



Politechnika Krakowska
im. Tadeusza Kościuszki



modelling²⁰²⁴
modelowanie podróży i prognozowanie ruchu

VIII Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna
Kraków | 6-7 czerwca 2024



Optymalizacja zadań pojazdów i kierowców heterogenicznej dużej floty pojazdów

Piotr Kisielewski



**Katedra Pojazdów Szynowych
i Transportu**



**Fundusze
Europejskie**
Inteligentny Rozwój



**Rzeczpospolita
Polska**



Narodowe Centrum
Badań i Rozwoju

Unia Europejska
Europejski Fundusz
Rozwoju Regionalnego





Projekt EU/POIR: Optymalizacja planowania zadań transportowych w komunikacji miejskiej pod kątem elektromobilności



AGH

Katedra Informatyki Biznesowej i Inżynierii
Zarządzania

Prof. Marek Karkula
Prof. Jerzy Duda
Prof. Iwona Skalna
Dr Radosław Puka

Partnerzy:



Instytut Transportu

Dr hab. Adam Redmer
Dr. Szymon Fierek



Prof. Piotr Kisielewski
Dr. Marek Bauer



Katedra Systemów
Transportowych



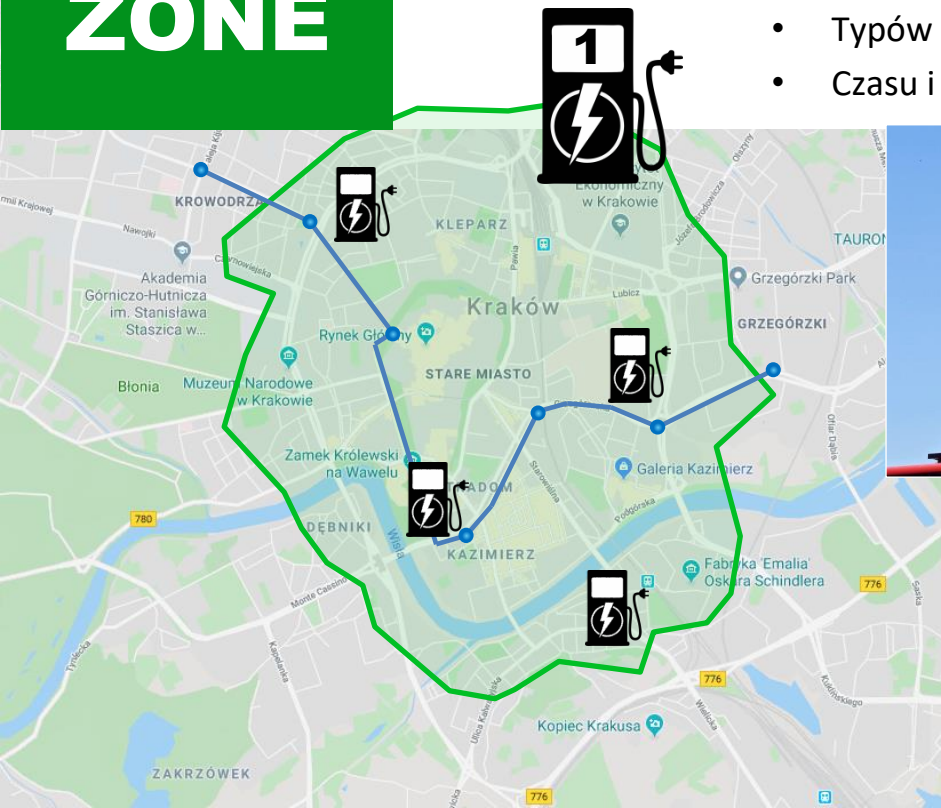
Optimalizacja planowania pojazdów elektrycznych



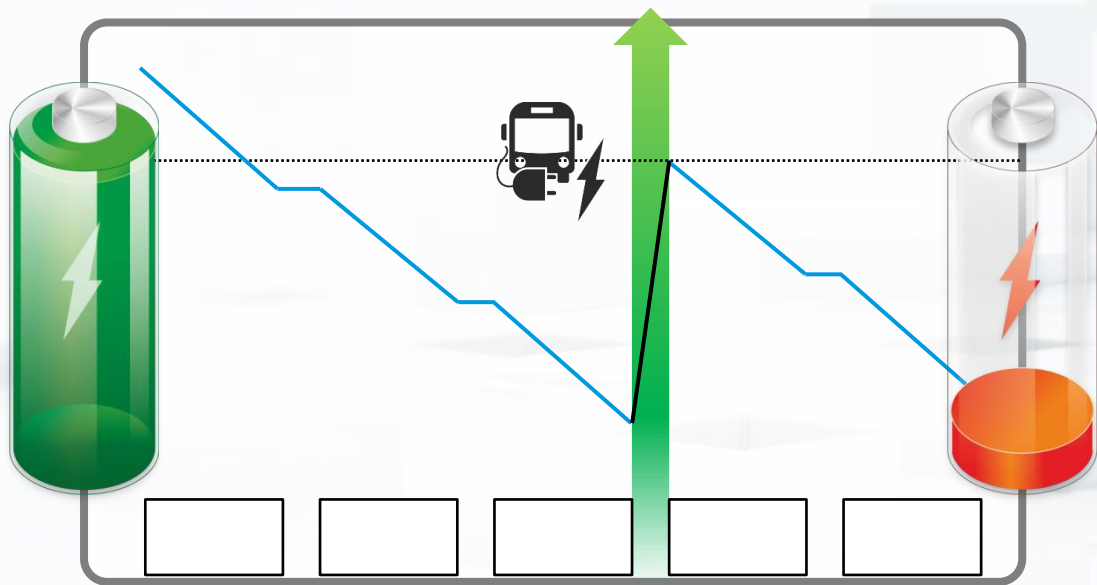
**ZERO-emission
ZONE**

Planowanie pojazdów elektrycznych z uwzględnieniem m.in.:

- Zasięgu
- Typów ładowarek\pojazdów
- Czasu i prędkości ładowania
- Dostępności ładowarki
- Infrastruktury
- Tzw. „Zielonych stref”



Wsparcie pojazdów elektrycznych



Planowanie brygad pojazdów elektrycznych

Planowanie przejazdów i postojów uwzględniających doładowanie baterii na stacjach krańcowych



city **LineDesigner**

Zdefiniowanie problemu



Problem przydziału kursów do zadań pojazdów
tj. problem brygowania
(ang. Vehicle Scheduling Problem – VSP / line blocking)

Problem przydziału kursów do zadań pojazdów
tj. problem brygowania heterogenicznej floty
pojazdów
(ang. Multi Vehicle-Type Scheduling Problem – MVTSP)

+

Problem planowania służb kierowców
(ang. Driver/Crew Scheduling Problem – D/CSP)

Problem brygowania pojazdów wraz z planowaniem służb kierowców
(ang. Vehicle and Crew Scheduling Problem – VCSP)

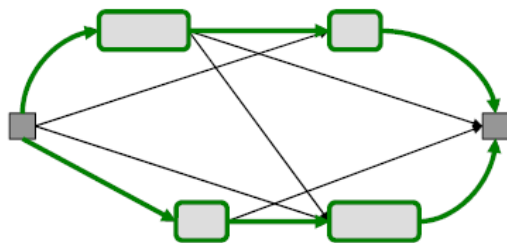
Przypadek jednej lub wielu zajezdni
(ang. Single- lub Multiple-Depot Vehicle Scheduling Problem – SD- lub MD-VCSP).

Przypadek jednej lub wielu zajezdni
(ang. Single- lub Multiple-Depot Vehicle and Crew Scheduling Problem – SD- lub MD-VCSP).

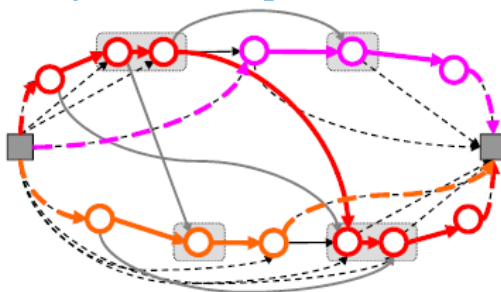
Innowacyjna optymalizacja brygad i służb

Integrated Scheduling

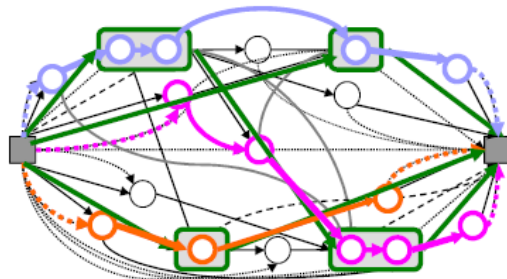
Vehicle Scheduling



Duty Scheduling



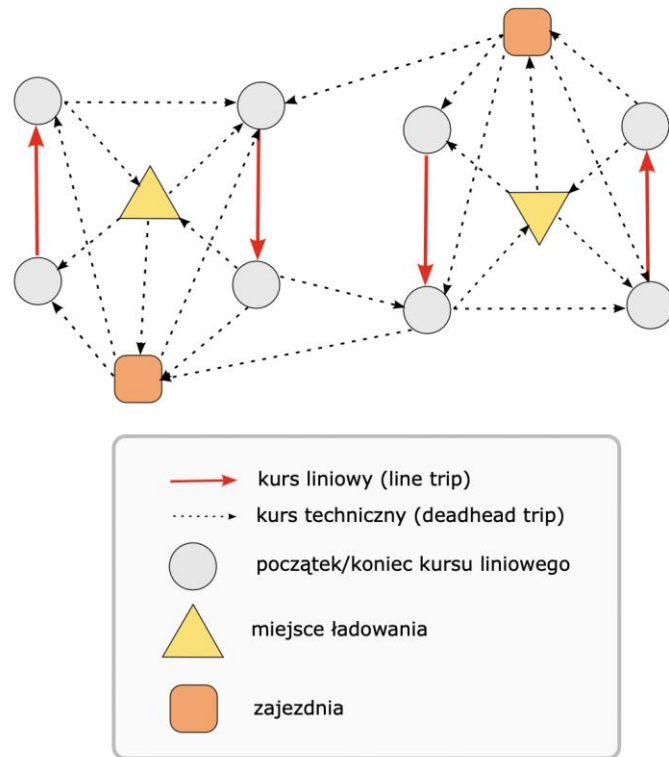
Integrated Scheduling





Założenia

- flota heterogeniczna
 - flota elektryczna wymaga dodatkowej obsługi (ładowanie baterii między realizacją kursów)
 - wielu operatorów realizujących rozłączne zadania z różnych zajezdni
 - **Cel główny:**
Minimalizacja liczby brygad/ pojazdów i służb/kierowców
- sieć transportowa:
 - zbiór zajezdni,
 - zbiór pętli (końcówek linii),
 - zbiór miejsc (do)ładowania pojazdów elektrycznych różnego typu
 - zbiór przystanków



DETERMINING LOWER BOUND ON NUMBER OF VEHICLE BLOCKS IN MULTI-DEPOT VEHICLE SCHEDULING PROBLEM WITH MIXED FLEET COVERING ELECTRIC BUSES

Jerzy DUDA¹, Szymon FIEREK², Marek KARKULA³, Piotr KISIELEWSKI⁴, Radosław PUKA⁵, Adam REDMER⁶, Iwona SKALNA⁷

^{1,3,5,7} AGH University of Science and Technology, Kraków, Poland

^{2,6} Poznań Technical University, Poznań, Poland

⁴ Cracow University of Technology, Kraków, Poland

Abstract:

Scheduling buses in public transport systems consists in assigning trips to vehicle blocks. To minimize the cost of fuel and environmental impact of public transport, the number of vehicle blocks used should be as small as possible, but sufficient to cover all trips in a timetable. However, when solving real life transportation problems, it is difficult to decide whether the number of vehicle blocks obtained from an algorithm is minimal, unless the actual minimal number is already known, which is rare, or the theoretical lower bound on the number of vehicles has been determined. The lower bound on the number of vehicle blocks is even more important and useful since it can be used both as a parameter that controls the optimization process and as the minimum expected value of the respective optimization criterion. Therefore, methods for determining the lower bound in transportation optimization problems have been studied for decades. However, the existing methods for determining the lower bound on the number of vehicle blocks are very limited and do not take multiple depots or heterogeneous fleet of vehicles into account. In this research, we propose a new practical and effective method to assess the lower bound on the number of vehicle blocks in the Multi-Depot Vehicle Scheduling Problem (MDVSP) with a mixed fleet covering electric vehicles (MDVSP-EV). The considered MDVSP-EV reflects a problem of public transport planning encountered in medium-sized cities. The experimental results obtained for a real public transport system show the great potential of the proposed method in determining the fairly strong lower bound on the number of vehicle blocks. The method can generate an estimated distribution of the number of blocks during the day, which may be helpful, for example, in planning duties and crew scheduling. An important advantage of the proposed method is its low calculation time, which is very important when solving real life transportation problems.

Keywords: vehicle scheduling, lower bound, public transport, mixed fleet, electric buses

Keywords: public transport; electric bus; scheduling; MILP

Jerzy DUDA¹, Marek KARKULA^{2*}, Radosław PUKA³, Iwona SKALNA⁴, Szymon FIEREK⁵, Adam REDMER⁶, Piotr KISIELEWSKI⁷

MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION MODEL FOR A MULTI-DEPOT MIXED FLEET ELECTRIC VEHICLE SCHEDULING PROBLEM WITH REAL-WORLD CONSTRAINTS

Summary. This paper presents the problem of public transport planning in terms of the optimal use of the available fleet of vehicles and reductions in operational costs and environmental impact. The research takes into account the large fleet of vehicles of various types that are typically found in large cities, including the increasingly widely used electric buses, many depots, and numerous limitations of urban public transport. The mathematical multi-criteria mathematical model formulated in this work considers many important criteria, including technical, economic, and environmental criteria. The preliminary results of the Mixed Integer Linear Programming solver for the proposed model on both theoretical data and real data from urban public transport show the possibility of the practical application of this solver to the transport problems of medium-sized cities with up to two depots, a heterogeneous fleet of vehicles, and up to about 1500 daily timetable trips. Further research directions have been formulated with regard to larger transport systems and new dedicated heuristic algorithms.

OPTIMIZATION OF URBAN TRANSPORT VEHICLE TASKS FOR LARGE, MIXED FLEET OF VEHICLES AND REAL-WORLD CONSTRAINTS

Piotr KISIELEWSKI¹, Jerzy DUDA², Marek KARKULA³, Iwona SKALNA⁴, Adam REDMER⁵, Szymon FIEREK⁶

¹ Cracow University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Kraków, Poland

^{2,3,4} AGH University of Krakow, Faculty of Management, Kraków, Poland

^{5,6} Poznań University of Technology, Faculty of Civil and Transport Engineering, Poznań, Poland

Abstract:

Planning the operation of urban public transport vehicles is the first stage of operational planning and consists of combining timetable trips, which are input data, into blocks that continue the daily tasks of vehicles. For a large mixed fleet of vehicles of various types, especially those with battery power that requires recharging, operating from many depots, with numerous requirements and rolling stock constraints, the problem is a major engineering challenge, even for an experienced team of planners. IT solutions based on realistic, mathematical decision-making models and fast optimization algorithms can be of a great assistance. For the problem formulated this way, a mathematical decision model with a multi-criteria objective function was built, taking into account technical, economic, and ecological criteria and binary decision variables. The model takes into account the real requirements and constraints, a mixed fleet of different types of vehicles, including electric buses, multiple depots, technical trips (deadheads), and battery charging. The considered problem is an NP-hard combinatorial optimization one. The use of classical, exact algorithms to solve this problem is not possible for timetables with many thousands of line trips and fleets of hundreds or thousands of vehicles. This research proposes an original, dedicated heuristic algorithm, enabling to obtain an acceptable, but still suboptimal solution, in a very short time. The tests of the proposed algorithm were carried out on real-life databases of public transport systems of the two selected medium and large Polish cities. In particular, multiple depots, a mixed fleet of different types of vehicles, and real-world constraints were taken into account. The results of the computer experiments carried out using the developed heuristic were compared with the results obtained manually by a team of experienced and expert planners. For the developed multi-criteria decision-making model results comparable to and better than those prepared manually by experts were obtained in a very short time using the pro-



Założenia

Podjęcie wielokryterialne

- Kryterium ekonomiczne – KE:
 - minimalizacja kosztów przejazdów – KE_1
 - minimalizacja kosztów ładowania – KE_2
 - minimalizacja kosztów użycia pojazdów – KE_3
 - minimalizacja liczby brygad – KE_4
 - minimalizacja liczby służb – KE_5
- Kryterium środowiskowe KS: minimalizacja Emisji CO_2 – KS_1
- Kryterium techniczne – KT:
 - minimalizacja Liczby przejechanych kilometrów (technicznych) – KT_1
 - minimalizacja Czasu postojów – KT_2
- Kryterium dodatkowe KD: minimalizacja kar preferencji – KD_1



Funkcja celu optymalizacji brygad – postać ogólna

$$\begin{aligned} \text{Min : } & \alpha_1 \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} d_{ij} c_{\Pi(k)} X_{ijk} + \alpha_2 \sum_{(i,j) \in A} g(z_j) W_{ij} + \alpha_3 \sum_{k \in K} u_{\Pi(k)} Z_k + \alpha_4 \sum_{k \in K} Z_k + \beta_1 \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} d_{ij} f_{\Pi(k)} X_{ijk} \\ & + \gamma_1 \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} d_{ij} X_{ijk} + \gamma_2 \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} (z_j - z_i - s_i) X_{ijk} + \theta_1 \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} o_{l(i)l(j)} X_{ijk} \end{aligned}$$

d_{ij} – długość przejazdu technicznego na łuku (i, j) [km]

c_{π} – koszt przejazdu 1 km pojazdem typu π [zł]

u_{π} – koszt użycia pojazdu typu π [zł]

f_{π} – emisja (śląd węglowy) dla pojazdu typu π na 1 km [kg CO₂]

z_i – rozkładowy czas wyjazdu na kurs i

z_j – rozkładowy czas zakończenia kursu j

s_i – czas trwania kursu i [min]

$o_{l_1 l_2}$ – preferencja dotycząca zmiany linii l_1 na l_2

$g(z_i)$ – średni jednostkowy koszt ładowania (A) zgodnie z taryfą dla czasu zakończenia kursu z_j [zł]

X_{ijk} – zmienna decyzyjna, binarna = 1, jeżeli brygada k wykonuje przejazd techniczny po łuku $(i, j) \in A$ lub realizuje kurs j po kursie i

Z_k – zmienna pomocnicza, binarna = 1, jeżeli brygada k jest wykorzystana w planie

W_{ij} – zmienna pomocnicza ciągła; ilość energii, jaka zostanie doładowana po zakończeniu kursu i przed rozpoczęciem kursu j

Funkcja kosztu dla minimalizacji brygad – postać szczegółowa

Proces generacji optymalnego zestawu brygad dokonuje wartościowania analizowanych rozwiązań wg minimum funkcji kosztu zdefiniowanej wzorem:

$$F_B(\mathbf{X}) = P_b \frac{B}{B_{max}} + P_p \frac{\sum_{b=1}^B \sum_{i=2}^{r_b} f(w) w_{(i-1),i}}{S_k} + P_l \frac{10(R-1) - \sum_{b=1}^B L_b}{10(R-1)} + P_d \frac{\sum_{b=1}^B \sum_{i=1}^{d_b} t_i}{S_k} +$$

$$P_{dd} \frac{\sum_{b=1}^B \sum_{i=1}^{d_b} d_i}{D_k} + P_n \frac{R - \sum_{b=1}^B r_b}{R} + P_k \frac{B_3}{B} + P_e \frac{\sum_{b=1}^B \sum_{i=2}^{r_b} L_e}{S_k} + P_t \frac{10R - \sum_{b=1}^B L_r}{10R}$$

P_b – współczynnik wagi składnika funkcji kosztu odpowiadającego za stosunek liczby wygenerowanych brygad do teoretycznej maksymalnej liczby brygad

P_p – współczynnik wagi składnika funkcji kosztu odpowiadającego za stosunek sumy ważonych czasów przerw między-kursowych (z wagą czasu przerwy $f(w)$) do sumy czasów trwania brygad

P_l – współczynnik wagi składnika funkcji kosztu odpowiadającego za liczbę zmian linii w brygadach, które mają niską preferencję

P_d – współczynnik wagi składnika funkcji kosztu związanego z czasem dodatkowych przejazdów (technicznych)

P_{dd} – współczynnik wagi składnika funkcji kosztu związanego z dystansem dodatkowych przejazdów (technicznych)

P_n – współczynnik wagi składnika funkcji kosztu odpowiadającego za liczbę kursów nieprzypisanych do brygad

P_k – współczynnik wagi składnika funkcji kosztu odpowiadającego za liczbę brygad krótkich (zdegenerowanych)

P_e – współczynnik wagi składnika funkcji kosztu odpowiadającego za liczbę pojedynczych kursów na brygadach

P_t – współczynnik wagi składnika funkcji kosztu odpowiadającego za przypisanie taboru złego typu do kursu

Funkcja kosztu optymalizacji służb

Optymalizacja służb poszukuje minimum funkcji zdefiniowanej wzorem:

$$\text{Min } F_s = p_s \frac{s}{s_{max}} + p_p \frac{\sum_{s=1}^S \sum_{i=2}^{r_s} f(w) w_{ij}}{s_k} + p_n \frac{R - \sum_{s=1}^S r_s}{R} + p_z \frac{s_3}{s} + p_t \frac{\sum_{s=1}^S c_T}{s} + p_b \frac{\sum_{s=1}^S A_s}{s A_{max}}$$

Funkcja kosztu F_s ma charakter bezwymiarowy i służy do oceny rozwiązania w postaci listy służb.

p_s – współczynnik wagi składnika funkcji kosztu odpowiadającego za liczbę służb

p_p – współczynnik wagi składnika funkcji kosztu odpowiadającego za czasy przerw między-kursowych z wagą czasu przerwy $f(w)$

p_n – współczynnik wagi składnika funkcji kosztu odpowiadającego za liczbę kursów nieprzypisanych do służb

p_z – współczynnik wagi składnika funkcji kosztu związanego z liczbą służb „zdegenerowanych”

p_t – współczynnik wagi składnika funkcji kosztu związanego z odchyleniem czasu służb od wartości nominalnej

p_b – współczynnik wagi składnika funkcji kosztu odpowiadającego za liczbę zmian brygad na służbach



Ograniczenia dla brygad

Najbardziej istotne ograniczenia:

- każdy kurs musi być przypisany do dokładnie jednej brygady
- jedna brygada musi składać się z minimum K kursów lub czas kursów (nie licząc przerw pomiędzy kursami) musi być większy od $MinTime$
- rozpoczęcie kolejnego kursu musi być opóźnione o A minut od zakończenia poprzedniego kursu,
- raz na H godzin musi wystąpić minimum jedna przerwa FT (nie wcześniej niż po czasie t_1 , ale nie później niż po czasie t_2)
- liczba przydzielonych pojazdów danej klasy $\leq X$ (liczby dostępnych pojazdów danego typu)
- pojazdy wracają do zajezdni, z której wyjechały,
- dolny poziom naładowania baterii, przy którym pojazd kończy dany kurs
- górny poziom naładowania baterii, od którego można doładowywać baterię wynosi $Max L$ (np. ładowanie dozwolone przy max. 50% stanie naładowania)
- minimalny czas jednorazowego ładowania baterii pojazdu elektrycznego danego typu (pojemność baterii) wynosi $MinT$
- w danym czasie na stanowisku ładowania może być ładowany tylko jeden pojazd
- Linie i kursy liniowe muszą być rozdzielone na operatorów/zajezdnie



Ograniczenia dla służb

Najbardziej istotne ograniczenia:

- każdy kurs musi być przypisany do dokładnie jednej służby
- jedna służba musi składać się z minimum K kursów lub czas służby musi być większy od $SMinTime$
- Odstęp czasu pomiędzy kursami na służbie nie może być mniejszy od tp_{min}
- Odstęp czasu pomiędzy kursami na służbie przy zmianie brygady nie może być mniejszy od tpb_{min}
- Służba musi posiadać ustawowe przerwy w pracy
- Czas pracy na służbie nie może być większy od wartości granicznej w przyjętej w przedsiębiorstwie zgodnie z prawem pracy
- W czasie pracy służby uwzględnione są czasy OC rozpoczęcia i zakończenia służby zgodnie z regulaminem przedsiębiorstwa
- Liczba zmian brygady na służbie jest ograniczona do n zmian
- Przerwa w czasie przerywanym (nie zaliczana do czasu pracy) musi spełniać wymogi regulaminu przedsiębiorstwa, nie krótsza od $tpmin$ i nie dłuższa niż $tpmax$
- Zmiana kierowców na brygadzie może odbywać się tylko na wyznaczonych przystankach
- Kierowca nie zmienia brygad przydzielonych do różnych operatorów



Ograniczenia

$$\sum_{k \in K} \sum_{j: (i,j) \in A} X_{ijk} = 1, \quad \forall i \in T,$$

$$\sum_{j: (i,j) \in A} X_{ijk} - \sum_{j: (j,i) \in A} X_{jik} = 0, \quad \forall i \in T, \forall k \in K,$$

$$\sum_{\delta \in D \setminus \{\Delta(k)\}} \sum_{i \in V} X_{a^{\delta} ik} = 0, \quad \forall k \in K,$$

$$\sum_{\delta \in D \setminus \{\Delta(k)\}} \sum_{i \in V} X_{ib^{\delta} k} = 0, \quad \forall k \in K,$$

$$M Z_k - \sum_{(i,j) \in A} X_{ijk} \geq 0, \quad \forall k \in K,$$

$$W_{ij} - (z_j - z_i - s_i - t_{ij}) r^{\Pi(k)} \sum_{k \in K} X_{ijk} \leq 0, \quad \forall (i,j) \in A,$$

$$Y_i - \sum_{k \in K} X_{ijk} (e_i^{\Pi(k)} + e_{ij}^{\Pi(k)}) + W_{ij} + M \left(1 - \sum_{k \in K} X_{ijk} \right) \geq Y_j, \quad \forall (i,j) \in A,$$

$$E_{ij} - \sum_{k \in K} X_{ijk} \leq 0, \quad \forall (i,j) \in A,$$

$$Y_i - \sum_{k \in K} X_{ijk} e_i^{\Pi(k)} + W_{ij} - u^{\max} \leq 0, \quad \forall (i,j) \in A,$$

$$Y_i \geq u_i^{\min}, \quad \forall i \in V,$$

$$Y_i - \sum_{k \in K} X_{ijk} e_i^{\Pi(k)} - u^{\text{charge}} - M(1 - E_{ij}) \leq 0, \quad \forall (i,j) \in A,$$

$$\sum_{j: (i,j) \in A, i \in T} s_i X_{ijk} + \sum_{(i,j) \in A} X_{ijk} t_{ij} \geq h, \quad \forall k \in K,$$

$$\sum_{k \in K, \Delta(k)=\delta, \Pi(k)=\pi} Z_k \leq c_{\pi}^{\delta}, \quad \forall \delta \in D, \forall \pi \in P,$$

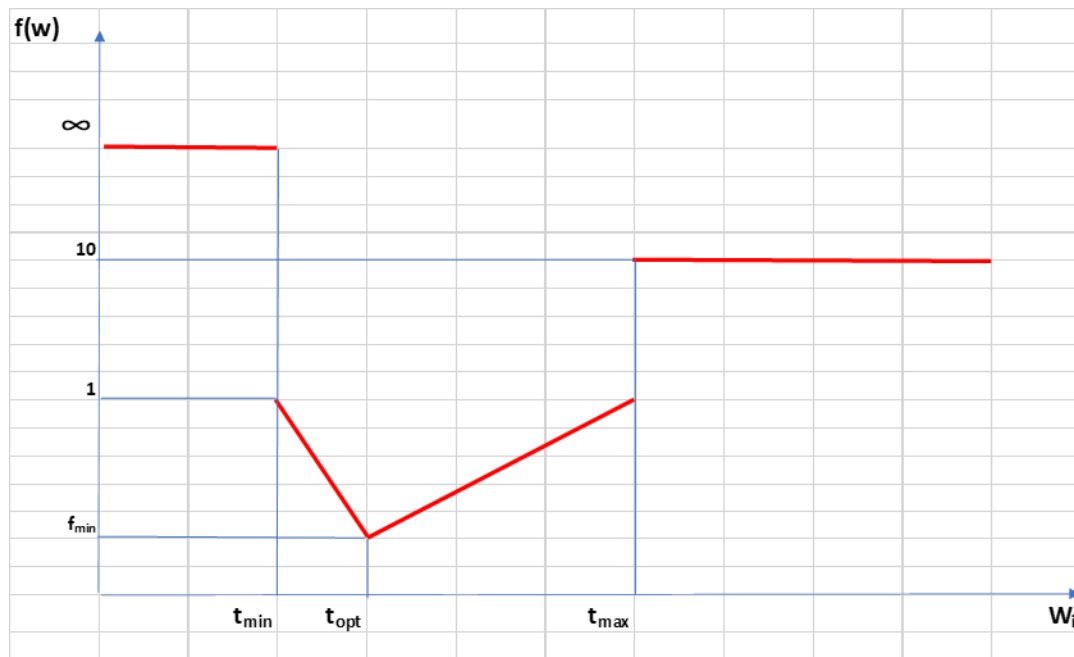
$$W_{ij} \geq 0, \quad \forall (i,j) \in A,$$

$$X_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad \forall (i,j) \in A, k \in K,$$

$$E_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall (i,j) \in A,$$

$$Z_k \in \{0, 1\}, \quad \forall k \in K$$

$f(w)$ - funkcja wagi długości przerwy między kursami



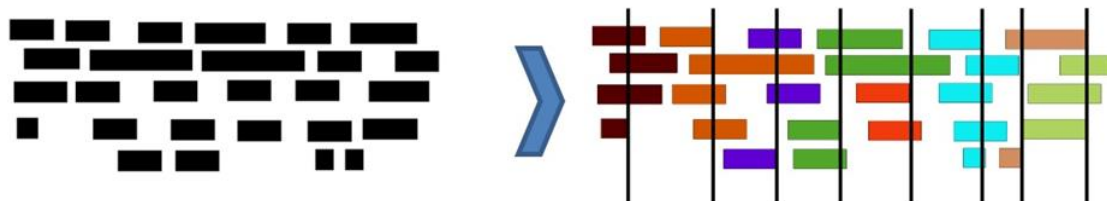


Dane wejściowe

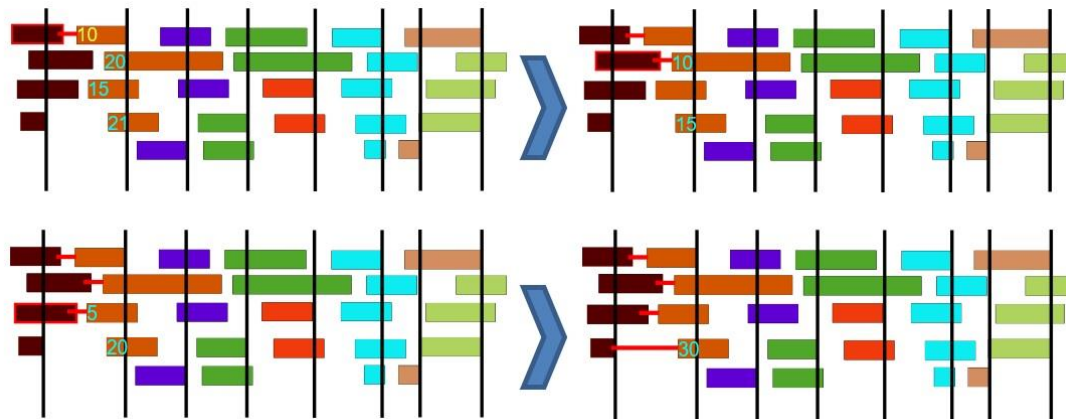
- rozkład kursów, zbiór linii rozkładowych
- dane sieci: zajezdnie, **miejsca ładowania**, punkty początkowe i końcowe każdego kursu, przystanki/pozycje GPS słupków przystankowych na kursach
- zbiór pojazdów, które mogą zrealizować dany kurs oraz ich parametry:
 - dla EV: pojemność baterii [kWh], szybkość ładowania [kWh/min], współczynnik zużycia energii [kWh/km]
 - dla pozostałych: zużycie paliwa [l/km]
 - dla wszystkich: rodzaj pojazdu: przegubowy, standardowy, krótki, niskopodłogowy, wysokopodłogowy itp.
- **macierz preferencji łączenia linii w ramach jednej brygady – brygady wieloliniowe**
- klasy pojazdów, liczba pojazdów danego typu
- **Długości i czasy przejazdów technicznych (pomiędzy pętlami, tras pętla-zajezdnia) w zależności od godziny startu i klasy pojazdu**
- **macierz czasu przejazdu i odległości ładowarek od przystanków/pętli**
- **macierz przypisania pojazdu/typu pojazdu do zajezdni**
- czas napełnienia źródła zasilania pojazdu o jednostkę (np. o 1%) dla danego źródła ładowania
- **Lista przystanków preferowana do zmian kierowców na brygadach**
- **Preferowane czasy przerw między-kursowych**

Szybka heurystyka – algorytm warstwowy + algorytm poprawiający

Schemat podziału zestawu kursów na warstwy



Schemat poglądowy algorytmu warstwowego



W ramach sprawdzania kandydatów na następniki kursów bierze się pod uwagę:

- zgodność taboru,
- chronologię czasową kursów,
- długość przerwy międzykursowej,
- preferencje/możliwości zmiany linii,
- wieloliniowość
- lokalizacje krańcowe kursów,
- dojazd pomiędzy krańcami kursów
- konieczność doładowania baterii

Wyniki optymalizacji brygad i służb – miasto A



Numer testu	Oryginalne	Sc_7	Sc_10	Sc_n1	Sc_n2
Scenariusz	Plan wyjściowy	Brygady MPK, Uwzgl. Zajeżdźnia, koszt pracownika, koszt przekr. 10h	Brygady DPK, Uwzgl. zajeżdźnia + koszt pracownika	Brygady MPK, koszt przekr. 10h, zajeżdźnia, koszt zmiany brygady, koszt przekr. 10h	Brygady DPK, koszt przekr. 10h, zajeżdźnia, koszt pracown.
Wyjściowa l. służb	992	992	992	992	992
Liczba służb po optymalizacji	-	936	912	949	938
Czas przerw [h:mm]	2465:02	2392:26	1862:26	2417:29	1959:11
Czas pracy [h:mm]	8081:17	7767:05	7561:55	7905:21	7639:40
Czas przerywany [h:mm]	-	189:09	443:27	197:28	334:48
Śr. czas przerywany [h:mm]	-	3:26	3:02	3:05	3:09
L. spinaczy	-	55	149	64	106
Zmian brygady	-	7	149	12	188
śr. czas pracy [h:mm]	7:54	8:17	8:17	8:19	8:08
Efektywny czas %	69,497%	69,198%	75,371%	69,420%	74,355%
L. służb pow. 10h	69	44	151	28	181
% przerw	30,503%	30,802%	24,629%	30,580%	25,645%
Wyjściowa l. brygad	502	502	502	502	502
L. brygd po optymalizacji	-	502	496	502	486
l. zmian linii	607	607	1855	607	1750
Dystans całkowity [km]	130026,1	130026,1	137538,6	130026,1	137249,7
Dystans kursów liniowych [km]	120404	120404	120404	120404	120404
Dystans kursów technicznych [km]	9622,1	9622,1	17134,6	9622,1	16845,7

S
l
u
ż
b
y

B
r
y
g
a
d
y

Wyniki optymalizacji brygad i służb – miasto A



Podsumowanie KPI						
Zmiana l. służb	-	56	80	43	54	s
Zmiana służb [%]	-	5,65%	8,06%	4,33%	5,44%	l
Czas przerw [%]	-	-3,03%	-32,36%	-1,97%	-25,82%	u
Czas pracy [%]	-	-4,05%	-6,87%	-2,23%	-5,78%	ż
Efektywny czas [%]	-	-0,30%	5,87%	-0,08%	4,86%	b
Zmiana l. brygad	-	0	6	0	16	y
Zmiana brygad [%]	-	0,00%	1,20%	0,00%	3,19%	b
Dystans całkowity [%]	-	0,00%	5,46%	0,00%	5,26%	r
Dystans kursów technicznych [%]	-	0,00%	43,84%	0,00%	42,88%	y

Wyniki optymalizacji służb i brygad – miasto B



Nazwa	Sc 1	Sc 2	Sc 3	Sc 4	Sc 5	Sc 6 (DPK)	Sc 7	Sc 7.2	Sc 8	Sc 8.2	Sc 9(DPK)	Sc 9.1(DPK)	Sc 9.2(DPK)	Sc 1.1.f	Referencja
Liczba służb	426	430	431	438	439	464	432	432	436	434	480	442	447	425	454
Czas przerw	879:14	877:49	879:51	880:56	878:52	799:51	877:34	877:34:00	881:18	877:15:00	751:19:00	798:44:00	798:08:25	879:23:00	
Czas pracy	3928:15	3928:50	3928:52	3929:57	3927:53	3950:24	3993:39	3991:25:00	3995:09	3991:06:00	3901:52:00	3957:12:00	4019:34:00	3928:24:00	
Zmian brygady	7	6	9	10	9	298	8	6	13	5	162	209	216	9	
L. brygad	282	282	282	282	282	274	282	282	282	282	274	274	274	282	282
Śr. czas pracy	9:13:16	9:07:56	9:06:57	8:58:21	8:56:50	8:30:50	9:14:40	09:14:22	9:09:47	09:11:48	08:28:58	08:57:11	08:59:32	09:14:36	
czas obliczeń					08:24:07			03:36:53		04:08:35					
Efekt w %	77,618%	77,646%	77,606%	77,584%	77,625%	79,752%	78,026%	78,014%	77,941%	78,020%	80,745%	79,816%	80,144%	77,615%	
% przerw	22,382%	22,354%	22,394%	22,416%	22,375%	20,248%	21,974%	21,986%	22,059%	21,980%	19,255%	20,184%	19,856%	22,385%	
SŁUŻBY															
Wynik lepszy o	28	24	23	16	15	-10	22	22	18	20	-6	12	7	29	
%	6,17%	5,29%	5,07%	3,52%	3,30%	-2,20%	4,85%	4,85%	3,96%	4,41%	-1,32%	2,64%	1,54%	6,39%	
BRYGADY															
Wynik lepszy o	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	8	8	8	0	
%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	2,84%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	2,84%	2,84%	2,84%	0,00%	

Średni czas obliczeń optymalizacji brygad <8 min, służb <60 min

Wyniki optymalizacji brygad i służb – miasto C



Numer testu	Oryginalne	Sc_1	Sc_2	Sc_3	Sc_4	Sc_5	Sc_6	Sc_7
Scenariusz	brygady ZTM (ORG)	brygady ZTM (ORG), Max 10h trwania służby	brygady ZTM (ORG), 9:30 czas służby, 10h koszt	brygady ZTM (ORG), 9:30 czas służby	brygady DPK (Sc4: typ taboru, przerwy szczytowe, Max 10h trwania służby, Max 10h trwania służby)	brygady DPK (Sc5: przerwy szczytowe, Max 10h trwania służby)	brygady DPK (Sc6: typ taboru, Max 10h trwania służby)	brygady DPK (Sc7) Max 10h trwania służby
Wyjściowa l. pracowników	304	304	304	304	304	304	304	304
Ilość pracowników po optymalizacji	-	294	294	295	298	297	277	272
Liczba spinaczy	64	70	81	91	106	96	71	69
Sumaryczny czas przerw (bez przerw szczytowych)	712:44:00	717:27:00	697:17:00	699:48:00	737:37:22	713:57:00	614:59:00	582:06:00
Procent czasu przerw	27,86%	28,00%	27,17%	27,22%	27,64%	27,17%	24,66%	23,79%
Sumaryczny czas przerw	990:06:00	1005:26:00	1008:38:00	1031:42:00	1104:04:56	1043:07:00	848:27:00	804:07:00
Czas przerywany	277:22:00	287:59:00	311:21:00	331:54:00	366:27:34	329:10:00	233:28:00	222:01:00
Średni czas przerw w PCP	04:20:01	04:06:50	03:50:37	03:38:50	03:27:25	03:25:43	03:17:17	03:13:03
Liczba zmian brygad	0	7	14	25	25	20	58	32
Czas pracy	2558:00:00	2562:43:00	2566:21:00	2570:34:00	2668:20:00	2627:50:00	2494:04:00	2446:32:00
Średni czas pracy	08:24:52	08:43:00	08:43:44	08:42:49	08:57:14	08:50:52	09:00:13	08:59:40
Średni czas trwania spinaczy	12:22:18	12:46:24	12:36:29	12:22:19	12:38:11	12:30:12	12:33:03	12:31:48
Wyjściowa l. brygad	199	199	199	199	199	199	199	199
Ilość brygad po optymalizacji	-	199	199	199	210	202	180	172
WozokM (Sumaryczny dystans brygad)	37999,896	37999,896	37999,896	37999,896	39595,835	39328,166	38524,901	38323,65
Wozogodz (Sumaryczny czas trwania brygad)	2859:42:00	2859:42:00	2859:42:00	2859:42:00	2932:37:00	2867:59:00	2677:05:00	2580:53:00
Sumaryczny czas trwania przerw międzykursowych w brygadach	994:01:00	994:01:00	994:01:00	994:01:00	1012:37:00	960:27:00	805:41:00	720:34:00
Zmian linii	293	293	293	293	369	477	253	348
Sumaryczny czas trwania kursów technicznych	145:53:00	145:53:00	145:53:00	145:53:00	206:47:00	187:44:00	156:56:00	140:31:00
Sumaryczny dystans kursów technicznych	2283,89	2283,89	2283,89	2283,89	3879,829	3612,16	2808,895	2607,644
Dystans kursów liniowych.	35716,006	35716,006	35716,006	35716,006	35716,006	35716,006	35716,006	35716,006

S
t
u
ż
b
y

B
r
y
g
a
d
y

Wyniki optymalizacji brygad i służb – miasto C



Podsumowanie KPI								
	Sc_1	Sc_2	Sc_3	Sc_4	Sc_5	Sc_6	Sc_7	
Zmiana l. służb	10	10	9	6	7	27	32	S ł u ż b y
Zmiana służb [%]	3,29%	3,29%	2,96%	1,97%	2,30%	8,88%	10,53%	
Zmiana czas przerw [%]	1,53%	1,84%	4,03%	10,32%	5,08%	-16,70%	-23,13%	
Zmiana czas pracy [%]	0,18%	0,33%	0,49%	4,13%	2,66%	-2,56%	-4,56%	
Zmiana sredni czas pracy [%]	3,47%	3,60%	3,43%	6,02%	4,90%	6,54%	6,45%	
Zmiana czas przerywany[%]	3,69%	10,91%	16,43%	24,31%	15,74%	-18,80%	-24,93%	
Zmiana l. brygad	0	0	0	-11	-3	19	27	B r y g a d y
Zmiana brygad [%]	0,00%	0,00%	0,00%	-5,53%	-1,51%	9,55%	13,57%	
Zmiana WozGodz [%]	0,00%	0,00%	0,00%	2,49%	0,29%	-6,82%	-10,80%	
Zmiana Dystans całkowity [%]	0,00%	0,00%	0,00%	4,03%	3,38%	1,36%	0,84%	
Zmiana Dystans kursów technicznych [%]	0,00%	0,00%	0,00%	41,13%	36,77%	18,69%	12,42%	
Udział kursów techn. w dystansie brygad [%]	6,01%	6,01%	6,01%	9,80%	9,18%	7,29%	6,80%	
Udział przerw mk. w czasie trwania brygad [%]	34,76%	34,76%	34,76%	34,53%	33,49%	30,10%	27,92%	

Wyniki optymalizacji, zbiorczo



	Kierowcy	Pojazdy
Miasto 1	-56 (6%)	0 (0%)
	- 80 (8%)	- 6 (1%)
Miasto 2	- 11 (2,4%)	- 10 (3,5%)
	- 29 (6,4%)	0 (0%)
Miasto 3	- 10 (3%)	0 (0%)
	- 32 (10%)	- 27 (14%)



Wnioski

1. Zastosowana heurystyka pozwala na znalezienie akceptowalnych rozwiązań w krótkim czasie nawet dla dużych instancji danych
2. Przygotowanie poprawnych zbiorów danych ma podstawowe znaczenie dla wyznaczenia poprawnych rozwiązań
3. Suboptymalny zbiór rozwiązań zależy silnie od przyjętych wag kryteriów składowych
4. Otrzymane rozwiązania suboptymalne w testach pozwalają na praktyczną implementację dla rzeczywistych systemów transportowych miast



Dziękuję za uwagę

Piotr Kisielewski

piotr.kisielewski@pk.edu.pl



Politechnika Krakowska
im. Tadeusza Kościuszki



**Katedra Pojazdów Szynowych
i Transportu**



**Fundusze
Europejskie**
Inteligentny Rozwój



**Rzeczpospolita
Polska**



Narodowe Centrum
Badań i Rozwoju

Unia Europejska
Europejski Fundusz
Rozwoju Regionalnego

