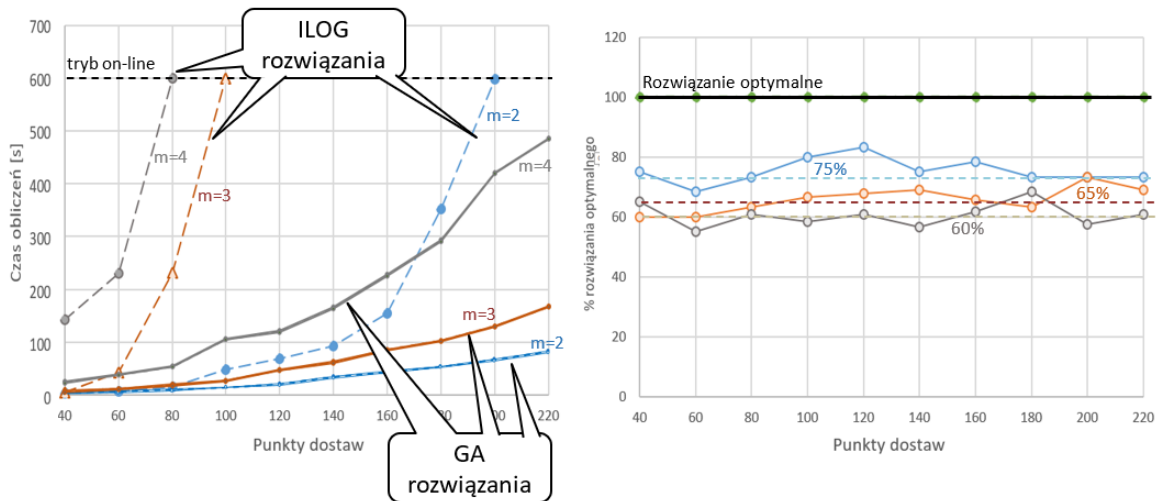
Zmiana warunków pogodowych wpływa również na czas wyznaczania rozwiązania uzyskiwanego przy pomocy algorytmu genetycznego, lecz nie wpływa na jakość otrzymanego rozwiązania. Wartość funkcji celu dla misji wyznaczonych przez algorytm genetyczny pozostaje na podobnym poziomie jak w poprzednim przypadku:

- dla $\mathcal{W}_2(\theta) = 10 \frac{m}{s}$, wartość funkcji celu jest równa: $\approx 78\%$ (dla $m = 2$); $\approx 68\%$ (dla $m = 3$); $\approx 60\%$ (dla $m = 4$) wartości optymalnej;
- dla $\mathcal{W}_3(\theta) = 11 \frac{m}{s}$, wartość funkcji celu jest równa: $\approx 75\%$ (dla $m = 2$); $\approx 65\%$ dla $m = 3$; $\approx 60\%$ (dla $m = 4$) wartości optymalnej;

Przeprowadzone eksperymenty wskazują, że największy wpływ na czas wyznaczenia rozwiązania (misji reaktywnej) ma przede wszystkim liczba węzłów n sieci oraz wielkość m floty BSP.



Rys. 5.12 Porównanie wyników eksperymentów przeprowadzonych dla środowiska IBM ILOG CPLEX oraz algorytmu genetycznego (warunek stopu $C2$) dla $\mathcal{W}_2(\theta) = 10 \frac{m}{s}$, $\forall \theta \in [0^\circ, 360^\circ)$



Rys. 5.13 Porównanie wyników eksperymentów przeprowadzonych dla środowiska IBM ILOG CPLEX oraz algorytmu genetycznego (warunek stopu $C2$) dla $\mathcal{W}_3(\theta) = 11 \frac{m}{s}, \forall \theta \in [0^\circ, 360^\circ)$

5.2.3 Podsumowanie

Przeprowadzone eksperymenty prowadzą do następujących wniosków:

1. Zaobserwowany nieliniowy wzrost czasu obliczeń potwierdza wysoką złożoność obliczeniową rozważanego problemu (klasa problemów *NP – trudnych*)
2. Opracowany model (wykorzystujący relaksację ograniczeń) pozwala na rozwiązywanie problemów o skali spotykanej w praktyce:
 - przy wykorzystaniu metod dokładnych (programowania z ograniczeniami) rozmiar problemów rozwiązywanych w trybie on-line wynosi: 170 punktów dostaw oraz 2 BSP
 - przy wykorzystaniu metod aproksymujących (algorytm genetyczny) rozmiar problemów rozwiązywanych w trybie on-line wynosi: 220 punktów dostaw oraz 4 BSP
3. Wykorzystanie metod dokładnych (programowania z ograniczeniami) umożliwia szybką ocenę (w czasie nie przekraczającym 600s) pierwszego rozwiązania dopuszczalnego.
4. Zastosowanie metod aproksymacyjnych (w tym przypadku algorytmu genetycznego) umożliwia uzyskanie rozwiązania (przy założeniu niepustego zbioru rozwiązań dopuszczalnych) w krótszym czasie, jednak kosztem utraty jego jakości (70% – 90% optymalnej wartości).

6 Podsumowanie

W organizacji procesów transportu dostaw coraz częściej spotykane są próby wykorzystania BSP w procesach obsługi dostaw (zamawianych przez odbiorców, np. klientów DHL), monitorowania obiektów (infrastruktury zarządzania kryzysowego, np. stan wałów przeciwpowodziowych), akcjach o charakterze ratowniczym (w powodziach i/lub pożarach) oraz akcjach wojskowych. Planowanie i organizacja tego typu misji winna uwzględniać zarówno potrzeby obsługiwanych odbiorców (pojawiających się ad hoc zamówień, zmian struktury sieci transportowej itp.) jak i specyfikę środowiska (zmian warunków pogodowych).

Skalę i tempo praktycznych zastosowań BSP ograniczają ich parametry techniczne decydujące o czasie i trasie przelotu, a także o ciężarze transportowanych towarów. W celu zwiększenia efektywności planowanych misji BSP opracowano wiele metod umożliwiających m.in. minimalizację zużycia baterii, maksymalizację zasięgu realizowanych dostaw, racjonalizację planowanych dostaw, itp. [179, 180].

Rozważany problem planowania misji BSP, traktowany jako uogólnienie problemu marszrutyzacji pojazdów VRP, winien uwzględniać jednocześnie wiele perspektyw obejmujących m.in.: zmienne warunki pogodowe, dopuszczalną ładowność, pojemność energetyczną BSP, wielkość floty, liczbę serwisowanych punktów dostaw, itp. Przyjmuje się, że spośród wyżej wymienionych elementów decydujący wpływ na powodzenie planowanych misji mają zakłócenia dotyczące zmiany: warunków pogodowych, terminów dostaw i struktury sieci transportowej.

Dostępna literatura tematu jest bogata w metody wspierające decydentów w zakresie harmonogramowania i marszrutyzacji zadań BSP jak również oceny możliwości realizacji misji BSP w zadanych, stałych warunkach pogodowych. Jest ona jednocześnie niezwykle uboga w zakresie badań podejmujących problemy wyznaczania proaktywnych i/lub reaktywnych planów misji flot BSP w sytuacjach występowania zakłóceń (gwałtowna zmiana pogody, zmiana terminu dostaw, pojawienie się nowego zlecenia / rezygnacja ze zlecenia). Wprowadzone w tym kontekście pojęcie odpornego planu misji lotów BSP (wyrażonego funkcją $Y_k(\theta)$) pozwoliło sformułować nowy problem planowania odpornych misji floty BSP (DRVRP) sprowadzający się do odpowiedzi na następujące pytania:

- *Podjęcie proaktywne: Czy dla zadanej sieci transportowej G oraz floty U istnieje misja S gwarantująca terminową realizację zamówień dla prognozowanych warunków pogodowych $\mathcal{W}(\theta)$ przy zużyciu energii BSP nieprzekraczającym 100%?*
- *Podjęcie reaktywne: Czy w sytuacji wystąpienia zakłócenia $IS(t^*)$ misja S wciąż gwarantuje terminową realizację dostaw przy zużyciu energii BSP nieprzekraczającym 100%?*

Głównym celem rozprawy było opracowanie metody wspomagającej (proaktywno-reaktywnej) planowanie misji floty BSP odpornych na wybrane zakłócenia. Ze względu na NP – *trudny* charakter rozważanego problemu opracowanie efektywnej czasowo metody wymagało zastosowania zaawansowanych środowisk obliczeniowych, w szczególności wykorzystujących techniki programowania deklaratywnego. W tym celu opracowano model referencyjny pozwalający na sformułowanie rozważanego zadania w postaci problemu spełnienia ograniczeń (ang. Constraints Satisfaction Problem) i jego bezpośrednią implementację w środowiskach informatycznych takich jak IBM ILOG CPLEX bazujących na paradygmacie programowania deklaratywnego. Daje to możliwość poszukiwania rozwiązań dopuszczalnych gwarantujących odporności na zadane zmiany warunków pogodowych jak również terminowości realizowanych dostaw. W szczególności zaproponowano relaksację upraszczającą ograniczenia gwarantujące odporność misji na zadane warunki pogodowe. Jej zastosowanie redukuje rozmiar przeszukiwanej przestrzeni potencjalnych rozwiązań, skutkując 70-krotnym zmniejszeniem czasu obliczeń. Skuteczność opracowanej metody proaktywno-reaktywnego

wyznaczania odpornych planów misji lotów floty BSP (bazującej na zaproponowanym modelu referencyjnym), potwierdzona została w serii eksperymentów.

6.1 Rezultaty

W wyniku prowadzonych badań osiągnięto cel pracy, a w szczególności:

- a) w wyniku przeprowadzonej analizy krytycznej literatury tematu opracowano taksonomię problemów klasy VRP oraz wyznaczono lukę badawczą w obszarze modeli uwzględniających warunki pogodowe i ich wpływ na realizowalność misji lotu (wpływ warunków pogodowych na zużycie energii),
- b) sformułowano nowy problem planowania misji lotów floty BSP uwzględniający wprowadzoną definicję funkcji odporności na prognozowane warunki pogodowe,
- c) opracowano referencyjny model (bazujący na paradygmacie programowania deklaratywnego) dla problemu planowania odpornych planów misji floty BSP,
- d) zaproponowano relaksację ograniczeń upraszczającą ograniczenia gwarantujące odporność misji na zadane warunki pogodowe (zaproponowana relaksacja zmniejsza czas obliczeń o około 70 razy),
- e) opracowano autorską metodę proaktywno-reaktywnego wyznaczania odpornych (na wybrane rodzaje zakłóceń) planów misji lotów floty BSP,
- f) przeprowadzono porównanie dokładnego (bazującego na programowaniu z ograniczeniami) i przybliżonego (algorytm genetyczny) wariantu opracowanej metody,
- g) przeprowadzono badania weryfikujące skalowalność opracowanej metody w zadaniach interaktywnego (prowadzonego w trybie online) planowania misji lotów BSP.

Przeprowadzone eksperymenty wykazały, że możliwe jest wyznaczanie odpornych planów misji lotów floty BSP dla problemów, w których liczba punktów dostaw nie przekracza 100, a flota BSP nie zawiera więcej niż 4 pojazdy. Dla takich instancji problemów wyznaczenie odpowiedzi na stawiane pytania odbywa się w czasie poniżej 10 minut (w trybie on-line).

Z powyższych konkluzji wynika, że teza postawiona w rozdziale 1, przyjmująca, że wykorzystanie technik obliczeniowych bazujących na paradygmacie programowania deklaratywnego pozwala na wyznaczanie planów misji lotów BSP odpornych na zmienne warunki pogodowe w trybie on-line, została potwierdzona.

Osiągnięte rezultaty stanowią autorski wkład do dyscypliny: *informatyka techniczna i telekomunikacja* jak również *automatyka, elektronika i elektrotechnika*. W rozwój informatyki w zakresie metodyki modelowania i projektowania systemów wspomaganie decyzji, w szczególności obejmujących zagadnienia typowe dla dyskretnych problemów decyzyjnych/optymalizacyjnych występujących w zadaniach marszrutyzacji i harmonogramowania dostaw.

Głównym wynikiem pracy jest metoda wyznaczania odpornych planów misji lotów floty BSP, wspierająca planistów w zakresie:

- proaktywnego wyznaczania planów misji gwarantujących terminowe dostawy w prognozowanych warunkach pogodowych,
- reaktywnego wyznaczania planów misji gwarantujących terminowe dostawy w sytuacji wybranych, ad hoc występujących, zakłóceń zarówno tych powodowanych zmianami występującymi w środowisku, jak i zmianami warunków realizacji dostaw.

Przedstawione wyniki mogą być punktem wyjścia do opracowania innych, pochodnych metod planowania odpornego, jak np. metod uwzględniających transport multimodalny (uwzględniający różnego rodzaju środki transportu).

6.2 Kierunek przyszłych badań

Opracowana metoda proaktywno-reaktywnego wyznaczania odpornych planów misji lotów floty BSP jest dedykowana dla firm świadczących usługi transportowe, w których występują trzy rodzaje zakłóceń powodowanych zmianami: pogody, struktury sieci, zapotrzebowania klientów. Spotykane w rzeczywistości zakłócenia mogą być również innego rodzaju i dotyczyć np.: usterek technicznych i awarii BSP, występowania nieprzewidzianych opóźnień w dostawach (napotkane w trakcie lotu przeszkody), utraty kontaktu z BSP, zwrot (nieprzyjęcie) towaru przez klienta, itp. W tym kontekście, przyszłe badania winny być ukierunkowane na odpowiednie rozszerzenia modelu referencyjnego o inne zakłócenia m.in. tego rodzaju.

Istotnym ograniczeniem przyjętego modelu referencyjnego jest jego deterministyczny charakter (jedynie warunki pogodowe są definiowane jako losowe). Spotykane w rzeczywistości dane mają niepewny, stochastyczny lub rozmyty charakter (np. czas i prędkość lotu) co implikuje konieczność uwzględnienia ich stosownej, stochastycznej i/lub rozmytej, reprezentacji. Pierwsze prace w tym zakresie zostały już podjęte. W publikacji [181] zaprezentowano rozszerzenie opracowanego modelu o możliwość uwzględniania niepreryjnych (rozmytych) wartości prędkości lotu. Wykorzystano w tym celu reprezentację skierowanych liczb rozmytych.

Przedstawiany w rozprawie model zakłada, że wykorzystane środki transportu ograniczają się wyłącznie do BSP. W praktyce występują takie systemy transportowe, w których część transportu odbywa się drogą lądową. Otwarta struktura opracowanego modelu pozwala na stosunkowo łatwe jego rozszerzenie w tym zakresie, w szczególności o możliwość wykorzystania różnego rodzaju środków transportu (tzw. podejście multimodalne).

Odrębny kierunek badań jest skierowany na wykorzystanie podejścia hybrydowego [182]. Podejście to wsparte odpowiednią dekompozycją problemu (programowanie dynamiczne) może zapewnić czasowo efektywne metody jego rozwiązania. W zakresie rozwoju metod przybliżonych, interesującym kierunkiem badań są również metody samoorganizacji misji lotów, w których decyzje o realizacji dostaw są podejmowane w sposób rozproszony (indywidualnie przez autonomiczne BSP).

Dalsze prace winny się też koncentrować na budowie systemu interakcyjnego planowania misji lotów BSP. Wdrożenie tego typu funkcjonalności w systemach dynamicznego planowania dostaw umożliwi wczesne wykrywanie zagrożeń i szybkie wypracowanie decyzji w trybie on-line w zakresie realizowanych misji (reakcji na pojawiające się zakłócenia powodowane zmianami warunków pogodowych, terminów dostaw, występowaniem nowych zleceń, itp.).

Bibliografia

- [1] M. Janjeviv, D. Knoppen i M. Winkenbach, „Integrated decision-making framework for urban freight logistics policy-making,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, tom 72, pp. 333-357, 2019.
- [2] E. Taniguchi, R. G. Thompson i A. G. Qureshi, „Modelling city logistics using recent innovative technologies,” *Transportation Research Procedia*, tom 46, pp. 3-12, 2020.
- [3] S. Iwan, „Adaptative Approach to Implementing Good Practices to Support Environmentally Friendly Urban Freight Transport Management,” *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, tom 151, pp. 70-86, 2014.
- [4] R. A. Bandeira, M. A. D'Agosto, S. K. Ribeiro, A. P. Bandeira i G. V. Goes, „A fuzzy multi-criteria model for evaluating sustainable urban freight transportation operations,” *Journal of Cleaner Production*, tom 184, pp. 727-739, 2018.
- [5] M. Kiba-Janiak, „Urban freight transport in city strategic planning,” *Research in Transportation Business & Management*, tom 24, pp. 4-16, 2017.
- [6] M. Kiba-Janiak, „EU cities' potentials for formulation and implementation of sustainable urban freight transport strategic plans,” *Transportation Research Procedia*, tom 39, pp. 150-159, 2019.
- [7] J. Wątróbski, K. Małecki, K. Kijewska, S. Iwan, A. Kaczmarczyk i R. G. Thompson, „Multi-Criteria Analysis of Electric Vans for City Logistics,” *Sustainability*, tom 9, nr 8, p. 1453, 2017.
- [8] K. Kijewska i B. G. Johansen, „Comparative Analysis of Activities for More Environmental Friendly Urban Freight Transport Systems in Norway and Poland,” *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, tom 151, pp. 142-157, 2014.
- [9] H. Quak, R. Kok i E. den Boer, „The Future of City Logistics – Trends and Developments Leading toward a Smart and Zero-Emission System,” w *City Logistics 1: New Opportunities and Challenges*, 2018, p. Chapter 7.
- [10] H. Quak, N. Nesterova, T. van Rooijen i Y. Dong, „Zero Emission City Logistics: Current Practices in Freight Electromobility and Feasibility in the Near Future,” *Transportation Research Procedia*, tom 14, pp. 1506-1515, 2016.
- [11] E. Taniguchi, R. Dupas, J.-C. Deschamps i A. G. Qureshi, „Concepts of an Integrated Platform for Innovative City Logistics with Urban Consolidation Centers and Transshipment Points,” w *City Logistics 3: Towards Sustainable and Liveable Cities*, 2018, p. Chapter 7.
- [12] W. Hu, J. Dong, B.-g. Hwang, R. Ren i Z. Chen, „A Scientometrics Review on City Logistics Literature: Research Trends, Advanced Theory and Practice,” *Sustainability*, tom 11, nr 10, p. 2724, 2019.
- [13] J.-P. Aurambout, K. Gkoumas i B. Ciuffo, „Last mile delivery by drones: an estimation of viable market potential and access to citizens across European cities,” *European Transport Research Review*, tom 11, 11.
- [14] J. Park, S. Kim i K. Suh, „A Comparative Analysis of the Environmental Benefits of Drone-Based Delivery Services in Urban and Rural Areas,” *Sustainability*, tom 10, nr 3, p. 888, 2018.
- [15] J. K. Stolaroff, C. Samaras, E. R. O'Neill, A. Lubers, A. S. Mitchell i D. Ceperley, „Energy use and life cycle greenhouse gas emissions of drones for commercial package delivery,” *Nat Commun*, tom 9, p. 409, 2018.

- [16] S. M. Patella, G. Grazieschi, V. Gatta, E. Marcucci i S. Carrese, „The Adoption of Green Vehicles in Last Mile Logistics: A Systematic Review,” *Sustainability*, tom 13, nr 1, p. 6, 2021.
- [17] M. Liu, X. Liu, M. Zhu i F. Zheng, „Stochastic Drone Fleet Deployment and Planning Problem Considering Multiple-Type Delivery Service,” *Sustainability*, tom 11, nr 14, p. 3871, 2019.
- [18] A. Troudi, S.-A. Addouche, S. Dellagi i A. El Mhamedi, „Sizing of the Drone Delivery Fleet Considering Energy Autonomy,” *Sustainability*, tom 10, nr 9, 2018.
- [19] N. Boysen, D. Briskorn, S. Fedtke i S. Schwerdfeger, „Drone delivery from trucks: Drone scheduling for given truck routes,” *Networks*, tom 72, nr 4, pp. 506-527, 2018.
- [20] K. Dorling, J. Heinrichs, G. G. Messier i S. Magierowski, „Vehicle Routing Problems for Drone Delivery,” *IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS: SYSTEMS*, pp. 70-85, 2017.
- [21] A. Thibbotuwawa, P. Nielsen, B. Zbigniew i G. Bocewicz, „Energy Consumption in Unmanned Aerial Vehicles: A Review of Energy Consumption Models and Their Relation to the UAV Routing,” *Advances in Intelligent Systems and Computing*, tom 853, pp. 173-184, 2018.
- [22] A. Thibbotuwawa, G. Bocewicz, G. Radzki, P. Nielsen i Z. Banaszak, „UAV Mission Planning Resistant to Weather Uncertainty,” *Sensors*, tom 20, nr 2, p. 515, 2020.
- [23] G. Radzki, A. Thibbotuwawa i Bocewicz Grzegorz, „UAVS flight routes optimization in changing weather conditions – constraint programming approach,” *Applied Computer Science*, tom 15, nr 3, pp. 5-12, 2019.
- [24] I. Sung i P. Nielsen, „Speed optimization algorithm with routing to minimize fuel consumption under time-dependent travel conditions,” *Production & Manufacturing Research*, tom 8, nr 1, pp. 1-19, 2020.
- [25] H. Huang, A. V. Savkin i C. Huang, „A New Parcel Delivery System with Drones and a Public Train,” *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, tom 100, pp. 1341-1354, 2020.
- [26] P. Stodola, J. Drozd, J. Mazal, J. Hodicky i D. Prochazka, „Cooperative Unmanned Aerial System Reconnaissance in a Complex Urban Environment and Uneven Terrain,” *Sensors*, tom 19, nr 17, p. 3754, 2019.
- [27] M. Bekhtii, N. Achir, K. Boussetta i M. Abdennebi, „Drone Package Delivery: A Heuristic approach for UAVs path planning and tracking,” *EAI Endorsed Transactions on Internet of Things*, pp. 1-11, 2017.
- [28] A. Thibbotuwawa, G. Bocewicz, Z. Banaszak i P. Nielsen, „A Solution Approach for UAV Fleet Mission Planning in Changing Weather Conditions,” *Applied Sciences*, tom 9, nr 19, p. 3972, 2019.
- [29] B. Penin, P. R. Giordano i F. Chaumette, „Vision-Based Reactive Planning for Aggressive Target Tracking While Avoiding Collisions and Occlusions,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, tom 3, nr 4, pp. 3725-3732, 2018.
- [30] A. Weinstein i C. Schumacher, „UAV Scheduling via the Vehicle Routing Problem with Time Windows,” w *AIAA Infotech@Aerospace 2007 Conference and Exhibit*, Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [31] G. Radzki, P. Nielen, G. Bocewicz i Z. Banaszak, „A Proactive Approach to Resistant UAV Mission Planning,” w *Automation 2020: Towards Industry of the Future*, Cham, Springer, 2020, pp. 112-124.
- [32] J. Hall i D. Anderson, „Reactive route selection from pre-calculated trajectories – application to micro-UAV path planning,” *The Aeronautical Journal*, tom 115, nr 1172, pp. 635-640, 2011.

- [33] A. Wallar, E. Plaku i D. A. Sofge, „Reactive Motion Planning for Unmanned Aerial Surveillance of Risk-Sensitive Areas,” *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, tom 12, nr 3, pp. 969-980, 2015.
- [34] R. Shirani, M. St-Hilaire, T. Kunz, Y. Zhou, J. Li i L. Lamont, „On the Delay of Reactive-Greedy-Reactive Routing in Unmanned Aeronautical Ad-hoc Networks,” *Procedia Computer Science*, tom 10, pp. 535-542, 2012.
- [35] G. Radzki, I. Nielsen, P. Golińska-Dawson, G. Bocewicz i Z. Banaszak, „Reactive UAV Fleet’s Mission Planning in Highly Dynamic and Unpredictable Environments,” *Sustainability*, tom 13, nr 9, p. 5228, 2021.
- [36] B. N. Coelho, V. N. Coelho, I. M. Coelho, L. S. Ochi, R. Haghazadeh K., D. Zuidema, M. S. Lima i A. R. da Costa, „A multi-objective green UAV routing problem,” *Computers & Operations Research*, tom 88, pp. 306-315, 2017.
- [37] F. Belkhouche, „Reactive optimal UAV motion planning in a dynamic world,” *Robotics and Autonomous Systems*, tom 96, pp. 114-123, 2017.
- [38] M. Lohatepanont i C. Barnhart, „Airline Schedule Planning: Integrated Models and Algorithms for Schedule Design and Fleet Assignment,” *Transportation Science*, tom 38, nr 1, pp. 19-32, 2004.
- [39] M. A. R. Estrada i A. Ndoma, „The uses of unmanned aerial vehicles –UAV’s- (or drones) in social logistic: Natural disasters response and humanitarian relief aid,” *Procedia Computer Science*, tom 149, pp. 375-383, 2019.
- [40] G. S. Avellar, G. A. Pereira, L. C. Pimenta i P. Iscold, „Multi-UAV Routing for Area Coverage and Remote Sensing with Minimum Time,” *Sensors*, tom 15, nr 11, pp. 27783-27803, 2015.
- [41] L. D. P. Pugliese, F. Guerriero, D. Zorbas i T. Razafindralambo, „Modelling the mobile target covering problem using flying drones,” *Optimization Letters*, pp. 1021-1052, 2016.
- [42] A. M. Ham, „Integrated scheduling of m-truck, m-drone, and m-depot constrained by time-window, drop-pickup, and m-visit using constraint programming,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, tom 91, pp. 1-14, 2018.
- [43] G. Radzki, M. Relich, G. Bocewicz i Z. Banaszak, „Declarative Approach to UAVs Mission Contingency Planning in Dynamic Environments,” w *Distributed Computing and Artificial Intelligence, Volume 2: Special Sessions 18th International Conference. DCAI 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*, Cham, Springer, 2022.
- [44] A. Al-Mousa, B. H. Sababha, M. Al-Madi, A. Bargouthi i R. Younis, „UTSim: A framework and simulator for UAV air traffic integration, control, and communication,” *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2019.
- [45] P. S. Bithas, E. T. Michailidis, N. Nomicos, D. Vouyioukas i A. G. Kanatas, „A Survey on Machine-Learning Techniques for UAV-Based Communications,” *Sensors*, tom 19, nr 23, p. 5170, 2019.
- [46] D. R. Vilorio, E. Solano-Charris, A. Muñoz-Villamizar i J. R. Montoya-Torres, „Unmanned aerial vehicles/drones in vehicle routing problems: a literature review,” *International Transactions in Operational Research*, tom 28, nr 4, pp. 1626-1657, 2020.
- [47] P. Traverso, E. Giunchiglia, L. Spalazzi i F. Giunchiglia, Sierpień 1996. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/2270270_Formal_Theories_for_Reactive_Planning_Systems_some_considerations_raised_from_an_experimental_application. [Data uzyskania dostępu: 07 06 2022].
- [48] J. J. Ruz, O. Averalo, G. Pajares i J. M. de la Cruz, „Decision making among alternative routes for UAVs in dynamic environments,” w *2007 IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (EFTA 2007)*, Patras, Greece, 2007.

- [49] J. Won Lee, B. Walker i K. Cohen, „Path Planning of Unmanned Aerial Vehicles in a Dynamic Environment,” w *Infotech@Aerospace 2011*, St. Louis, Missouri, 2012.
- [50] G. Dantzig i J. Ramser, „The truck dispatching problem,” *Management Science*, tom 6, nr 1, pp. 80-91, 1959.
- [51] M. Flood, „The traveling-salesman problem,” *Operational Research*, tom 4, nr 1, pp. 61-75, 1956.
- [52] V. Pillac, M. Gendreau, C. Guéret i A. L. Medaglia, „A review of dynamic vehicle routing problems,” *European Journal of Operational Research*, tom 255, pp. 1-11, 2013.
- [53] D. J. Bertsimas i D. S. Levi, „New Generation of Vehicle Routing Research: Robust Algorithms, Addressing,” *Operations Research*, tom 44, nr 2, pp. 286-304, 1996.
- [54] M. Faied, A. Mostafa i A. Girard, „Vehicle Routing Problem Instances: Application to Multit-UAV Mission Planning,” w *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, Toronto, Ontario Canada, 2010.
- [55] S. K. Sharma, S. Routroy i U. Yadav, „Vehicle routing problem: recent literature review of its variants,” *International Journal of Operational Research (IJOR)*, tom 33, nr 1, 2018.
- [56] M. Gendreau, G. Laporte i R. Séguin, „Stochastic vehicle routing,” *European Journal of Operational Research*, tom 88, nr 1, pp. 3-12, 1996.
- [57] M. Reinmann, „Analyzing a vehicle routing problem with stochastic demand using ant colony optimization.,” *Advanced OR and AI methods in Transportation*, pp. 764-769, 2005.
- [58] I. Sungur, F. Ordóñez i M. Dessouky, „A robust optimization approach for the capacitated vehicle routing problem with demand uncertainty,” *IIE Transactions*, tom 40, nr 5, pp. 509-523, 2008.
- [59] P. Murani, A. Moreno, J. De La Vega, D. Alem, J. Gondzio i R. Morabito, „The Robust Vehicle Routing Problem with Time Windows: Compact Formulation and Branch-Price-and-Cut Method,” *Transportation Sciences*, tom 53, nr 4, pp. 1043-1066, 2019.
- [60] J. F. Cordeau, G. Desaulniers, J. Desrosiers, M. M. Solomon i F. Soumis, „The vehicle routing problem,” w *Monographs on Discrete Mathematics and Applications*, Philadelphia, 2000.
- [61] M. Desrochers, J. Desrosiers i M. Solomon, „A New Optimization Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Time Windows,” *Operation Research*, tom 40, nr 2, pp. 342-354, 1992.
- [62] H. G. Pullen i M. H. Webb, „A computer application to a transport scheduling problem,” *The Computer Journal*, tom 10, nr 1, pp. 10-13, 1967.
- [63] K. W. Knight i J. P. Hofer, „Vehicle Scheduling with Timed and Connected Calls: A Case Study,” *Operational Research Quarterly*, tom 19, pp. 299-310, 1968.
- [64] O. B. Madsen, „Optimal Scheduling of Trucks—A Routing Problem with Tight Due Times for Delivery,” w *Optimization Applied to Transportation Systems*, Luxemburg, International Institute for Applied System Analysis, 1976, pp. 126-136.
- [65] C. Archetti i M. G. Speranza, „The Split Delivery Vehicle Routing Problem: A Survey,” w *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges. Operations Research/Computer Science Interfaces*, tom 43, Boston, Springer MA, 2008.
- [66] M. Dror i P. Trudeau, „Savings by Split Delivery Routing,” *Transportation Science*, tom 23, pp. 141-145, 1989.
- [67] M. Dror i P. Trudeau, „Split delivery routing,” *Naval Research Logistics*, tom 37, pp. 383-402, 1990.
- [68] M. Dror, G. Laporte i P. Trudeau, „Vehicle routing with split deliveries,” *Discrete Applied Mathematics*, tom 50, pp. 239-254, 1994.

- [69] J. M. Belenguer, M. C. Martinez i E. Mota, „A lower bound for the split delivery vehicle routing problem,” *Operations Research*, tom 48, pp. 801-810, 2000.
- [70] C. G. Lee, M. A. Epelman, C. C. White III i Y. A. Bozer, „ A shortest path approach to the multiple-vehicle routing problem with split pick-ups,” *Transportation Research B*, tom 40, pp. 265-284, 2006.
- [71] M. Jin, K. Liu i R. O. Bowden, „A two-stage algorithm with valid inequalities for the split delivery vehicle routing problem,” *International Journal of Production Economics*, tom 40, pp. 228-242, 2007.
- [72] M. Gendreau, P. Dejax, D. Feillet i C. Gueguen, „Vehicle routing with time windows and split deliveries,” 2002.
- [73] S. Chen, B. Golden i E. Wasil, „The split delivery vehicle routing problem: Applications, test problems, and computational results,” *Networks*, tom 49, pp. 318-329, 2007.
- [74] R. V. Kulkarni i P. R. Bhave, „Integer programming formulations of vehicle routing problems,” *European Journal of Operational Research*, tom 20, nr 1, pp. 58-67, 1985.
- [75] J.-F. Cordeau, M. Gendreau i G. Laporte, „A tabu search heuristic for periodic and multi-depot vehicle routing problems,” *Networks*, tom 30, pp. 105-119, 1997.
- [76] T. Rodrigues Pereira Ramos, M. I. Gomes i A. P. Barbosa, „Multi-depot vehicle routing problem: a comparative study of alternative formulations,” *International Journal of Logistics Research and Applications*, tom 23, nr 2, pp. 103-120, 2020.
- [77] J. R. Montoya-Torres, J. L. Franco , S. N. Isaza, H. F. Jiménez i N. Herazo-Padilla, „A literature review on the vehicle routing problem with multiple depots,” *Computers & Industrial Engineering*, tom 79, pp. 115-129, 2015.
- [78] A. Atamtürk i M. W. P. Savelsbergh , „Integer-Programming Software Systems,” *Annals of Operations Research*, tom 140, pp. 67-124, 2005.
- [79] R. Baldacci, N. Christofides i A. Mignozzi, „An exact algorithm for the vehicle routing problem based on the set partitioning formulation with additional cuts,” *Mathematical Programming*, tom 115, pp. 351-385, 2008.
- [80] R. Fukusawa, H. Longo, J. Lysgaard, M. Poggi de Aragão, M. Reis, E. Uchoa i R. F. Werneck, „Robust Branch-and-Cut-and-Price for the Capacitated Vehicle Routing Problem,” *Mathematical Programming*, tom 106, pp. 491-511, 2006.
- [81] R. Baldacci, P. Toth i D. Vigo, „Recent advances in vehicle routing exact algorithms,” *4OR*, tom 5, pp. 269-298, 2007.
- [82] G. D. Konstantakopoulos, S. P. Gayialis i E. P. Kechagias, „Vehicle routing problem and related algorithms for logistics distribution: a literature review and classification,” *Operational Research*, 2020.
- [83] E. Balas, „BRANCH AND BOUND / IMPLICIT ENUMERATION,” *Annals of Discrete Mathematics* 5 (1979) 185-191, 1979.
- [84] F. Theurich, A. Fischer i G. Scheithauer, „A branch-and-bound approach for a Vehicle Routing Problem with Customer Costs,” *EURO Journal on Computational Optimization*, tom 9, p. 100003, 2021.
- [85] G. Clarke i J. W. Wright, „Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points,” *Operations Research*, tom 12, nr 4, pp. 519-643, 1964.
- [86] M. Labbé, G. Laporte i H. Mercure, „Capacitated Vehicle Routing on Trees,” *Operations Research*, tom 39, nr 4, pp. 528-687, 1991.
- [87] G. Laporte, M. Gendreau, J. Y. Potvin i F. Semet, „Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem,” *International Transactions in Operational Research*, tom 7, nr 4-5, pp. 285-300, 2000.
- [88] A. Wren, *Computers in Transport Planning and Operation*, London: Ian Allan, 1971.

- [89] A. Wren i M. Holliday, „Computer scheduling of vehicles form one or more depots to a number of delivery points,” *Operational Research Quarterly*, tom 23, pp. 333-344, 1972.
- [90] D. M. Ryan, C. Hjorring i F. Glover, „Extensions of the petal method for vehicle routing,” *Journal of the Operational Research Society*, tom 44, pp. 289-296, 1993.
- [91] M. L. Balinski i R. E. Quandt, „On an integer program for a delivery program,” *Operations Research*, tom 12, pp. 300-304, 1964.
- [92] Y. Agarwal, K. Mathur i H. M. Salkin, „A set-partitioning-based exact algorithm for the vehicle routing problem,” *Networks*, tom 19, pp. 731-749, 1989.
- [93] B. Foster i D. Ryan, „An integer programming approach to the vehicle scheduling problem,” *Operations Research*, tom 27, pp. 367-384, 1976.
- [94] J. Renaud, F. F. Boctor i G. Laporte, „An improved petal heuristic for the vehicle routing problem,” *Journal of the Operational Research Society*, tom 47, pp. 329-336, 1996.
- [95] M. L. Fisher i R. Jaikumar, „A generalized assignment heuristic for vehicle routing,” *Network*, tom 11, pp. 109-124, 1981.
- [96] P. Miliotis, „Integer programming approaches to the travelling salesman problem,” *Mathematical Programming*, tom 10, pp. 367-378, 1976.
- [97] J. B. Bramel i D. Simchi-Levi, „A location based heuristic for general routing problems,” *Operation Research*, tom 43, pp. 649-660, 1995.
- [98] J. E. Bell i P. R. McMullen, „Ant colony optimization techniques for the vehicle routing problem,” *Advanced Engineering Informatics*, tom 18, nr 1, pp. 41-48, 2004.
- [99] J. H. Holland i D. E. Goldberg, „Genetic algorithms and machine learning,” *Machine Learning*, tom 3, nr 2, pp. 95-99, 1975.
- [100] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, Jr. i M. P. Vecchi, „Optimization by Simulated Annealing,” *Spin Glass Theory and Beyond*, pp. 339-348, 1986.
- [101] V. Černý, „Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm,” *Journal of Optimization Theory and Applications*, pp. 41-51, 1985.
- [102] F. Glover, „Future paths for integer programming and links to artificial intelligence,” *Computers & Operation Research*, tom 13, pp. 533-549, 1986.
- [103] R. Dawkins, *The Selfish Gene*, Oxford, UK: Oxford University Press, 1976.
- [104] S. Runggeratigul, „memetic algorithm for communication network design taking into consideration an existing network,” *Metaheuristics: Computer Decision-Making*, pp. 615-626, 2004.
- [105] N. Labadie, C. Prins i C. Prodhon, *Metaheuristics for vehicle routing problems*, Hoboken: Wiley, 2016.
- [106] C. Lin, K. L. Choy, G. Ho, S. H. Chung i H. Y. Lam, „Survey of Green Vehicle Routing Problem: Past and future trends,” *Expert Systems with Applications*, tom 41, nr 4, pp. 1118-1138, 2014.
- [107] J. E. C. Escobar, M. Rollins i S. Unger, „Preliminary data on an affordable uav system to survey for freshwater turtles: advantages and disadvantages of low-cost drones,” *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, pp. 1-8, 2020.
- [108] F. Klauser i D. Pauschinger, „Entrepreneurs of the air: Sprayer drones as mediators of volumetric agriculture,” *Journal of Rural Studies*, tom 84, pp. 55-62, 2021.
- [109] T. Calamoneri i F. Cor`o, „A realistic model for rescue operations after an earthquake,” *Proceedings of the 16th ACM Symposium on QoS and Security for Wireless and Mobile Networks*, pp. 123-126, 2020.
- [110] A. Khochare, Y. Simmhan, F. Betti Sorbelli i S. K. Das, „Heuristic algorithms for co-scheduling of edge analytics and routes for uav fleet missions (INFOCOM),” 2021.

- [111] A. Pratap, R. Gupta, V. S. S. Nadendla i S. K. Das, „Bandwidth-constrained task throughput maximization in iot-enabled 5g networks,” *Pervasive and Mobile Computing*, tom 69, p. 101281, 2020.
- [112] A. Pratap i S. K. Das, „Stable matching based resource allocation for service provider’s revenue maximization in 5g networks,” w *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2021.
- [113] F. Betti Sorbelli, C. M. Pinotti, S. Silvestri i S. K. Das, „Measurement errors in range-based localization algorithms for uavs: Analysis and experimentation,” w *IEEE Transactions on Mobile Computing (TMC)*, 2020.
- [114] F. Betti Sorbelli, C. M. Pinotti i G. Rigoni, „Range-free localization algorithms with mobile anchors at different altitudes: A comparative study,” *Proceedings of the 21st International Conference on Distributed Computing and Networking*, pp. 1-10, 2020.
- [115] F. Betti Sorbelli, S. K. Das, C. M. Pinotti i G. Rigoni, „A comprehensive investigation on range-free localization algorithms with mobile anchors at different altitudes,” *Pervasive and Mobile Computing*, tom 73, p. 101383, 2021.
- [116] F. Betti Sorbelli, F. Cor`o, S. K. Das i C. M. Pinotti, „Energy constrained delivery of goods with drones under varying wind conditions,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, pp. 1-13, 2020.
- [117] L. Palazzetti, M. C. Pinotti i G. Rigoni, „A run in the wind: favorable winds make the difference in drone delivery,” w *2021 17th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*, Pafos, 2021.
- [118] L. Palazzetti, „Routing Drones Being Aware of Wind Conditions: a Case Study,” w *2021 17th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*, Pafos, 2021.
- [119] J. J. Kim, I. Kim i J. Hwang, „A change of perceived innovativeness for contactless food delivery services using drones after the outbreak of covid-19,” *International Journal of Hospitality Management*, tom 93, p. 102758, 2021.
- [120] G. Radzki, P. Golińska-Dawson, G. Bocewicz i Z. Banaszak, „Modelling Robust Delivery Scenarios for a Fleet of Unmanned Aerial Vehicles in Disaster Relief Missions,” *J Intell Robot Syst*, tom 103, nr 63, 2021.
- [121] A. M. F. AbdAllah, D. L. Essam i R. A. Sarker, „On solving periodic reoptimization dynamic vehicle routing problems,” *Applied Soft Computing*, pp. 1-12, 2017.
- [122] A. Thibbotuwawa, G. Bocewicz, P. Nielsen i Z. Banaszak, „Planning deliveries with UAV routing under weather forecast and energy consumption constraints,” *IFAC-PapersOnLine*, tom 52, nr 13, pp. 820-825, 2019.
- [123] S. Kambhampati i L. S. Davis, „Multiresolution Path Planning for Mobile Robots,” *IEEE JOURNAL OF ROBOTICS AND AUTOMATION*, tom 2, nr 3, pp. 135-145, 1986.
- [124] G. Bocewicz, G. Radzki, P. Nielsen i Z. Banaszak, „UAVs’ Dynamic Routing, Subject to Time Windows Variation,” *IFAC-PapersOnLine*, tom 55, nr 2, pp. 457-462, 2022.
- [125] G. Radzki, G. Bocewicz, J. Wikarek, P. Nielsen i Z. Banaszak, „Multi Depot UAVs Routing Subject to Changing Weather and Time Windows Variation,” w *AUTOMATION 2022: Automation 2022: New Solutions and Technologies for Automation, Robotics and Measurement Techniques*, Springer, 2022, pp. 64-74.
- [126] F. Guerriero, R. Surace, V. Loscri i E. Natalizio, „A multi-objective approach for unmanned aerial vehicle routing problem with soft time windows constraints,” *Applied Mathematical Modelling*, tom 3, nr 38, pp. 839-852, 2014.
- [127] K. Sundar i S. Rathinam, „Algorithms for Routing an Unmanned Aerial Vehicle in the Presence of Refueling Depots,” *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, tom 11, nr 1, pp. 287-294, 2014.

- [128] X. Wang, S. Poikonen i B. Golden, „The vehicle routing problem with drones: several worst-case results,” *Optimization Letters*, tom 11, pp. 679-697, 2016.
- [129] Y. Khosiawan, I. Nielsen, N. A. D. Do i B. N. Yahya, „Concept of Indoor 3D-Route UAV Scheduling System,” w *Information Systems Architecture and Technology: Proceedings of 36th International Conference on Information Systems Architecture and Technology – ISAT 2015 – Part I, Advances in Intelligent Systems and Computing 429*, 2016.
- [130] J. Cho, G. Lim, T. Biobaku, S. Kim i H. Parsaei, „Safety and Security Management with Unmanned Aerial Vehicle (UAV) in Oil and Gas Industry,” *Procedia Manufacturing*, tom 3, pp. 1343-1349, 2015.
- [131] Y. Khosiawan, A. Khalfay i I. Nielsen, „Scheduling unmanned aerial vehicle and automated guided vehicle operations in an indoor manufacturing environment using differential evolution-fused particle swarm optimization,” *International Journal of Advanced Robotic Systems*, tom 15, nr 1, pp. 1-15, 2018.
- [132] A. Belkadi, H. Abaunza, L. Ciarletta, P. Castillo i D. Theilliol, „Distributed Path Planning for Controlling a Fleet of UAVs : Application to a Team of Quadrotors * *Research supported by the Conseil Regional de Lorraine, the Ministère de L’Education Nationale, de l’Enseignement Supérieur et de La Recherche, and the Nati,” *IFAC-PapersOnLine*, tom 50, nr 1, pp. 15983-15989, 2017.
- [133] V. K. Shetty, M. Sudit i R. Nagi, „Priority-based assignment and routing of a fleet of unmanned combat aerial vehicles,” *Computers & Operations Research*, tom 35, nr 6, pp. 1813-1828, 2008.
- [134] C. Geyer, S. Sanjiv i L. Chamberlain, „Avoiding Collisions Between Aircraft : State of the Art and Requirements for UAVs Operating in Civilian Airspace,” Tech. Report, CMU-RI-TR-08-03, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, 2008.
- [135] F. Su, Y. Li i L. Shen, „An improved ant colony algorithm for UAV route planning in complex battlefield environment,” *2009 Chinese Control and Decision Conference*, pp. 3568-3573, 2009.
- [136] W. Zhan, W. Wang, N. Chen i C. Wang, „Efficient UAV Path Planning with Multiconstraints in a 3D Large Battlefield Environment,” *Mathematical Problems in Engineering*, tom 2014, pp. 1-12, 2014.
- [137] A. Thibbotuwawa, G. Bocewicz, P. Nielsen i Z. Banaszak, „UAV Mission Planning Subject to Weather Forecast Constraints,” *Advances in Intelligent Systems and Computing*, pp. 65-76, 2019.
- [138] E. Frazzoli i F. Bullo, „Decentralized algorithms for vehicle routing in a stochastic time-varying environment,” *2004 43rd IEEE Conference on Decision Control (IEEE Cat*, tom 4, pp. 3357-3363, 2004.
- [139] K. Sundar, S. Venkatachalam i S. Rathinam, „An Exact Algorithm for a Fuel-Constrained Autonomous Vehicle Path Planning Problem,” 2016.
- [140] J. Zhang, Y. Zhao, W. Xue i J. Li, „Vehicle routing problem with fuel consumption and carbon emission,” *International Journal of Production Economics*, tom 170, p. 234–242, 2015.
- [141] Y. Feng, R.-Q. Zhang i G. Jia, „Vehicle Routing Problems with Fuel Consumption and Stochastic Travel Speeds,” *Mathematical Problems in Engineering*, tom 2017, pp. 1-16, 2017.
- [142] J. Zhang, J. F. Campbell, D. C. Sweeney II i A. C. Hupman, „Energy consumption models for delivery drones: A comparison and assessment,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, tom 90, 2021.

- [143] G. W. Kinney, R. R. Hill i J. T. Moore, „Devising a quick-running heuristic for an unmanned aerial vehicle (UAV) routing system,” *Journal of the Operational Research Society*, tom 56, nr 7, pp. 776-786, 2005.
- [144] V. F. Yu i S.-W. Lin, „Multi-start simulated annealing heuristic for the location routing problem with simultaneous pickup and delivery,” *Applied Soft Computing*, tom 24, p. 284–290, 2014.
- [145] Z. Qian, G. Wang, J. Wang i Y. Shi, „Route Planning of UAV Based on Improved Ant Colony Algorithm,” w *International Conference on Logistics Engineering, Management and Computer Science (LEMCS 2015)*, 2015.
- [146] İ. Sariçiçek i Y. Akkuş, „Unmanned Aerial Vehicle hub-location and routing for monitoring geographic borders,” *Applied Mathematical Modelling*, tom 39, nr 14, p. 3939–3953, 2015.
- [147] G. Bocewicz, G. Radzki, I. Nielsen, M. Witeczak i Z. Banaszak, „UAVs fleet mission planning robust to changing weather conditions,” *IFAC-PapersOnLine*, tom 53, nr 2, pp. 10518-10524, 2022.
- [148] G. Radzki, P. Nielsen, G. Bocewicz i Z. Banaszak, „UAV Fleet Mission Planning Subject to Robustness Constraints,” *DCAI 2020: Distributed Computing and Artificial Intelligence, Special Sessions, 17th International Conference* , pp. 35-47, 2020.
- [149] D. Habib, H. Jamal i S. A. Khan, „Employing Multiple Unmanned Aerial Vehicles for Co-Operative Path Planning,” *International Journal of Advanced Robotic Systems*, tom 10, nr 5, p. 235, 2013.
- [150] C.-M. Tseng, C.-K. Chau, K. Elbassioni i M. Khonji, „Autonomous Recharging and Flight Mission Planning for Battery-operated Autonomous Drones. 1, 1, Article,” tom 25, nr 1, pp. 1-10, 2017.
- [151] J. Zhang, L. Jia, S. Niu, F. Zhang, L. Tong i X. Zhou, „A Space-Time Network-Based Modeling Framework for Dynamic Unmanned Aerial Vehicle Routing in Traffic Incident Monitoring Applications,” *Sensors*, tom 15, nr 6, p. 13874–13898, 2015.
- [152] G. J. Leishmann, *Principles of Helicopter Aerodynamics*, Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [153] J. C. Rubio i S. Kragelund, „The trans-pacific crossing: long range adaptive path planning for UAVs through variable wind fields,” w *22nd Digital Avionics Systems Conference Proceedings (Cat No 03CH37449) DASC-03*, 2003.
- [154] T. Nguyen i T.-C. Au, „Extending the Range of Delivery Drones by Exploratory Learning of Energy Models,” w *In Proceedings of the 16th Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems (AAMAS '17)*, 2017.
- [155] C. C. Murray i A. G. Chu, „The flying sidekick traveling salesman problem: Optimization of drone-assisted parcel delivery,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, tom 54, pp. 86-109, 2015.
- [156] N. Agatz, P. Bouman i M. Schmidt, „Optimization approaches for the traveling salesman problem with drone,” *Transportation Science*, tom 52, pp. 965-981, 2018.
- [157] D. Schermer, M. Moeini i O. Wendt, „A hybrid VNS/Tabu search algorithm for solving the vehicle routing problem with drones and en route operations,” *Computers & Operations Research*, tom 109, pp. 134-158, 2019.
- [158] Y. Liu, „An optimization-driven dynamic vehicle routing algorithm for on-demand meal delivery using drones,” *Computers & Operations Research*, tom 111, pp. 1-20, 2019.
- [159] C. C. Murray i R. Raj, „The multiple flying sidekicks traveling salesman problem: Parcel delivery with multiple drones,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, tom 110, pp. 368-398, 2020.

- [160] P. Kitjacharoenchai, B.-C. Min i S. Lee, „Two echelon vehicle routing problem with drones in last mile delivery,” *International Journal of Production Economics*, tom 225, p. 107598, 2022.
- [161] D. Chauhan, A. Unnikrishnan i M. Figliozzi, „Maximum coverage capacitated facility location problem with range constrained drones,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, tom 99, pp. 1-1, 2019.
- [162] S. M. Shavarani, M. G. Nejad, F. Rismanchian i G. Izbirak, „Application of hierarchical facility location problem for optimization of a drone delivery system: a case study of Amazon prime air in the city of San Francisco,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, tom 95, pp. 3141-3153, 2018.
- [163] I. Hong, M. Kuby i A. T. Murray, „A range-restricted recharging station coverage model for drone delivery service planning,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, tom 90, pp. 198-212, 2018.
- [164] S. M. Ferrandez, T. Harbison, T. Weber, R. Sturges i R. Rich, „Optimization of a truck-drone in tandem delivery network using k-means and genetic algorithm,” *Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)*, tom 9, nr 2, pp. 374-388, 2016.
- [165] Q. M. Ha, Y. Deville, Q. D. Pham i H. M. Hà, „On the min-cost Traveling Salesman Problem with Drone,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, tom 86, pp. 597-621, 2018.
- [166] H. Huang, A. V. Savkin i C. Huang, „Reliable Path Planning for Drone Delivery Using a Stochastic Time-Dependent Public Transportation Network,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, tom 22, nr 8, pp. 4941-4950, 2021.
- [167] A. M. Moore, „Innovative scenarios for modeling intra-city freight delivery,” *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, tom 3, p. 100024, 2019.
- [168] A. Goodchild i T. Jordan, „Delivery by drone: An evaluation of unmanned aerial vehicle technology in reducing CO2 emissions in the delivery service industry,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, tom 61, nr A, pp. 58-67, 2018.
- [169] R. D'Andrea, „Guest Editorial Can Drones Deliver?,” *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, tom 11, nr 3, pp. 647-648, 2014.
- [170] C.-M. Tseng, C.-K. Chau, K. M. Elbassioni i M. Khonji, „Flight Tour Planning with Recharging Optimization for Battery-operated Autonomous Drones,” 2017. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/Flight-Tour-Planning-with-Recharging-Optimization-Tseng-Chau/76d2307395999118ca3fb406c1d95e337bf3953b?p2df>. [Data uzyskania dostępu: 21 03 2022].
- [171] M. A. Figliozzi, „Lifecycle modeling and assessment of unmanned aerial vehicles (Drones) CO2e emissions,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, tom 57, pp. 251-261, 2017.
- [172] C.-M. Tseng, S. C.-K. Chau, K. Elbassioni i M. Khonji, „Autonomous Recharging and Flight Mission Planning for Battery-operated Autonomous Drones,” 12 Wrzesień 2017. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1703.10049>. [Data uzyskania dostępu: 2022 Czerwiec 16].
- [173] A. J. Lohn, „What's the buzz? The city-scale impacts of drone delivery (No. RR-1718-RC).,” 2017.
- [174] Y. Zeng, J. Xu i R. Zhang, „Energy Minimization for Wireless Communication With Rotary-Wing UAV,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, tom 18, nr 4, pp. 2329-2345, 2019.

- [175] H. Y. Jeong, B. D. Song i S. Lee, „Truck-drone hybrid delivery routing: Payload-energy dependency and No-Fly zones,” *International Journal of Production Economics*, tom 214, pp. 220-233, 2019.
- [176] T. Kirschstein, „Comparison of energy demands of drone-based and ground-based parcel delivery services,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, tom 78, p. 102209, 2020.
- [177] J. Tian, L. Shen i Y. Zheng, „Genetic Algorithm Based Approach for Multi-UAV Cooperative Reconnaissance Mission Planning Problem,” *Lecture Notes in Computer Science*, tom 4203, pp. 101-110, 2006.
- [178] G. Radzki, Bocewicz Grzegorz, J. Wikarek, P. Nielsen i Z. Banaszak, „Comparison of exact and approximate approaches to UAVs mission contingency planning in dynamic environments,” *Mathematical Biosciences and Engineering*, tom 19, nr 7, pp. 7091-7121, 2022.
- [179] M. Lujak i H. Billhardt, „A Distributed Algorithm for Dynamic Break Scheduling in Emergency Service Fleets,” 2017. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/320211690_A_Distributed_Algorithm_for_Dynamic_Break_Scheduling_in_Emergency_Service_Fleets. [Data uzyskania dostępu: 09 07 2022].
- [180] B. D. Song, H. Park i K. Park, „Toward flexible and persistent UAV service: Multi-period and multi-objective system design with task assignment for disaster management,” *Expert Systems with Applications*, tom 206, p. 117855, 2022.
- [181] G. Radzki, G. Bocewicz, P. Golińska-Dawson, M. Jasiulewicz-Kaczmarek, M. Witczak i Z. Banaszak, „Periodic planning of UAVs' fleet mission with the uncertainty of travel parameters,” w *2021 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*, Luxembourg, Luxembourg, 2021.
- [182] P. Sitek i J. Wikarek, „A multi-level approach to ubiquitous modeling and solving constraints in combinatorial optimization problems in production and distribution,” *Applied Intelligence*, tom 48, pp. 1344-1367, 2018.
- [183] T. K. Ralphs, L. Kopman, W. R. Pulleybank i L. E. Trotter, „On the capacitated vehicle routing problem,” *Mathematical Programming*, tom 94, pp. 343-359, 2003.
- [184] H. Yaman, „Formulations and Valid Inequalities for the Heterogeneous Vehicle Routing Problem,” *Mathematical Programming*, tom 106, pp. 365-390, 2006.
- [185] Y. Kuo, „Using simulated annealing to minimize fuel consumption for the time-dependent vehicle routing problem,” *Computers & Industrial Engineering*, tom 59, nr 1, pp. 157-165, 2010.
- [186] B. F. Moghaddam, R. Ruiz i J. S. Sadjadi, „Vehicle routing problem with uncertain demands: An advanced particle swarm algorithm,” *Computers & Industrial Engineering*, tom 62, nr 1, pp. 306-317, 2012.
- [187] S. M. LaValle, *Planning Algorithms*, Cambridge University Press, 2006.
- [188] J. J. Enright, E. Frazzoli, M. Pavone i K. Savla, *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*, 2015.
- [189] D. Rathbun, S. Kragelund, A. Pongpunwattana i B. Capozzi, „Proceedings. The 21st Digital Avionics Systems Conference,” w *An evolution based path planning algorithm for autonomous motion of a UAV through uncertain environments*, 2010.
- [190] Y. Guang i V. Kapila, „Optimal path planning for unmanned air vehicles with kinematic and tactical constraints,” w *Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control, 2002.*, Las Vegas, 2002.
- [191] A. J. Pohl i G. B. Lamont, „Multi-objective UAV mission planning using evolutionary computation,” *2008 Winter Simulation Conference*, pp. 1268-1279, 2008.

- [192] M. Adbelhafiz, A. Mostafa i A. Girard, „Vehicle Routing Problem Instances: Application to Multi-UAV Mission Planning,” w *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, 2010.
- [193] B. D. Song, K. Park i J. Kim, „Persistent UAV delivery logistics: MILP formulation and efficient heuristic,” *Computers & Industrial Engineering*, tom 120, pp. 418-428, 2018.
- [194] X.-f. Liu, Z.-w. Guan, Y.-q. Song i D.-s. Chen, „An optimization model of UAV route planning for road segment surveillance,” *Journal of Central South University*, tom 21, nr 6, pp. 2501-2510, 2014.
- [195] K. Xu, X. Hong, M. Gerla, H. Ly i D. Gu, „Landmark routing in large wireless battlefield networks using UAVs,” *2001 MILCOM Proceedings Communications for Network-Centric Operations: Creating the Information Force (Cat. No.01CH37277)*, pp. 230-234, 2001.
- [196] I. Sung i P. Nielsen, „Zoning a Service Area of Unmanned Aerial Vehicles for Package Delivery Services,” *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, tom 97, nr 3-4, pp. 719-731, 2019.
- [197] J. Hall i D. Anderson, „Reactive route selection from pre-calculated trajectories – application to micro-UAV path planning,” *The Aeronautical Journal*, tom 115, nr 1172, pp. 635-640, 2011.
- [198] A. Kashyap, D. Ghose, P. P. Menon, P. Sujit i K. Das, „UAV Aided Dynamic Routing of Resources in a Flood Scenario,” *2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2019.
- [199] C. Sampedro, H. Bavle, J. L. Sanchez-Lopez, R. A. Suárez Fernández, A. Rodríguez-Ramos, M. Molina i P. Campoy, „A flexible and dynamic mission planning architecture for UAV swarm coordination,” *2016 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pp. 355-363, 2016.
- [200] O. S. Oubbati, C. Noureddine, A. Lakas, S. Bitam i P. Lorenz, „U2RV: UAV-assisted reactive routing protocol for VANETs,” *International Journal Communication Systems*, p. e4104, 2020.

Spis ilustracji

Rys. 2.1 Charakterystyka problemów marszrutyzacji pojazdów.....	19
Rys. 2.2 Taksonomia problemów marszrutyzacji pojazdów uwzględniająca rozważany problem	22
Rys. 2.3 Klasyfikacja algorytmów wykorzystywanych przy rozwiązywaniu problemów klasy VRP (opracowanie własne na podstawie literatury [102, 103])	34
Rys. 2.4 Hierarchiczna reprezentacja systemu transportowego związana z planowaniem misji floty BSP (opracowanie własne na podstawie literatury [27])	36
Rys. 2.5 Czynniki wpływające na zużycie baterii BSP (opracowanie własne na podstawie literatury [21])	40
Rys. 3.1 Idea planowania proaktywno-reaktywnego (opracowanie własne)	44
Rys. 3.2 Sieć transportowa a) oraz zdefiniowane zapotrzebowania na towar b) (opracowanie własne)	45
Rys. 3.3 Prognozowane warunki pogodowe a), przykład funkcji odporności misji b) (opracowanie własne)	46
Rys. 3.4 Plan proaktywny realizacji misji floty BSP dla sieci z Rys. 3.3 (opracowanie własne)	47
Rys. 3.5 Realizacja misji 1S a) oraz wykresy funkcji odporności dla floty $U = u_1, u_2, u_3, u_4$ b) (opracowanie własne)	48
Rys. 3.6 Zmiana warunków pogodowych (opracowanie własne).....	49
Rys. 3.7 Misja 2S po zmianie warunków pogodowych a), wykresy funkcji odporności b)	49
Rys. 3.8 Plan reaktywny dla zakłócenia $IS(t^*)$ z Rys. 3.7.....	50
Rys. 3.9 Graficzna ilustracja nieliniowej zależności $P_{i,jk\theta}, vw$ od $v_{ai,j}(\theta, vw)$	55
Rys. 3.10 Przykład funkcji wypukłej w polarnym układzie współrzędnych - opracowanie własne	56
Rys. 3.11 Wykresy funkcji: a) $A\theta = a \times \cos\theta + b \times \sin\theta$, b) $B\theta = a \times \cos\theta +$ $b \times \sin\theta^2 + c$ (opracowanie własne)	60
Rys. 3.12 Przykładowe parametry techniczne BSP a), odpowiadające im wartości R i RG b) (opracowanie własne).....	61
Rys. 3.13 Dyskretyzacja funkcji $Y_{k,l}(\theta)$ a) funkcja $Y_{k,l}(\theta)$, b) wielokąt $Y_{k,l}^*(\theta)$ (opracowanie własne)	62
Rys. 4.1 Algorytm proaktywno-reaktywnego planowania odpornych misji lotu floty BSP (opracowanie własne)	65
Rys. 4.2 Algorytm proaktywnego planowania misji lotów BSP (opracowanie własne)	67
Rys. 4.3 Dane wejściowe: sieć transportowa a), prognozowane warunki pogodowe b), okna czasowe oraz zapotrzebowanie na towar c) (opracowanie własne)	67
Rys. 4.4 Przykład proaktywnego planu misji S - marszrutyzacji BSP a), funkcje odporności b), harmonogram dostaw c)	68
Rys. 4.5 Algorytm reaktywnego planowania misji lotów floty BSP..	70
Rys. 4.6 Zmiana warunków pogodowych (opracowanie własne).....	71

Rys. 4.7 Misja S po zmianie warunków pogodowych a), funkcja odporności $Y_{1\theta}$ przed i po zmianie warunków pogodowych (opracowanie własne)	72
Rys. 4.8 Przykład reaktywnego planowania misji $*S$ plan misji: marszruty BSP a), funkcje odporności misji b), harmonogram dostaw c) (opracowanie własne)	73
Rys. 4.9 Hierarchiczna reprezentacja systemu transportowego planowania misji floty BSP (opracowanie własne na podstawie literatury [27])	74
Rys. 5.1 Sieć transportowa a) oraz zdefiniowane zapotrzebowania na towar b) (opracowanie własne)	76
Rys. 5.2 Prognozowane warunki pogodowe (opracowanie własne).....	76
Rys. 5.3 Plan proaktywny realizacji misji floty BSP dla sieci z Rys. 5.1 (opracowanie własne)	78
Rys. 5.4 Zmiana warunków pogodowych (opracowanie własne).....	80
Rys. 5.5 Reaktywny plan misji lotu wyznaczony zgodnie z zasadą nr 2 (opracowanie własne)	81
Rys. 5.6 Sieć transportowa a) oraz zdefiniowane zapotrzebowania na towar nowych punktów dostaw b) (opracowanie własne)	82
Rys. 5.7 Reaktywny plan misji lotu wyznaczony zgodnie z zasadą nr 1 (opracowanie własne)	83
Rys. 5.8 Reaktywny plan misji lotu wyznaczony zgodnie z zasadą nr 3	85
Rys. 5.9 Graficzna reprezentacja scenariusza testowego (opracowanie testów)	86
Rys. 5.10 Porównanie czasu obliczeń dla środowiska IBM ILOG CPLEX oraz algorytmu genetycznego (warunek stopu $C1$) dla $W_{1\theta} = 9ms, \forall \theta \in [0^\circ, 360^\circ)$	91
Rys. 5.11 Porównanie wyników eksperymentów przeprowadzonych dla środowiska IBM ILOG CPLEX oraz algorytmu genetycznego (warunek stopu $C2$ a) oraz $C3$ b)) dla $W_{1\theta} = 9ms, \forall \theta \in [0^\circ, 360^\circ)$	92
Rys. 5.12 Porównanie wyników eksperymentów przeprowadzonych dla środowiska IBM ILOG CPLEX oraz algorytmu genetycznego (warunek stopu $C2$) dla $W_{2\theta} = 10ms, \forall \theta \in [0^\circ, 360^\circ)$	93
Rys. 5.13 Porównanie wyników eksperymentów przeprowadzonych dla środowiska IBM ILOG CPLEX oraz algorytmu genetycznego (warunek stopu $C2$) dla $W_{3\theta} = 11ms, \forall \theta \in [0^\circ, 360^\circ)$	94

Spis tabel

Tab. 2.1	Warianty VRP na przestrzeni lat (opracowanie własne na podstawie literatury [79])	25
Tab. 2.2	Popularność algorytmów na przestrzeni lat (opracowanie własne na podstawie literatury [79])	34
Tab. 2.3	Korelacja między wariantami problemów VRP, a algorytmami (opracowanie własne na podstawie literatury [79])	35
Tab. 2.4	Strategie unikania kolizji ze względu na środowisko wykonywania misji	37
Tab. 2.5	Czynniki wpływające na zużycie energii przez BSP (opracowanie własne na podstawie literatury [137])	38
Tab. 2.6	Podsumowanie kluczowych cech modeli teoretycznych i regresyjnych zużycia energii przez BSP w literaturze (opracowanie własne na podstawie literatury [137])	42
Tab. 3.1	Parametry techniczne BSP.....	45
Tab. 3.2	Parametry techniczne BSP.....	63
Tab. 3.3	Wyniki przeprowadzonych eksperymentów (opracowanie własne)	63
Tab. 4.1	Parametry techniczne BSP.....	68
Tab. 5.1	Parametry techniczne BSP.....	76
Tab. 5.2	Wykresy odporności misji floty BSP (opracowanie własne)	79
Tab. 5.3	Parametry techniczne BSP.....	87
Tab. 5.4	Wyniki eksperymentów przeprowadzonych dla $W1\theta = 9ms, \forall \theta \in [0^\circ, 360^\circ)$	88
Tab. 5.5	Wyniki eksperymentów przeprowadzonych dla $W2\theta = 10ms, \forall \theta \in [0^\circ, 360^\circ)$	89
Tab. 5.6	Wyniki eksperymentów przeprowadzonych dla $W3\theta = 11ms, \forall \theta \in [0^\circ, 360^\circ)$	90