

Grzegorz BOCEWICZ¹, Izabela NIELSEN², Zbigniew BANASZAK¹

¹ Politechnika Koszalińska

²Department of Materials and Production, Aalborg University, Dania

MODEL DEKLARATYWNY PROBLEMU MARSZRUTYZACJI BEZZAŁOGOWYCH POJAZDÓW POWIETRZNYCH I SERWISUJĄCYCH JE MOBILNYCH STACJI WYMIANY BATERII

Streszczenie. Rozważany jest system jednoczesnej, wieloasortymentowej produkcji rytmicznej, w którym operacje transportu wewnętrznego realizowane są przez flotę autonomicznych pojazdów powietrznych (APP). Baterie zasilanych elektrycznie APP wymieniane są w wyznaczonych punktach przez mobilne stacje wymiany baterii (MWB). Rozważany problem, sprowadza się do wyznaczenia cyklicznie powtarzanych marszrut i odpowiadających im cyklicznych harmonogramów pracy jednostek wchodzących w skład zadanej floty APP, lokalizacji punktów wymiany baterii oraz przypisanych im terminom serwisu, a także do wyznaczenia cyklicznie powtarzany marszrut i odpowiadających im cyklicznych harmonogramów pracy jednostek wchodzących w skład zadanej floty MWB. Poszukiwane są rozwiązania minimalizujące czas przestoju wykorzystywanych APP, sumaryczne czasy przemieszczania się pojazdów flot APP i MWB oraz czas taktu obsługiwanej przez nie produkcji. Deklaratywny model analizowanego przypadku pozwala na sprowadzenie problemu marszrutyzacji do postaci problemu spełniania ograniczeń i w konsekwencji na jego rozwiązanie w środowisku Oz Mozart.

A DECLARATIVE MODELLING FRAMEWORK FOR ROUTING OF MULTIPLE UAVS IN A SYSTEM WITH MOBILE BATTERY SWAPPING STATIONS

Abstract. A flow production system with concurrently executed supply chains providing material handling/transportation services to a given set of workstations is considered. The workstations have to be serviced within preset time windows and can be shared by different supply chains. The transportation and material handling operations supporting the flow of products between the workstations are carried out by a fleet of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). The batteries on-board the UAVs are replaced at mobile battery swapping stations (MBSs). The focus of this study is a cyclic steady-state flow of products and transportation means, i.e. a state in whose cycle workstations are serviced periodically, within preset time windows, by the same transportation means travelling the same transportation routes. Under this assumption, UAV batteries are swapped at the same battery swapping points at moments which are multiples of the cycle under

consideration. Similar assumptions are made for the fleet of MBSs. To find a solution to the above problem of routing UAV and MBS fleets, one needs to determine the routes travelled by the UAVs servicing the workstations and the routes travelled by the MBSs servicing the battery swapping points, such that the total length of these routes is minimized.

1. Wprowadzenie

Operacje transportu wewnętrznego, jak też transportu międzystanowiskowego, mogą być realizowane za pomocą różnych środków, m.in. robotów i manipulatorów przemysłowych, wózków samojezdnych, suwnic itp. Oprócz rozwiązań tego typu, coraz częściej spotykane są próby wykorzystania bezzałogowych, autonomicznych pojazdów powietrznych (APP) [1, 3, 4, 5, 6, 9]. Ich zastosowanie do automatyzacji procesów intralogistyki w obszarach magazynowania i produkcji umożliwia bardziej elastyczną (wykorzystującą możliwości operowania w przestrzeni 3D) obsługę stanowisk produkcyjnych, a w konsekwencji pozwala na bieżąco zmieniać organizację oraz tempo pracy [2, 11, 17].

Aktualnie prowadzone badania obejmują wykorzystanie APP w zakresie zadań kompletacji i paletyzacji, a także konfekcjonowania i pakowania towarów [8]. Przewiduje się, że z czasem obejmą również operacje związane z przemieszczaniem materiałów i produktów, tak między poszczególnymi wydziałami, jak i wewnątrz wydziałów, a także przemieszczania materiałów i związanych z tym prac manipulacyjnych typowych dla transportu międzystanowiskowego [11].

Skalę i tempo przemysłowych zastosowań napędzanych elektrycznie APP ogranicza: konieczność okresowej wymiany baterii [7, 9-12], zachodzenie na siebie (nakładanie się fragmentów) korytarzy powietrznych wyznaczonych do przemieszczania się APP, a także wybrane parametry techniczne określające ich udźwig, rozwijane prędkości czy też ograniczenia manewrowe. Celem skrócenia przerw związanych z ładowaniem baterii wprowadzane są już rozwiązania umożliwiające ich wymianę za pomocą specjalnie skonstruowanych stacji (*ang. a „hot” battery swap*) [9] bez potrzeby wyłączania silników dokujących w nich pojazdów. Łatwo też zauważyć, że przez analogię do rozwiązań wykorzystujących mobilne stacje wymiany akumulatorów (*ang. mobile battery swapping vans* [12]) umożliwiających wymianę baterii w samych chodach napędzanych elektrycznie podobne technologie mogą znaleźć swoje zastosowanie w długotrwałych/długodystansowych misjach APP.

Niniejsza praca wpisuje się w zakres wcześniej prowadzonych badań podejmujących problem marszrutyzacji i harmonogramowania floty APP uwzględniający ograniczenia wynikające z cyklicznego charakteru obsługiwanego przepływu jednoczesnej, potokowej produkcji wieloasortymentowej [1, 2, 11, 14]. Celem tych badań były rozwiązania minimalizujące czas przestoju APP oraz czas taktu obsługiwanego przez nie produkcji. Łatwo zauważyć, że w przypadku powtarzających się cyklicznie misji APP, w realizowanych marszrutach, oprócz operacji załadunku/rozładunku towarów występować muszą również operacje wymiany baterii. Powtarzający się, cykliczny przebieg marszrut APP oraz szybkość wyczerpywania się baterii pozwala wyznaczyć lokalizację punktów wymiany baterii oraz momenty w których wymiany te winny być dokonywane [2]. Wyznaczona w ten

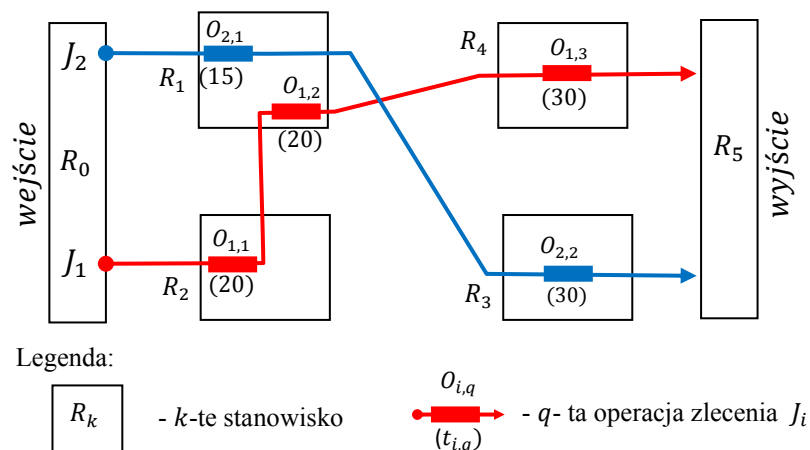
sposób sieć (przypominająca sieć komunikacji miejskiej) punktów, w których winna następować wymiana baterii, może być obsługiwana przez flotę mobilnych stacji wymiany baterii (MWB) pojawiających się w określonych punktach sieci zgodnie z zadanym cyklicznym harmonogramem realizowanych w nich serwisów wymiany.

W przedstawionym kontekście, rozważany w pracy problem marszrutyzacji floty MBW (stanowiący swoiste rozszerzenie problemu marszrutyzacji floty APP) sprowadza się do wyznaczenia rozwiązania minimalizującego licznosc floty mobilnych stacji oraz sumaryczny czas przemieszczania się pojazdów. NP-trudny charakter rozważanego problemu marszrutyzacji uzasadnia przyjęcie wykorzystywanego w niniejszej pracy modelu deklaratywnego pozwalającego na sprowadzenie go do postaci problemu spełniania ograniczeń, a w konsekwencji do jego rozwiązania w środowisku Oz Mozart.

W rozdziale 2, przedstawiono przykład ilustrujący problem marszrutyzacji floty APP w systemie potokowej produkcji wielosortymentowej, tzn. problemu rozwiązanie, którego umożliwi wyznaczenie lokalizacji punktów wymiany baterii. Rozdział 3 omawia deklaratywny model problemu marszrutyzacji APP i serwisujących je MWB. Model ten sprowadzony do postaci problemu spełnienia ograniczeń obejmuje model problemu marszrutyzacji floty APP umożliwiający wyznaczenie lokalizacji punktów wymiany baterii oraz model problemu marszrutyzacji floty MWB serwisującej APP. W rozdziale 4 opisane zostały, wykonane w środowisku Oz Mozart, eksperymenty komputerowe ilustrujące możliwości praktycznego wykorzystania proponowanego podejścia. Ważniejsze wnioski i kierunki przyszłych badań sformułowano w rozdziale 5.

2. Wyznaczanie lokalizacji punktów wymiany baterii

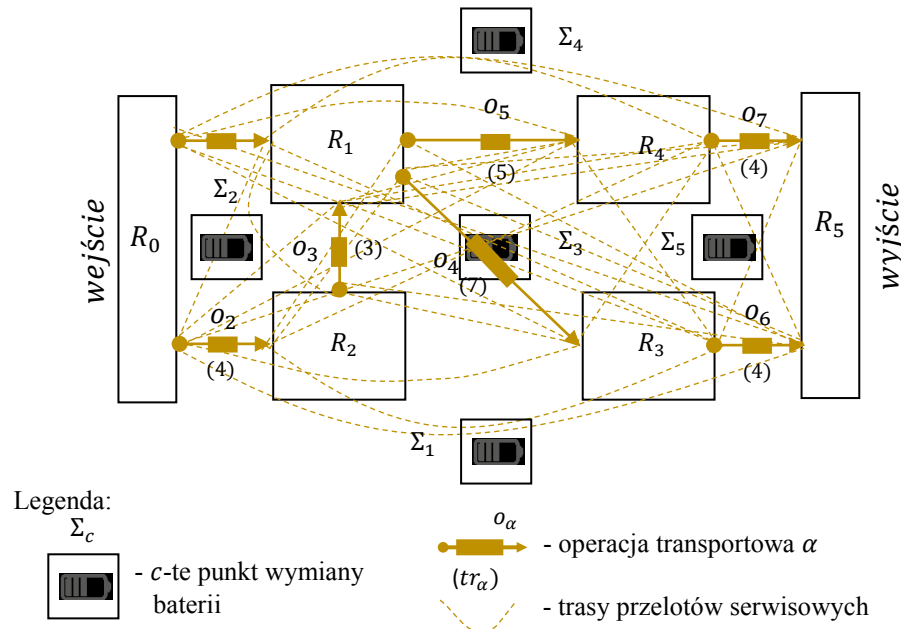
W systemie produkcyjnym złożonym z 4 stanowisk o strukturze jak na rysunku 1 realizowana jest jednoczesna potokowa produkcja dwóch różnych grup wyrobów.



Rys. 1. Schemat rozmieszczenia elementów systemu jednoczesnej, wielosortymentowej produkcji seryjnej

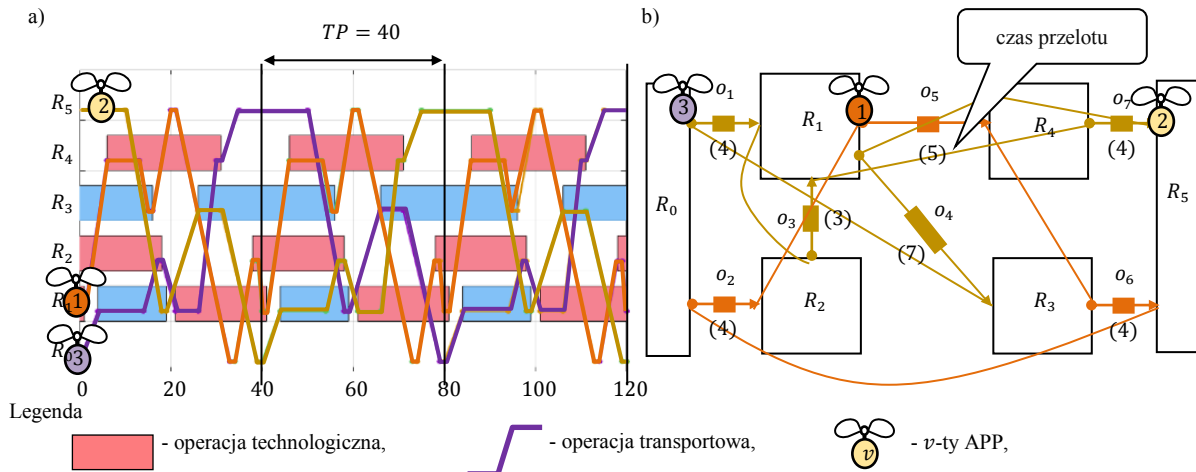
Marszruta technologiczna wyrobu J_1 , oznaczana kolorem czerwonym, przebiega przez stanowiska R_1 , R_2 i R_4 , dla których czasy operacji technologicznych wynoszą

odpowiednio 20 u.j.c. (umownych jednostek czasu) dla $O_{1,1}$, 20 u.j.c. dla $O_{1,2}$ oraz 30 u.j.c. dla $O_{1,3}$. Z kolei marszruta technologiczna wyrobu J_2 , oznaczana kolorem niebieskim, przebiega przez stanowiska R_1, R_3 , na których czasy operacji technologicznych wynoszą odpowiednio 15 u.j.c. dla $O_{2,1}$ i 30 u.j.c. dla $O_{2,2}$.



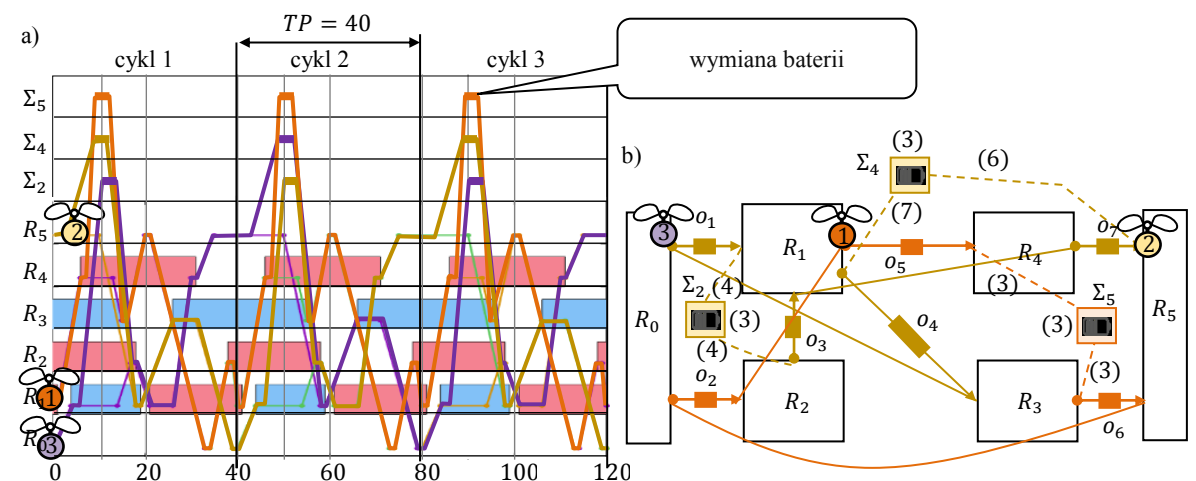
Rys. 2. Struktura potencjalnych tras przelotowych APP dopuszczalnych w systemie z rysunku 1.

Przyjmijmy, że dane są potencjalne, dopuszczalne trasy przelotowe oraz operacje transportu międzystanowiskowego o_1, \dots, o_7 realizowane są przez flotę trzech APP U_1, U_2 , i U_3 – rys. 2. Przykładowe trajektorie cyklicznych przelotów APP dla U_1 oraz U_2/U_3 (U_3 przemieszcza się wzdłuż tej samej trajektorii co U_2) przedstawia rysunek 3b. Przyjmując, że czas każdej z operacji o_α i czasy przelotów serwisowych (pomiędzy kolejnymi operacjami o_k, o_l trajektorii cyklicznie powtarzającej się misji) zadane są jak na rysunku 3b, ilustrację przebiegu przykładowych trajektorii floty APP przedstawia rysunek 3a. Rozwiązanie to w przypadku floty składającej się z 3 APP skutkuje taktowaniem produkcji $TP = 40$ u.j.c. Przez takt produkcji TP rozumiany jest tutaj czas upływający pomiędzy wyprodukowaniem dwóch kolejnych elementów danej grupy wyrobów.



Rys. 3. Diagram Gantta przepływu produkcji i przemieszczania się APP realizujących:
 a) operacje transportu międzystanowiskowego, b) przebiegi cyklicznych trajektorii APP

Dla tak wyznaczonej wartości taktu produkcji poszukiwane są modyfikacje wcześniej wyznaczonych trajektorii, tzn. trajektorie uwzględniające punkty wymiany baterii, realizacja których nie powoduje wydłużenia taktu. Przyjmując, że czasy wymiany baterii w każdym z rozważanych punktów wymiany są takie same i równe 3 u.j.c. - nowo uzyskane rozwiązanie, gwarantujące ten sam takt produkcji, przedstawia rysunek 4. Rozwiązanie to wykorzystuje trzy spośród pięciu dopuszczalnych miejsc wymiany baterii. Przypisane im terminy serwisu APP zestawiono w tabeli 1. W każdym cyklu (40 u.j.c) pracy systemu transportowego (w rozważanym przypadku pokrywającym się z taktem produkcji), dochodzi do jednej wymiany baterii, w każdym APP.



Rys. 4. Diagram Gantta przemieszczania się APP realizujących operacje transportu międzystanowiskowego i uwzględniających operacje wymiany baterii a), przebiegi cyklicznych, uwzględniających operacje wymiany baterii, trajektorii APP z rysunku 3 b)

Tabela 1

Harmonogram obsługi APP w wybranych lokalizacjach stacji wymiany baterii

punkty wymiany baterii cykl produkcyjny	Σ_2	Σ_4	Σ_5
1	[10,13] (APP_3)	[9,12] (APP_2)	[9,12] (APP_1)
2	[50,63] (APP_2)	[49,52] (APP_3)	[49,52] (APP_1)
3	[90,103] (APP_3)	[89,92] (APP_2)	[89,92] (APP_1)

3. Model deklaratywny problemu marszrutyzacji APP i MWB

3.1. Sformułowanie problemu

Rozważany problem problemu marszrutyzacji APP i serwisujących je MWB sprowadza się do wyznaczenia cyklicznie powtarzanych marszrut i odpowiadających im cyklicznych harmonogramów pracy jednostek wchodzących w skład zadanej floty APP, lokalizacji punktów wymiany baterii oraz przypisanych im terminom serwisu, a także do wyznaczenia cyklicznie powtarzanych marszrut i odpowiadających im cyklicznych harmonogramów pracy obiektów zadanej floty MWB. Poszukiwane są rozwiązania minimalizujące czas przestoju wykorzystywanych APP, czasy przemieszczania się pojazdów floty APP i MWB oraz czas taktu obsługiwanego przez nie produkcji.

Deklaratywny model tego problemu, definiowany przez zbiór zmiennych decyzyjnych charakteryzujących rozmieszczenie elementów rozważanego systemu jednoczesnej, wieloasortymentowej produkcji seryjnej, a także parametry floty APP oraz MWB, sprowadzony do postaci problemu spełnienia ograniczeń pozwala wyróżnić dwa podproblemy składowe. Pierwszy z nich, problem marszrutyzacji floty APP pozwala na wyznaczenie lokalizacji punktów wymiany baterii oraz związane z nimi harmonogramy serwisowania APP przez MWB. Z kolei, rozwiązanie drugiego problemu marszrutyzacji floty MWB serwisującej APP, pozwala na wyznaczenie tras floty MWB minimalizujących sumaryczny czas przemieszczania się pojazdów. Modele przedstawionych problemów łączą relacje zbioru ograniczeń determinujących możliwe przebiegi misji APP i MWB oraz terminy i lokalizacje operacji serwisowych.

3.2. Marszrutyzacja floty APP

3.1. Model deklaratywny

Zbiory zmiennych decyzyjnych i łączących je ograniczeń formułujących rozważany model deklaratywny problemu marszrutyzacji APP wykorzystują poniższe symbole i oznaczenia:

Symbole:

- R_k : k -te stanowisko pracy,
- J_i : i -te zlecenie produkcyjne,
- $O_{i,q}$: q -ta operacja zlecenia J_i ,
- U_v : proces przemieszczania materiałów i związanych z tym prac

- $U\tau_\mu$: manipulacyjnych realizowany przez v – ty APP,
 $U\tau_\mu$: proces przemieszczania mobilnej stacji wymiany baterii realizowany przez μ – ty MWB,
 o_α : operacja transportowa α ,
 Σ_c : c -ty punkt wymiany baterii,
 pb_v : pojemność baterii v -tego APP,
 b_α : indeks operacji transportowej poprzedzającej o_α ,
 f_α : indeks operacji transportowej realizowanej po o_α .

Zbiory i sekwencje:

- R : zbiór stanowisk pracy R_k
 J : zbiór zleceń produkcyjnych J_i ,
 O_i : sekwencja operacji technologicznych zlecenia J_i :
 $O_i = (O_{i,1}, \dots, O_{i,q}, \dots, O_{i,lm_i})$,
 Σ : zbiór punktów wymiany baterii Σ_c ;
 p_i : marszruta technologiczna zlecenia J_i , sekwencja stanowisk pracy na których wykonywane są kolejne operacje technologiczne $O_{i,q}$:
 $p_i = (p_{i,1}, \dots, p_{i,q}, \dots, p_{i,lm_i})$, $p_{i,q} \in R$,
 Q_k : zbiór operacji technologicznych wykonywanych na stanowisku R_k ,
 \mathcal{O} : zbiór operacji transportowych o_α ,
 S_k : zbiór operacji transportowych rozpoczynających się od stanowiska R_k , $S_k \subseteq \mathcal{O}$,
 E_k : zbiór operacji transportowych kończących się na stanowisku R_k , $E_k \subseteq \mathcal{O}$,
 U : zbiór APP U_v ,
 $U\tau$: zbiór mobilnych stacji wymiany baterii MWB $U\tau_\mu$,
 B : sekwencja indeksów poprzedników operacji transportowych,
 $B = (b_1, \dots, b_\alpha, \dots, b_\omega)$, $b_\alpha \in \{0, \dots, \omega\}$,
 F : sekwencja indeksów następników operacji transportowych
 $F = (f_1, \dots, f_\alpha, \dots, f_\omega)$, $f_\alpha \in \{1, \dots, \omega\}$,
 PB : sekwencja pojemności baterii wykorzystywanych przez poszczególne jednostki wykorzystywanej floty APP:
 $PB = (pb_1, \dots, pb_v, \dots, pb_l)$, pb_v – pojemność baterii v -tego APP.

Parametry:

- m : liczba stanowisk pracy,
 n : liczba zleceń produkcyjnych,
 e : liczba punktów-wymiany baterii,
 l : wielkość floty APP,
 z : wielkość floty MWB,
 lm_i : liczba operacji technologicznych zlecenia J_i ,
 ω : liczba operacji transportowych,
 $t_{i,q}$: czas wykonania operacji $O_{i,q}$,
 tr_α : czas wykonania operacji o_α (czas przelotu),
 $dm_{\gamma,\delta}$: czas przejazdu pomiędzy punktem wymiany baterii Σ_γ a punktem Σ_δ ,

- $d_{\alpha,\beta}$: czas przelotu pomiędzy stanowiskiem na którym kończy się operacja o_α , a stanowiskiem na którym rozpoczyna się operacja o_β ,
- $db_{\alpha,c,\beta}$: czas przelotu pomiędzy stanowiskiem na którym kończy się operacja o_α , punktem wymiany baterii Σ_c i stanowiskiem, na którym rozpoczyna się operacja o_β ,
- zp : tempo rozładowania baterii (na jednostkę czasu) przez APP w trakcie oczekiwania na zasobie (zawieszenie nad stanowiskiem),
- zs : tempo rozładowania baterii (na jednostkę czasu) w trakcie lotu serwisowego,
- zl : tempo rozładowania baterii (na jednostkę czasu) w trakcie wykonywania operacji transportowej,
- tw : czas wymiany baterii,
- TP^* : wartość maksymalna taktu produkcji TP .

Zmienne decyzyjne:

- TP : takt produkcji,
- $x_{i,q}$: moment rozpoczęcia operacji $O_{i,q}$,
- $y_{i,q}$: moment zakończenia operacji $O_{i,q}$,
- xt_α : moment rozpoczęcia operacji o_α ,
- yt_α : moment zakończenia operacji o_α ,
- xs_α : moment zwolnienia zasobu zajmowanego APP po wykonaniu operacji o_α ,
- $x\tau_{\mu,c}$: moment rozpoczęcia operacji wymiany baterii w punkcie Σ_c przez μ -ty MWB,
- $y\tau_{\mu,c}$: moment zakończenia operacji wymiany baterii w punkcie Σ_c przez μ -ty MWB,
- $m\tau_{\mu,\gamma,\delta}$: zmienna determinująca marszrutę μ -tego MWB, jeśli $m\tau_{\mu,\gamma,\delta} = 1$ to μ -ty MWB przemieszcza się ze stacji Σ_γ do Σ_δ .
- lb_α : poziom naładowania baterii APP po wykonaniu operacji o_α ;
- \mathcal{O}_B : zbiór operacji transportowych, po których następuje wymiana baterii $\mathcal{O}_B \subseteq \mathcal{O}$,
- Σ_B : podzbiór punktów wymiany baterii ($\Sigma_B \subseteq \Sigma$), każdej operacji zbioru \mathcal{O}_B przypisany jest jeden punkt wymiany baterii ze zbioru Σ_B ,
- b_α : indeks operacji transportowej poprzedzającej o_α (operacja o_{b_α} and o_α są realizowane przez tego samego APP), $b_\alpha = 0$ – oznacza, że o_α jest pierwszą operacją cyklu systemu,
- f_α : indeks operacji transportowej następującej po o_α , (operacje o_α i o_{f_α} są realizowane przez ten sam APP).

Ograniczenia:

- I. Operacje technologiczne realizowane na stanowiskach pracy:

$$y_{i,q} = x_{i,q} + t_{i,q}, \quad q = 1 \dots lm_i, \quad \forall J_i \in J, \quad (1)$$

$$y_{i,q} \leq x_{i,q+1}, \quad q = 1 \dots (lm_i - 1), \quad \forall J_i \in J, \quad (2)$$

$$y_{i,q} \leq x_{i,q} + TP, \quad q = 1 \dots lm_i, \quad \forall J_i \in J, \quad (3)$$

$$(y_{i,a} \leq x_{j,b}) \vee (y_{j,b} \leq x_{i,a}), \text{ dla } O_{i,a}, O_{j,b} \in Q_k, \forall R_k \in R, \quad (4)$$

$$TP \leq TP^*. \quad (5)$$

II. Operacje wymiany baterii APP:

$$lb_\alpha = pb_v, \forall o_\alpha \in O_B, \text{ gdzie } U_v \text{ wykonuje operacj\u0119 } o_\alpha \quad (6)$$

$$d'_{\alpha,\beta} = d_{\alpha,\beta}, \forall o_\alpha \notin O_B, \quad (7)$$

$$d'_{\alpha,\beta} = db_{\alpha,c,\beta} + tw, \forall o_\alpha \in O_B, \Sigma_c = \varphi(o_\alpha) \quad (8)$$

$$lb_\alpha = lb_\beta - zp(xs_\beta - yt_\beta) - zs(xt_\alpha - xs_\beta) - zl(yt_\alpha - xt_\alpha), \quad (9)$$

$$\forall o_\alpha \notin O_B, f_\beta = \alpha,$$

$$lb_\alpha > 0, \forall o_\alpha \in O, \quad (10)$$

III. Operacje realizowane przez APP:

$$yt_\alpha = xt_\alpha + tr_\alpha, \quad \alpha = 1, 2, \dots, \omega, \quad (11)$$

$$b_\alpha = 0, \quad \forall \alpha \in BS, \quad (12)$$

BS jest l -elementowym podzbiorem zbioru $BI = \{1, 2, \dots, \omega\}$

$$b_\alpha \neq b_\beta \quad \forall \alpha, \beta \in BI \setminus BS, \quad \alpha \neq \beta, \quad (13)$$

$$f_\alpha \neq f_\beta \quad \forall \alpha, \beta \in BI, \quad \alpha \neq \beta, \quad (14)$$

$$(b_\alpha = \beta) \Rightarrow (f_\beta = \alpha), \quad \forall b_\alpha \neq 0, \quad (15)$$

$$[(b_\alpha = \beta) \wedge (b_\beta \neq 0)] \Rightarrow (yt_\beta + d'_{\beta,\alpha} \leq xt_\alpha), \quad \alpha, \beta = 1, 2, \dots, \omega, \quad (16)$$

$$[(f_\alpha = \beta) \wedge (b_\beta = 0)] \Rightarrow (yt_\alpha + d'_{\alpha,\beta} \leq xt_\beta + TP), \quad \alpha, \beta = 1, 2, \dots, \omega, \quad (17)$$

$$xs_\alpha \geq yt_\alpha, \quad \alpha = 1, 2, \dots, \omega, \quad (18)$$

$$[(f_\alpha = \beta) \wedge (b_\beta \neq 0)] \Rightarrow (xs_\alpha = xt_\beta - d'_{\alpha,\beta}), \quad \alpha, \beta = 1, 2, \dots, \omega, \quad (19)$$

$$[(f_\alpha = \beta) \wedge (b_\beta = 0)] \Rightarrow (xs_\alpha = xt_\beta - d'_{\alpha,\beta} + TP), \quad \alpha, \beta = 1, 2, \dots, \omega, \quad (20)$$

$$[(xs_\alpha < yt_\beta) \wedge (xs_\beta - TP < yt_\alpha)] \vee [(xs_\beta < yt_\alpha) \wedge (xs_\alpha - TP < yt_\beta)], \quad (21)$$

$$\forall o_\alpha, o_\beta \in S_k, \quad k = 1, \dots, m,$$

$$[(xs_\alpha < yt_\beta) \wedge (xs_\beta - TP < yt_\alpha)] \vee [(xs_\beta < yt_\alpha) \wedge (xs_\alpha - TP < yt_\beta)], \quad (22)$$

$$\forall o_\alpha, o_\beta \in E_k, \quad k = 1, \dots, m,$$

$$[(xs_\alpha < xt_\beta) \wedge (xt_\beta - TP < yt_\alpha)] \vee [(xt_\beta < yt_\alpha) \wedge (xs_\alpha - TP < yt_\beta)], \quad (23)$$

$$\forall o_\alpha \in E_k, \forall o_\beta \in S_k, \quad k = 1, \dots, m.$$

IV. Relacje łączące operacje realizowane przez APP z operacjami technologicznymi wykonywanymi na stanowiskach pracy

$$x_{i,q} = yt_\alpha + c \times TP, \quad c \in \mathbb{N}, \forall o_\alpha \in E_k, \forall O_{i,q} \in Q_k, \quad k = 1, \dots, m, \quad (24)$$

$$y_{i,q} = xt_\alpha + c \times TP, \quad c \in \mathbb{N}, \forall o_\alpha \in S_k, \forall O_{i,q} \in Q_k, \quad k = 1, \dots, m. \quad (25)$$

V. Operacje realizowane przez MWB:

$$\sum_{i=1}^e m\tau_{\mu,\gamma,i} \leq 1, \quad \forall U\tau_\mu \in U\tau, \gamma = 1 \dots e, \quad (26)$$

$$\sum_{i=1}^e m\tau_{\mu,i,\delta} \leq 1, \quad \forall U\tau_\mu \in U\tau, \delta = 1 \dots e, \quad (27)$$

$$(m\tau_{\mu,\gamma,\delta} = 1) \Rightarrow (\sum_{i=1}^e m\tau_{\mu,\delta,i} = 1), \quad \forall U\tau_{\mu} \in U\tau \quad (28)$$

$$(m\tau_{\mu,\gamma,\delta} = 1) \Rightarrow (x\tau_{\mu,\delta} \geq y\tau_{\mu,\delta} + dm_{\gamma,\delta}), \quad \forall U\tau_{\mu} \in U\tau, \quad (29)$$

$$(m\tau_{\mu,\gamma,\delta} = 1) \Rightarrow (x\tau_{\mu,\delta} \leq xt'_{\alpha}) \wedge (y\tau_{\mu,\delta} \geq yt'_{\alpha}), \quad \forall U\tau_{\mu} \in U\tau, \quad (30)$$

gdzie: xt'_{α} , yt'_{α} momenty przylotu i odlotu APP z punktu wymiany baterii Σ_{δ} (determinowany przez zbiór operacji \mathcal{O}_B).

Przedstawiony model pozwala sformułować problem marszrutyzacji, w ramach którego przyjmuje się, zbiór geograficznie rozproszonych stanowisk produkcyjnych obsługiwanych cyklicznie w zadanych oknach czasowych (np. taktu produkcji) przez flotę APP, oraz zbiór stanowisk umożliwiających wymianę ich baterii. Poszukiwana jest flota APP i marszruty jej poszczególnych elementów, gwarantująca obsługę zadanych stanowisk produkcyjnych, w zadanych momentach czasu. W kontekście wcześniej przedstawionej specyfikacji sprowadza się on do poszukiwania odpowiedzi na pytanie:

Czy istnieją marszruty (reprezentowane przez sekwencje B, F) i związana z nimi organizacja procesu wymiany baterii (zbiory \mathcal{O}_B, Σ_B) zadanej floty APP (zbiór U), które gwarantują istnienie harmonogramu produkcji ($x_{i,q}, xt_{\alpha}$) skutkującego określonym taktom produkcji ($TP \leq TP^$)?*

Decyzyjny charakter tak sformułowanego problem marszrutyzacji floty APP w sposób naturalny oddaje jego reprezentacja w postaci problemu spełnienia ograniczeń (21):

$$CS = (\mathcal{V}, \mathcal{D}, \mathcal{C}) \quad (31)$$

gdzie:

$\mathcal{V} = \{B, F, \mathcal{O}_B, X, XT, LB\}$ - zbiór zmiennych decyzyjnych,

gdzie: $X = \{x_{i,q} | i = 1 \dots n, q = 1 \dots lm_i\}$, $XT = \{xt_{\alpha} | \alpha = 1, 2, \dots, \omega\}$, $LB = \{lb_{\alpha} | \alpha = 1, 2, \dots, \omega\}$,

\mathcal{D} – skończony zbiór dziedzin zmiennych \mathcal{V} ,

\mathcal{C} – zbiór ograniczeń specyfikujących relacje łączące: kolejności wykonywania operacji zleceń produkcyjnych (1)-(3) oraz APP (27),(28), wzajemnego wykluczania operacji realizowanych zleceń produkcyjnych (4) i APP na współdzielonych zasobach korytarzy powietrznych (21)-(23), zapewniające cykliczną realizację marszrut (13)-(15), niedopuszczenie do rozładowania baterii (6)-(10), a także wynikającą z nich kolejność wykonywania operacji transportowych (11), (16)-(20) oraz ograniczenia wprowadzane przez zadany takt produkcji (5).

Rozwiązanie problemu CS (31) sprowadza się do wyznaczenia takich wartości (determinowanych przez dziedziny \mathcal{D}) zmiennych decyzyjnych B, F (marszrut APP), \mathcal{O}_B (operacji i wynikających z nich punktów Σ_B wymiany baterii) oraz X, XT (harmonogramów produkcji i realizacji operacji transportowych), dla których spełnione są wszystkie ograniczenia zadane w zbiorze \mathcal{C} (ograniczenia wzajemnego wykluczania, cyklicznego wykonywania operacji, itp.). Do rozwiązania tego typu problemów wykorzystywane są typowe środowiska programowania z ograniczeniami CP/CLP: Oz Mozart, IBM ILOG, ECLⁱPS^E.

4. Marszrutyzacja floty MWB

Znajomość liczby i rozmieszczenia punktów wymiany baterii oraz przypisanych do nich harmonogramów obsługi pozwala rozważyć kolejny problem marszrutyzacji sprowadzający się do poszukiwania floty MWB pozwalającej na obsługę wybranych, geograficznie rozproszonych punktów wymiany baterii, w ustalonych oknach czasowych. Poszukiwana jest flota MWB i marszruty jej poszczególnych elementów gwarantujące obsługę zadanych stanowisk produkcyjnych, w zadanych momentach czasu. W kontekście niżej przedstawionej specyfikacji sprowadza się on do poszukiwania odpowiedzi na pytanie:

Czy istnieją takie marszruty (reprezentowane przez $m\tau_{\mu,\gamma,\delta}$ oraz $x\tau_{\mu,\delta}$) zadanej floty MWB (zbiór $U\tau$), które gwarantują wymianę baterii APP w zadanych punktach Σ_B , w oknach czasowych dererminowanych przez ustalony harmonogram produkcji ($x_{i,q}$, x_{t_α})?

Decyzyjny charakter problemu marszrutyzacji floty MWB w sposób naturalny oddaje jego reprezentacja (32):

$$CS' = (\mathcal{V}', \mathcal{D}', \mathcal{C}') \quad (32)$$

gdzie:

$\mathcal{V} = \{M\tau, X\tau\}$ - zbiór zmiennych decyzyjnych, charakteryzujących odcinki tras jezdnych, po których mogą się poruszać MWB oraz harmonogram operacji wymiany baterii w punktach Σ_B , gdzie: $M\tau = \{m\tau_{\mu,\gamma,\delta} | \mu = 1 \dots z; \gamma, \delta = 1 \dots e\}$, $X\tau = \{x\tau_{\mu,\delta} | \mu = 1 \dots z; \delta = 1 \dots e\}$,

\mathcal{D}' - skończony zbiór dziedzin zmiennych \mathcal{V}' ,

\mathcal{C}' - zbiór ograniczeń (26)-(30) wykluczających kolizje MWB, a także zapewniających obsługę właściwych APP we właściwych momentach (zgodnie z ustalonym w ramach CS (31) harmonogramem produkcji $x_{i,q}$, x_{t_α}).

Analogicznie jak w przypadku (31) rozwiązanie problemu CS' (32) sprowadza się do wyznaczenia takich wartości (determinowanych przez dziedziny \mathcal{D}) zmiennych decyzyjnych $M\tau, X\tau$ (marszrut MWB oraz harmonogramów operacji wymiany baterii), dla których spełnione są wszystkie ograniczenia zadane w zbiorze \mathcal{C}' (wymiana baterii w oknach czasowy wynikających z harmonogramów $x_{i,q}$, x_{t_α} , itp.).

5. Eksperymenty obliczeniowe

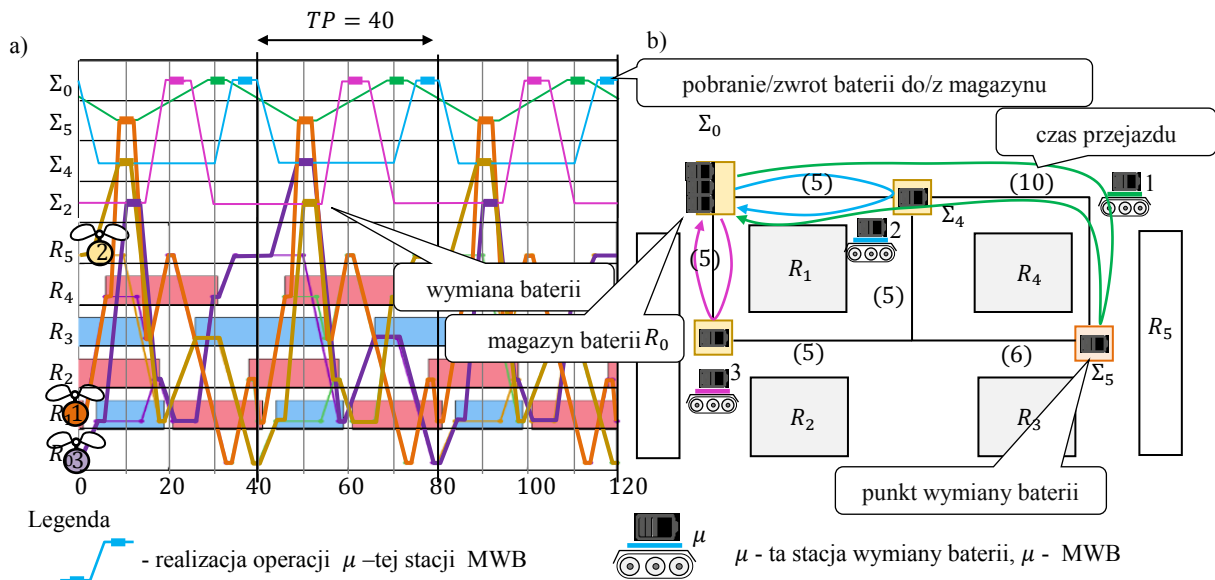
Dla wyznaczonej na rysunku 4 lokalizacji punktów wymiany baterii i związanych z nimi harmonogramów obsługi floty APP (zadanych w Tab. 1) poszukiwana jest odpowiedź na pytanie: jaka liczba, po jakich trasach poruszających się MWB jest w stanie obsłużyć APP w zadanych punktach wymiany baterii $\Sigma_B = \{\Sigma_2, \Sigma_4, \Sigma_5\}$, w wyznaczanych oknach czasowych (Tab. 1). Przy założeniu, że:

- czas wymiany baterii w każdym punkcie, w przypadku każdego APP jest taki sam i wynosi $tw = 3$ u.j.c.,
- czas przelotu serwisowego uwzględniającego wymianę baterii jest większy o 4 u.j.c. ($db_{a,c,\beta} = d_{a,\beta} + 4$) od przelotu, w którym nie dochodzi do takiej wymiany,

- pojemność baterii wynosi 200, a tempo ich rozładowania odpowiednio: $z_l = 2$ u.j.c. (podczas transportu), $z_s = 1$ u.j.c. (podczas lotu serwisowego), $z_p = 3$ u.j.c. (w stanie „zawieszenia” nad stanowiskiem),

uzyskano dwa alternatywne rozwiązania przedstawione na rysunkach 5 i 6. Rysunki te przedstawiają rozwiązania problemu CS' (32) dla systemu przedstawionego na rysunkach 1 i 2 oraz harmonogramu produkcji opisanego diagramem Gantta z rysunku 4. (Oz Mozart system, Intel Core i5-3470 3.2 GHz, 8 GB RAM, czas obliczeń 2 s).

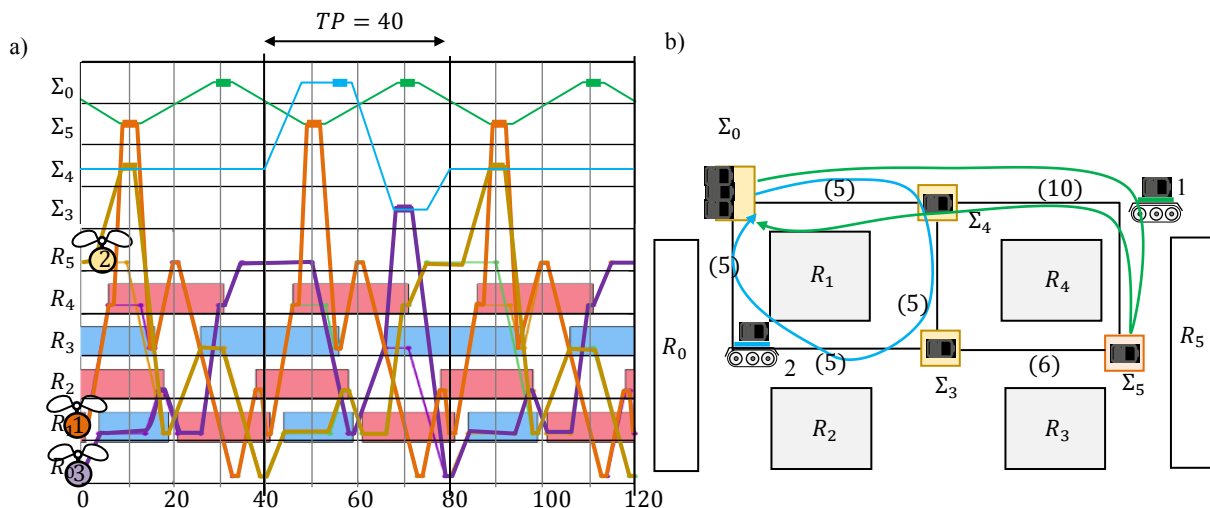
W pierwszym wypadku odpowiadającym sytuacji, w której dostępna flota składa się z 3 stacji MWB: $U\tau = (U\tau_1, U\tau_2, U\tau_3)$, uzyskano rozwiązanie obejmujące trzy marszruty przedstawione na rysunku 5b. Przebieg operacji transportowych przedstawia diagram Gantta z rysunku 5a. Wymiana baterii odbywa się w punktach $\Sigma_B = \{\Sigma_2, \Sigma_4, \Sigma_5\}$, w oknach czasowych zadanych w tabeli 1. Każdy z APP dokonuje wymiany baterii raz na cykl pracy systemu. Łatwo zauważyć, że przedstawione rozwiązanie zapewnia realizację produkcji zgodnie z zadanym harmonogramem (takt produkcji: $TP = 40$ u.j.c. – rys. 4), wymaga jednak wykorzystania trzech mobilnych stacji wymiany baterii.



Rys. 5. Diagram Gantta ilustrujący przebieg obsługi punktów wymiany baterii a), b) trajektorie marszruty floty MWB składającej się z 3 stacji wymiany baterii

W rozważanym systemie możliwe są również inne sytuacje. Przykładowe, drugie rozwiązanie wprowadza się do floty składającej się tylko z dwóch stacji MWB: $U\tau = (U\tau_1, U\tau_2)$, (rys. 6).

Rozwiązanie to uzyskane zostało w wyniku zmiany lokalizacji punktów wymiany baterii $\Sigma_B = \{\Sigma_3, \Sigma_4, \Sigma_5\}$ (Σ_2 został przez Σ_3) oraz przyjęcia założenia, że wymiana baterii w APP obejmujących U_2 i U_3 zachodzi raz na dwa cykle produkcyjne. Podobnie jak poprzednie rozwiązanie również i to zapewnia produkcję z zadanym taktom $TP = 40$ u.j.c.



Rys. 6. Diagram Gantta ilustrujący przebieg obsługi punktów wymiany baterii a),
b) trajektorie marszrut floty MWB składającej się z 2 stacji wymiany baterii

Należy zaznaczyć, że w obu przypadkach poszukiwane rozwiązanie problemu marszrutyzacji flot APP i MWB sprowadza się do wyznaczenia cyklicznie powtarzanych tras APP obsługujących dostawców i odbiorców oraz tras MWB obsługujących punkty wymiany baterii i gwarantujących zadany takt produkcji TP . Warto również podkreślić, że sumaryczne czasy przejazdu wzdłuż wyznaczonych tras w obu rozwiązaniach są takie same i wynoszą 50 u.j.c.. Zmniejszenie floty APP okupione zostało zwiększeniem pojemności (a w konsekwencji i masy) wykorzystywanych baterii. Poglębiona dyskusja konsekwencji tego faktu przedstawiona zostanie w kolejnej pracy.

6. Uwagi końcowe

Szanse nowych zastosowań APP w środowiskach typu „indoor” wiążą się z możliwościami elastycznego kształtowania bezkolizyjnych marszrut transportowych. Elastyczność tego typu rozwiązań uwidacznia się w sytuacjach wymagających częstych zmian produkcji wymuszających zmiany periodycznej obsługi punktów dostaw i odbioru towarów. Przedstawione rozważania koncentrują się na kwestiach marszrutyzacji zadanych flot APP i MWB. Na poszukiwane rozwiązanie składa się zbiór cyklicznie powtarzanych tras APP obsługujących stanowiska pracy oraz tras MWB obsługujących punkty wymiany baterii minimalizujących czas ich przemieszczania. Harmonogramy realizacji tych marszrut winny gwarantować przepływ produkcji z taktom jak najmniej odbiegającym od taktu wyznaczonego przez wąskie gardło sytemu produkcyjnego.

NP-trudny charakter rozważanego problemu zawęża zbiór metod umożliwiających jego rozwiązanie do metod heurystycznych, w szczególności do klasy algorytmów zachłanych. Zastosowanie strategii zachłanych umożliwia szybkie wyznaczenie rozwiązań dopuszczalnych, m.in. satysfakcjonujących przyjęte oczekiwania, dla problemów skali występującej w praktyce.

Przyszłe prace rozszerzone zostaną na przypadki dopuszczające występowanie uszkodzeń APP i/lub MWB, a zatem na zagadnienia rekonfiguracji trajektorii przelotu

APP i tras przejazdu MWB. Oznacza to podjęcie jakościowo nowej problematyki odpornej marszrutyzacji flot pojazdów.

Badania zostały zrealizowane w ramach projektu POIR.01.01.01-00-0485/17 „Opracowanie nowego typu wózka logistycznego oraz metody bezkolizyjnej i bezblokadowej realizacji procesów intralogistyki” finansowanego przez NCBiR.

LITERATURA

1. Bocewicz G., Nielsen P., Banaszak Z., Thibbotuwawa A., Routing and scheduling of Unmanned Aerial Vehicles subject to cyclic production flow constraints. Proc. of 15th Int. Conference on Distributed Computing and Artificial Intelligence, 2018 (in print)
2. Bocewicz G., Nielsen P., Banaszak Z., Thibbotuwawa A., Deployment of Battery Swapping Stations for Unmanned Aerial Vehicles subject to cyclic production flow constraints. Proc. of the 24th International Conference on Information and Software Technologies, 2018 (in print)
3. Gorecki T., Piet-Lahanier H., Marzat J., Balesdent M., Cooperative guidance of UAVs for area exploration with final target allocation. IFAC Proceedings Volumes. 2013, Vol. 46, Issue 19, 260-265
4. Guettier C., Lucas F., A constraint-based approach for planning unmanned aerial vehicle activities, Constraint Satisfaction for Planning and Scheduling, 2017, Vol. 31, 5, 486-497,
5. Guerriero F., Surace R., Loscri V., Natalizio E., A Multi-objective Approach for Unmanned Aerial Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows Constraints. Applied Mathematical Modelling, Elsevier, 2014, 38 (3), 839-852
6. Ho H.M., Ouaknine J. The Cyclic-Routing UAV Problem is PSPACE-Complete. In: Pitts A. (eds) Foundations of Software Science and Computation Structures. FoSSaCS 2015. Lecture Notes in Computer Science, vol. 9034, 328-342
7. Koji A. O. Suzuki, Paulo Kemper Filho, James R. Morrison, Automatic Battery Replacement System for UAVs: Analysis and Design, J Intell Robot Syst, 2012, 65:563–586, DOI 10.1007/s10846-011-9616-y
8. Manyam S. G., Rasmussen S., Casbeer D. W., Kalyanam K., Manickam S., Multi-UAV routing for persistent intelligence surveillance & reconnaissance missions. 2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), USA, 2017, 573-580
9. Michini B., Toksoz T., Redding J., Michini M., How J., Vavrina M., Vian J., Automated Battery Swap and Recharge to Enable Persistent UAV Missions, In Infotech@Aerospace 2011. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2011
10. Myers D., Batta R., Karwan M., A real-time network approach for including obstacles and flight dynamics in UAV route planning. The Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology, 2016, Vol. 13, 291
11. Park Y., Khosiawan Y., Moon I., Janardhanan M.N., Nielsen I., Scheduling System for Multiple Unmanned Aerial Vehicles in Indoor Environments Using the CSP Approach. In: Czarnowski I., Caballero A., Howlett R., Jain L. (Eds.) Intelligent Decision Technologies 2016. Smart Innovation, Systems and Technologies, Springer. Vol. 56. 2016
12. Shao S., Guo S., Qiu X., A Mobile Battery Swapping Service for Electric Vehicles Based on a Battery Swapping Van, Energies 2017, 10, 1667
13. Tan, K. C., L. H. Lee, Q. L. Zhu, and K. Ou, Heuristic methods for vehicle routing problem with time windows: Artificial Intelligence in Engineering, 2001, v. 15, p. 281-295.
14. Thibbotuwawa A., Nielsen P., Unmanned Aerial Vehicle Routing Problems: A literature review. (in print)