

JAN ALEKSANDROWICZ

dr inż., Politechnika Krakowska,
Katedra Systemów Transportowych,
31-155 Kraków, ul. Warszawska 24,
e-mail: jaleksandrowicz@pk.edu.pl

Wielokryterialna optymalizacja przydziału taboru do linii miejskiego transportu zbiorowego¹

Streszczenie: Artykuł poświęcony jest tematyce wielokryterialnej optymalizacji przydziału taboru do linii miejskiego transportu zbiorowego. W artykule przedstawiono propozycję modelu czterokryterialnego mającego zastosowanie w systemach miejskiego transportu zbiorowego obsługiwanych pojazdami elektrycznymi i spalinowymi. W opracowaniu zdefiniowano aktualne wymagania względem transportu zbiorowego oraz uwarunkowania przydziału taboru do linii. Przedstawiono ograniczenia procesu decyzyjnego przydziału taboru oraz wskazano cztery kryteria optymalizacji (komfort podróży, energochłonność pojazdów, emisja szkodliwych substancji oraz oczekiwania organizatora miejskiego transportu zbiorowego). W pracy przedstawiono i objaśniono opracowany model optymalizacji przydziału taboru wraz z ograniczeniami. W artykule przedstawiono wyniki testów modelu wraz z praktycznym zastosowaniem z wykorzystaniem autorskiego programu w środowisku MATLAB. Artykuł zakończono wnioskami z przeprowadzonych prac i planem dalszych prac nad tematem.

Słowa kluczowe: przydział taboru, model optymalizacyjny, miejski transport zbiorowy.

Wprowadzenie

Miejskie systemy transportu zbiorowego borykają się z następującymi problemami:

- nierównomiernością wykorzystania miejsc w kursujących pojazdach ze względu na zmieniające się potoki pasażerskie i różnorodność typów taboru,
- wzrostem kosztów wykonywania kursów ze względu na spadek liczby pasażerów,
- nadmierną emisją spalin spowodowaną wykorzystywaniem taboru niespełniającego najwyższych norm emisji szkodliwych substancji,
- pogarszającym się stanem infrastruktury transportowej z powodu zbyt wolnego procesu modernizacji infrastruktury.

Problemy te powodowane są przez sposób zarządzania systemem miejskiego transportu zbiorowego, a w szczególności uwzględniania w procesie decyzyjnym aktualnych danych (np. na temat liczby pasażerów korzystających z poszczególnych linii). Rozwiązaniem wymienionych problemów jest wykorzystanie w miejskim systemie transportu zbiorowego narzędzi umożliwiających: zaobserwowanie aktualnych potrzeb pasażerów, dopasowanie elementów systemu do nich przy: utrzymaniu lub zmniejszeniu kosztów funkcjonowania systemu, ograniczeniu oddziaływania na środowisko oraz dostosowaniu się do stanu infrastruktury.

Dopasowania elementów systemu dokonuje się z wykorzystaniem różnego rodzaju modeli optymalizacyjnych.

Modele tego typu umożliwiają m.in. określenie: przydziału taboru do obsługi linii, przebiegu linii oraz częstotliwości kursowania. Obliczenia wykonuje się na dwa sposoby: jednokryterialnie, uwzględniając jedynie potrzeby pasażerów lub koszty realizacji przewozów, oraz wielokryterialnie. Z powodu zmieniających się wymagań względem miejskiego transportu zbiorowego, charakteryzujących się m.in.:

- wzrostem wymagań pasażerów dotyczących komfortu podróży,
- zmniejszeniem energochłonności systemu,
- ograniczeniem negatywnego oddziaływania transportu na otoczenie,

coraz istotniejszą rolę odgrywa wielokryterialne zarządzanie transportem. Wymagania te można uwzględnić w modelu wielokryterialnym poprzez kryteria:

- energochłonności (zużycia paliwa lub energii elektrycznej),
- emisji spalin (substancji szkodliwych dla zdrowia i środowiska naturalnego),
- oczekiwań organizatora miejskiego transportu zbiorowego.

Ograniczone środki finansowe przeznaczane na transport zbiorowy w miastach zmuszają organizatorów i operatorów transportu zbiorowego do stosowania rozwiązań mających spełnić wymagania przy zachowaniu tych samych kosztów lub ich obniżeniu. Osiągnięte jest to poprzez zmiany w:

- rozkładach jazdy,
- siatce połączeń,
- przydziale taboru.

Dwa pierwsze rozwiązania wiążą się z ryzykiem sprzeciwu społecznego, ponieważ przy stałych środkach finansowych zwiększenie liczby kursów na jednej linii lub zmiana jej trasy powoduje pogorszenie obsługi transportowej na innej linii. Trzecie rozwiązanie, ze względu na różnorodność typów taboru, umożliwia osiągnięcie celu poprzez zmiany w przydziale taboru do linii. Dodatkową zaletą tego rozwiązania jest możliwość dopasowania taboru w sposób wielokryterialny, uwzględniający nie tylko potrzeby pasażerów, ale także kryteria środowiskowe, jak redukcję emisji spalin czy zmniejszenie energochłonności taboru. W ramach artykułu przedstawiono propozycję optymalizacji przydziału taboru do linii w sposób wielokryterialny, uwzględniający zaobserwowane wymagania względem miejskiego transportu zbiorowego.

¹ ©Transport Miejski i Regionalny, 2022.

Uwarunkowania przydziału taboru

Zarządzanie przydziałem taboru do linii miejskiego transportu zbiorowego odgrywa bardzo ważną rolę w efektywności funkcjonowania miejskiego systemu transportowego. Determinantami problemu przydziału taboru są m.in.: jakość obsługi pasażerskiej, koszty przewozu [5, 6, 7, 12, 13, 14, 15], obciążenie środowiskowe [8, 10, 11] czy oczekiwania organizatora miejskiego transportu zbiorowego. Przewoźnicy, przygotowując plany przydziału, muszą zwracać uwagę na wiele różnych ograniczeń problemu decyzyjnego, takich jak:

- liczbę i typy dostępnego taboru,
- popyt na usługi transportowe dla każdego kursu na każdej linii,
- parametry techniczne dostępnego taboru (liczba miejsc w pojeździe, charakterystyki: zużycia paliwa, zużycia energii elektrycznej oraz emisji szkodliwych substancji),
- parametry infrastruktury punktowej i liniowej sieci transportowej (w tym dopuszczenie wjazdu na poszczególne odcinki drogowe i torowe dla poszczególnych typów taboru),
- kształt sieci miejskiego transportu zbiorowego,
- obowiązujące rozkłady jazdy.

Wybór taboru do realizacji poszczególnych zadań realizowany jest na dwa sposoby. W pierwszym przypadku zadania są przedstawiane w formie brygad, których liczba i przypisanie do linii jest stałe. Wyboru typu taboru do obsługi poszczególnych brygad dokonuje się, uwzględniając przyjęte kryteria i ograniczenia. Ten sposób przydziału taboru do linii ma zastosowanie w systemach, w których każda brygada wykonuje kursy tylko na jednej linii miejskiego transportu zbiorowego.

Drugi sposób wymaga przeprowadzenia procedury przypisania taboru do brygad w dwóch etapach. W pierwszym etapie na podstawie określonej liczby kursów, rozkładów jazdy oraz kształtu sieci transportu zbiorowego, przydziela się do brygad kursy, które będą wykonywane na liniach transportu zbiorowego. W ten sposób można określić dokładną liczbę brygad niezbędnych do zrealizowania wszystkich zadań przewozowych. Następnie określone są wybrane charakterystyki dla każdej brygady oraz, uwzględniając przyjęte kryteria i ograniczenia, wyznaczany jest przydział typów taboru do brygad. Drugi sposób przydziału taboru do linii ma zastosowanie w przypadku systemów, w których brygady w ciągu jednego dnia mogą wykonywać kursy na różnych liniach.

Złożoność procesu decyzyjnego związanego z przydziałem taboru do linii miejskiego transportu zbiorowego jest ściśle związana ze zróżnicowaniem taboru i wielkością sieci transportowej [12, 13]. Złożoność jest istotnie większa dla drugiego sposobu wyznaczania przydziału taboru ze względu na etapowość procedury przydziału.

Różnice pomiędzy poszczególnymi typami taboru i pomiędzy brygadami miejskiego transportu zbiorowego określa się za pomocą wybranych charakterystyk. Dla typów taboru charakterystykami są między innymi:

- całkowita liczba miejsc w pojeździe,
- zużycie energii,
- wielkość emisji szkodliwych substancji na kilometr przejechanej trasy.

Brygady charakteryzuje się za pomocą:

- łącznej długości trasy,
- liczby pasażerów podróżujących brygadą podczas pomiarów.

Przydział taboru do linii wyznaczany jest z uwzględnieniem kryteriów określonych na podstawie wybranych charakterystyk taboru i brygad. Wybór kryteriów powinien odpowiadać celowi, jaki ma zostać osiągnięty poprzez proces wyznaczania przydziału taboru. Przykładem celu jest zmniejszenie łącznego zużycia paliwa przy zachowaniu tego samego lub poprawie poziomu komfortu podróży.

Klasyczne zagadnienie przydziału

Klasyczne zagadnienie przydziału [9, 16] rozumiane jest jako funkcja:

$$f(xp, zp) = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} xp_{i,j} * zp_{i,j} \rightarrow \min_{xp} / \max_{xp}$$

gdzie:

- $xp_{i,j}$ – zmienna decyzyjna określająca połączenie pomiędzy i -tym wykonawcą a j -tym zadaniem, zmienna zdefiniowana jako zmienna binarna, gdzie $xp_{i,j} = 1$ oznacza przydział i -tego wykonawcy (pojazdu lub typu pojazdu) do j -tego zadania (linii lub brygady transportu zbiorowego), a $xp_{i,j} = 0$ oznacza brak przydziału,
- $zp_{i,j}$ – znormalizowana wartość maksymalizowanych zysków lub minimalizowanych kosztów związanych z przydziałem i -tego wykonawcy do j -tego zadania,
- i – zmienna indeksująca definiująca numer wykonawcy zadania w zagadnieniu przydziału,
- j – zmienna indeksująca definiująca numer zadania w zagadnieniu przydziału.

W zagadnieniu klasycznym określone są dwa ograniczenia. Pierwsze z nich to ograniczenie wynikające z wymogu realizacji przez wykonawcę tylko jednego zadania:

$$\forall i \in I: \sum_{j \in J} xp_{i,j} = 1$$

Drugie ograniczenie związane z przydziałem zadania tylko do jednego wykonawcy:

$$\forall j \in J: \sum_{i \in I} xp_{i,j} = 1$$

W przypadku miejskiego transportu zbiorowego problem przydziału jest bardziej rozbudowany. Występują w nim ograniczenia związane z trasą, ograniczeniami infrastruktury, popytem na usługi transportowe oraz ograniczenia związane z kosztami funkcjonowania.

Model przydziału taboru do linii miejskiego transportu zbiorowego

Proces przydziału taboru do brygad w miejskim systemie transportu zbiorowego determinowany jest przez:

- popyt na usługi transportowe,
- dostępność pojazdów,
- trasę przejazdu,
- stan infrastruktury,
- lokalizację zajezdni (stacji obsługi).

Wykorzystanie danych zbieranych w sposób ciągły zmieniło podejście do procesu przydziału taboru. Dane te umożliwiają dopasowanie przydziału taboru do aktualnych lub prognozowanych potrzeb miejskiego transportu zbiorowego. Jako założenia dla opracowanych modeli optymalizacji przydziału taboru przyjęto, że:

- tabor jest tak przydzielany, aby umożliwić przewóz wszystkich pasażerów – nie można przydzielać taboru, który ma mniejszą pojemność niż aktualna lub prognozowana liczba pasażerów;
- popyt jest prognozowany na podstawie zebranych danych przez automatyczny system zliczania pasażerów;
- przydział taboru organizowany jest z uwzględnieniem dnia tygodnia oraz miesiąca (np. czwartek w grudniu);
- liczba dostępnego taboru jest większa niż liczba zleconych zadań (brygad);
- droga dojazdu na linię z każdej zajezdni jest uwzględniana w długościach tras każdej z brygad, ale nie uwzględnia się innych manewrów wykonywanych pojazdem poza regularną trasą przejazdu (np. operacje na zajezdni związane z wyjazdem pojazdu na linię).

Uniwersalnym rozwiązaniem spełniającym przedstawione założenia jest czterokryterialny model hybrydowy (dla mieszanej spalinowo-elektrycznej floty pojazdów). Model ten zapisano w następujący sposób:

$$MPTMTZ = \langle DTO, ZP, CT, OP \rangle$$

gdzie:

- DTO* – zbiór dostępnego taboru spalinowego i elektrycznego,
- ZP* – zbiór zadań przewozowych,
- CT* – zbiór charakterystyk tras,
- OP* – zbiór organizacji przydziału taboru.

W przedstawionym w pracy modelu przydziału taboru przyjęto następujące kryteria oceny uzyskiwanych rozwiązań:

- kryterium komfortu podróży i wykorzystania przepustowości pojazdów,
- kryterium energochłonności taboru,
- kryterium wielkości emisji szkodliwych substancji (tylko dla systemów, w których kursują pojazdy spalinowe),
- kryterium oczekiwań organizatora miejskiego transportu zbiorowego.

Pomiędzy kryteriami obliczono współczynniki korelacji w celu sprawdzenia ich niezależności. Analiza ta wykazała brak korelacji pomiędzy kryteriami.

Model optymalizacji przydziału taboru opracowano dla systemów, w których kursują pojazdy spalinowe i elektryczne oraz pojazdy te mogą kursować zamiennie na tych samych liniach (np. w przypadku autobusów spalinowych i elektrycznych). W funkcji kryterium użyto znormalizowane kryteria cząstkowe: f_1, f_2, f_3, f_4 zapisane w formie: f'_1, f'_2, f'_3, f'_4 . Funkcję kryterium modelu zapisano w następującej formie:

$$f(f'_1, f'_2, f'_3, f'_4) = wg_1 * f'_1 + wg_2 * f'_2 + wg_3 * f'_3 + wg_4 * f'_4 \rightarrow \min$$

$$\sum_{k=1}^4 wg_k = 1$$

gdzie:

wg_1, wg_2 , – wagi dla poszczególnych kryteriów,
 wg_3, wg_4

- f'_1 – znormalizowana funkcja kryterium cząstkowego komfortu podróży i wykorzystania miejsc w pojeździe,
- f'_2 – znormalizowana funkcja kryterium cząstkowego energochłonności taboru,
- f'_3 – znormalizowana funkcja kryterium cząstkowego emisji szkodliwych substancji,
- f'_4 – znormalizowana funkcja kryterium cząstkowego oczekiwań przydziału taboru organizatora miejskiego transportu zbiorowego.

Pierwsze kryterium cząstkowe służące do minimalizowania różnicy rzeczywistego poziomu napelnienia pojazdu, a przyjętego akceptowalnego poziomu napelnienia (dla przyjętego poziomu komfortu), wykorzystuje dane na temat:

- prognozowanej liczby pasażerów,
- przyjętego poziomu komfortu,
- liczby miejsc w pojazdach poszczególnych typów taboru.

Pierwsze kryterium cząstkowe przedstawiono w następującej formie:

$$f_1 = \sum_{a \in A} \left| pk - \frac{\widehat{pn}_a}{\sum_{b \in B} (wp_{a,b} * lms_b)} \right| \rightarrow \min_{wp}$$

gdzie:

- A* – zbiór indeksów brygad linii miejskiego transportu zbiorowego,
- B* – zbiór indeksów dostępnych typów taboru,
- pk – akceptowalne napelnienie pojazdu dla przyjętego poziomu komfortu [%],
- \widehat{pn}_a – prognozowana liczba pasażerów dla a-tej brygady [pas.],
- wp_{ab} – macierz przydziału taboru spalinowego i elektrycznego dla każdej brygady w danym dniu tygodnia i miesiącu, obejmujący numery typów taboru,
- lms_b – liczba miejsc w b-tym typie taboru.

Drugie kryterium cząstkowe opracowano do minimalizowania łącznego zużycia energii. W przypadku systemów wykorzystujących pojazdy spalinowe i elektryczne kryterium cząstkowe wykorzystuje przeliczenie zużytego paliwa na jednostkę energii elektrycznej. Kryterium wykorzystuje dane na temat:

- długości trasy przejazdu każdej brygady,
- długości dróg dojazdu z i zjazdu do zajezdni,
- średniej energochłonności pojazdu,
- wartości współczynników wpływu czynników zewnętrznych na zmianę średniej energochłonności pojazdu.

Drugie kryterium cząstkowe przedstawiono w następujący sposób:

$$f_2 = ppne * d_1 \left(\sum_{a \in A} \sum_{b \in B} (wp_{a,b} * (w_a + dd_{a,b}) * wszp_b (wzp_{a,b} + wpp_{p,b} + wwp_{a,b} - 2)) \right) + d_2 \left(\sum_{a \in A} \sum_{b \in B} (wp_{a,b} * (w_a + dd_{a,b}) * wsze_b (wze_{a,b} + wwpe_{p,b} + wwe_{a,b} - 2)) \right) \rightarrow \min_{wp}$$

gdzie:

$$d_1 = \begin{cases} 1 - \text{gdy pojazd jest spalinowy} \\ 0 - \text{gdy pojazd nie jest spalinowy} \end{cases}$$

$$d_2 = \begin{cases} 1 - \text{gdy pojazd jest elektryczny} \\ 0 - \text{gdy pojazd nie jest elektryczny} \end{cases}$$

A – zbiór indeksów brygad linii miejskiego transportu zbiorowego,

B – zbiór indeksów dostępnych typów taboru,

ppne – przelicznik wartości energetycznej paliwa z litrów na kilowatogodziny,

wp_{a,b} – macierz przydziału taboru spalinowego i elektrycznego dla każdej brygady w danym dniu tygodnia i miesiącu, obejmujący numery typów taboru,

w_a – liczba kilometrów realizowanych przez a-tą brygadę miejskiego transportu zbiorowego [km],

dd_{a,b} – liczba kilometrów realizowanych przez b-ty typ pojazdu podczas zjazdów do zajezdni z a-tej trasy [km],

wszp_b – wartość średniego zużycia paliwa na 1 wozokilometr dla b-tego typu taboru,

wzp_{a,b} – współczynnik wpływu liczby zatrzymań na 1 wozokilometr dla a-tej brygady i b-tego typu taboru,

wpp_{p,b} – współczynnik wpływu pogody na zużycie paliwa dla p-tego typu pogody i b-tego typu taboru,

wwp_{a,b} – współczynnik wpływu profilu podłużnego trasy a-tej brygady na zużycie paliwa b-tego typu taboru,

wsze_b – wektor wartości średniego zużycia energii elektrycznej na 1 wozokilometr dla b-tego typu taboru,

wze_{a,b} – współczynnik wpływu liczby zatrzymań na 1 wozokilometr dla a-tej brygady i b-tego typu taboru,

wwpe_{p,b} – współczynnik wpływu p-tego typu pogody na zużycie energii elektrycznej b-tego typu taboru,

wwe_{a,b} – współczynnik wpływu profilu podłużnego a-tej trasy na zużycie energii elektrycznej b-tego typu taboru.

Trzecie kryterium cząstkowe – wielkości emisji szkodliwych substancji – opracowano wyłącznie dla pojazdów spalinowych. W ramach kryterium minimalizowana jest łączna wielkość emisji spalin pochodząca od pojazdów miejskiego transportu zbiorowego. W kryterium wykorzystano dane na temat:

- długości trasy przejazdu każdej brygady,
- długości dróg dojazdu z i zjazdu do zajezdni,
- średniej emisji szkodliwych substancji pojazdu,
- wartości współczynników wpływu czynników zewnętrznych na zmianę średniej emisji szkodliwych substancji.

Kryterium cząstkowe zapisano w następujący sposób:

$$f_3 = \sum_{a \in A} \sum_{b \in B} (wp_{a,b} * (w_a + dd_{a,b}) * wsem_b * (wpes_{p,b} + wws_{a,b} + wzs_{a,b} - 2)) \rightarrow \min_{wp}$$

gdzie:

A – zbiór indeksów brygad linii miejskiego transportu zbiorowego,

B – zbiór indeksów dostępnych typów taboru,

wp_{a,b} – macierz przydziału taboru spalinowego i elektrycznego dla każdej brygady w danym dniu tygodnia i miesiącu, obejmujący numery typów taboru,

w_a – liczba kilometrów realizowanych przez a-tą brygadę miejskiego transportu zbiorowego [km],

dd_{a,b} – liczba kilometrów realizowanych przez b-ty typ pojazdu podczas zjazdów do zajezdni z a-tej trasy [km],

wsem_b – wartość średniej wielkości emisji wybranych szkodliwych substancji do środowiska na 1 wozokilometr dla b-tego typu taboru,

wpes_{p,b} – współczynnik wpływu p-tego typu pogody na wielkość emisji spalin b-tego typu taboru,

wws_{a,b} – współczynnik wpływu profilu podłużnego a-tej trasy na wielkość emisji spalin b-tego typu taboru,

wzs_{a,b} – współczynnik wpływu liczby zatrzymań na 1 wozokilometr a-tej trasy na wielkość emisji spalin b-tego typu taboru.

Czwarte kryterium cząstkowe opracowano dla oczekiwań przydziału taboru organizatora miejskiego transportu zbiorowego. W kryterium wykorzystano funkcję tangens liczoną z iloczynu współczynników oczekiwań przydziału taboru i połowy liczby pi. W kryterium minimalizowana jest suma wszystkich wartości. Czwarte kryterium cząstkowe zapisano w następujący sposób:

$$f_4 = \sum_{a \in A} \sum_{b \in B} (wp_{a,b} * \tan(wpo_{a,b} * \frac{\pi}{2})) \rightarrow \min_{wp}$$

gdzie:

A – zbiór indeksów brygad linii miejskiego transportu zbiorowego,

B – zbiór indeksów dostępnych typów taboru,

$wp_{a,b}$ – macierz przydziału taboru spalinowego i elektrycznego dla każdej brygady w danym dniu tygodnia i miesiącu, obejmujący numery typów taboru,

$wpo_{a,b}$ – współczynnik preferencji przydziału b-tego typu taboru do a-tej brygady miejskiego transportu zbiorowego.

W opracowanym modelu optymalizacji przydziału taboru przyjęto następujące ograniczenia:

- do każdej brygady musi być przydzielony jeden typ taboru:

$$\forall a \in A \sum_{b \in B} wp_{a,b} = 1$$

- liczba przydzielonych pojazdów b-tego typu nie może być wyższa niż liczba eksploatowanych pojazdów tego typu:

$$\sum_{a \in A} \sum_{b \in B} wp_{a,b} \leq lpt_b$$

gdzie:

lpt_b – liczba eksploatowanych pojazdów b-tego typu

- przydzielony typ pojazdu nie może mieć mniejszej liczby miejsc niż przewidywana liczba pasażerów dla a-tej brygady:

$$\widehat{pn}_a \leq \sum_{b \in B} (wp_{a,b} * lms_b)$$

- energochłonność przydzielonego taboru nie może być wyższa niż przyjęty przez przewoźnika poziom dopuszczalny:

$$\sum_{a \in A} \sum_{b \in B} (wps_{a,b} * (w_a + dd_{a,b}) * wszp_b (wzp_{a,b} + wwp_{p,b} + wwp_{a,b} - 2)) \leq pdzp$$

gdzie:

$pdzp$ – poziom dopuszczalny zużycia paliwa [litry],

$pdze$ – poziom dopuszczalny zużycia energii elektrycznej [kWh].

- łączna emisja szkodliwych substancji dla przydzielonego taboru nie może być wyższa od przyjętego dopuszczalnego poziomu:

$$\sum_{a \in A} \sum_{b \in B} (wps_{a,b} * (w_a + dd_{a,b}) * wsem_b * (wpes_{p,b} + wws_{a,b} + wzs_{a,b} - 2)) \leq pdn$$

gdzie:

pdn – dopuszczalny poziom łącznej emisji szkodliwych substancji od pojazdów miejskiego transportu zbiorowego [g].

Praktyczne zastosowanie opracowanego modelu

Opracowany model przetestowano w autorskim programie w środowisku MATLAB. Program umożliwił, z wykorzystaniem danych rzeczywistych, wyznaczenie przydziału taboru do linii autobusowych w Krakowie. Jako dane wejściowe wykorzystano wyniki pomiarów przeprowadzonych w sposób automatyczny i ciągły w 2018 roku [1, 2, 3, 4]. Wyznaczony przydział taboru (uzyskaną wartość funkcji celu) porównano z rzeczywistym przydziałem taboru, obowiązującym w czasie realizacji pomiarów. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Porównanie wartości funkcji celu dla przydziału rzeczywistego i modelu		
Znormalizowana wartość dla rzeczywistego przydziału taboru	Znormalizowana wartość dla modelu	Poprawa względem rzeczywistego przydziału taboru [%]
11,53	9,17	20,49

W ramach testów modelu przeprowadzono również obliczenia dla innych zbiorów danych wejściowych (także dla całego podsystemu autobusowego i tramwajowego w Krakowie). Wyznaczone przydziały taboru umożliwiły jednoczesną poprawę trzech z czterech kryteriów względem przydziału rzeczywistego. Wykazano istotne zmniejszenie energochłonności taboru – od 7,2% dla podsystemu autobusowego do 11,1% dla tramwajowego. Uzyskano zmniejszenie łącznej emisji szkodliwych substancji względem przydziału rzeczywistego – o 36,1% dla całego systemu. Wyznaczony przydział taboru był lepiej dopasowany do potrzeb pasażerów (wzrósł komfort podróży) – poprawa dopasowania taboru o 37,9%.

Podsumowanie

Opracowany model optymalizacji przydziału taboru jest narzędziem, w którym uwzględniono jednocześnie parametry niewykorzystywane do tej pory w tego typu modelach. Zaprezentowane w literaturze metody operują na danych uśrednionych lub z góry ustalonych wartościach dla kosztów przewozu poszczególnymi typami taboru. Opracowany model wielokryterialny wykorzystuje dane zbierane automatycznie w sposób ciągły. W przypadku braków w tego typu zbiorach danych lub dysponowania wyłącznie danymi z pomiarów przeprowadzonych klasycznie opracowany model także ma zastosowanie. Dzięki temu jest uniwersalnym narzędziem, jakie można zastosować do optymalizowania

przydziału taboru do linii, niezależnie od wielkości systemu transportu zbiorowego oraz źródła danych wejściowych.

Przedstawiony w pracy model optymalizacji przydziału taboru wyróżnia się względem przedstawionych w literaturze także szczegółowością wykorzystanych danych wejściowych. W modelu miejsce stałych wartości kosztów wykonywania poszczególnych kursów zastąpiono kosztem zmiennym zależnym od trzech czynników zewnętrznych: profilu podłużnego trasy, liczby zatrzymań oraz warunków pogodowych. Wykonany przegląd literatury wykazał, że istnieją metody wyznaczania współczynników wpływu powyższych czynników na: zużycie paliwa i energii elektrycznej oraz wielkość emisji szkodliwych substancji. Współczynniki te uwzględniono w modelu, jako metodę skorygowania wartości średnich określonych dla każdej brygady i typu taboru.

Prace związane z testowaniem modelu optymalizacji przydziału taboru wykonano przy użyciu dedykowanego programu komputerowego. Narzędzie opracowano w środowisku MATLAB bez używania wbudowanych narzędzi oprogramowania, co umożliwia w przyszłości przekonwertowanie programu na dowolny inny język. W programie wykonano interfejs użytkownika oraz zaprogramowano wybrane algorytmy optymalizujące: algorytm genetyczny i algorytm zachłanny. Program przygotowano uniwersalnie dla dowolnego systemu miejskiego transportu zbiorowego, dzięki czemu w programie można przeprowadzać optymalizację dla systemów miejskiego transportu zbiorowego o dowolnej liczbie brygad i pojazdów.

Wykonane analizy wykazały obszerne zastosowanie opracowanego modelu i programu komputerowego. Na podstawie badań stwierdzono, że za pomocą opracowanych narzędzi możliwe jest przeprowadzanie testów umożliwiających ocenę wpływu zmian w przydziale taboru na miejski system transportu zbiorowego oraz podpowiadanie planistom zmian w przypisaniu pojazdów do poszczególnych zajezdni autobusowych lub tramwajowych. W pierwszym przypadku opracowany program należałoby zmodyfikować w taki sposób, aby jako dane wejściowe można było wprowadzać dwie macierze przydziału taboru – pierwszą z obowiązującym przydziałem oraz drugą z wprowadzonymi zmianami. Z wykorzystaniem modelu program oceniałby wpływ wprowadzonych zmian na przyjęte kryteria oceny. W drugim przypadku program sugerowałby zmiany w przypisaniu pojazdów do zajezdni, wskazując te pozycje w macierzy przydziału taboru, gdzie zmiana przypisania pojazdu do zajezdni umożliwiłaby zmniejszenie kosztów. W ramach dalszych badań nad modelem i programem komputerowym obie te funkcje będą rozwijane.

Przeprowadzone prace wykazały, że wykorzystanie danych zbieranych automatycznie w sposób ciągły ma zastosowanie w procesie zarządzania i organizowania miejskiego transportu zbiorowego, a w szczególności w wyznaczaniu przydziału taboru. Zauważono istotny brak badań naukowych związanych z szerokim zastosowaniem

tego typu danych. W ramach dalszych prac badawczych planuje się realizację badań mających na celu rozszerzenie opracowanego modelu optymalizacji przydziału taboru o dodatkowe kryteria (m.in. kryterium uciążliwości transportu zbiorowego dla mieszkańców) oraz jeszcze szersze wykorzystanie danych zbieranych w sposób automatyczny (po wcześniejszej ich weryfikacji).

Literatura

1. Aleksandrowicz J., *Modele optymalizacji przydziału taboru do linii miejskiego transportu zbiorowego*, praca doktorska, Politechnika Krakowska 2022.
2. Aleksandrowicz J., Starowicz W., Automatyczne systemy zliczania pasażerów, „Transport Miejski i Regionalny”, 2020, nr 6.
3. Aleksandrowicz J., *Informowanie pasażerów o wolnych miejscach w pojazdach miejskiego transportu zbiorowego z wykorzystaniem automatycznych systemów zliczania pasażerów*, „Transport Miejski i Regionalny”, 2019, nr 8.
4. Aleksandrowicz J., *Przydatność automatycznych systemów zliczania pasażerów w celach predykcji popytu na usługi transportowe*, „Transport Miejski i Regionalny”, 2018, nr 4.
5. Eliiyi U., Nasibov E., Ozkilcik M., Kuvvetli U., *Minimization of Fuel Consumption in City Bus Transportation: A Case Study for Izmir*, “Procedia – Social and Behavioral Sciences”, Volume 54, 4 October 2012.
6. Gavish B., Schweitzer P., Shlifer E., *Assigning buses to schedules in a metropolitan area*, “Computers & Operations Research”, Volume 5, Issue 2, 1978.
7. Gavish B., Shlifer E., *An approach for solving a class of transportation scheduling problems*, “European Journal of Operational Research”, Volume 3, Issue 2, 1979.
8. Jimenez F., Roman A., *Urban bus fleet-to-route assignment for pollutant emissions minimization*, “Transportation Research Part E”, 85/2016.
9. Kisielewski P., *Optymalizacja przydziału zadań transportowych*, „Problemy Eksploatacji”, 2/2007.
10. Li J.Q., Head K.L., *Sustainability provisions in the bus-scheduling problem*, “Transport Research Part D: Transportation and Environment”, vol. 14, 1/2009.
11. Li L., Lo H.K., Cen X., *Optimal bus fleet management strategy for emissions reduction*, “Transportation Research Part D”, 41/2015.
12. Oziomek J., Rogowski., *Optymalny przydział autobusów do pozamiejskich linii komunikacyjnych w Ostrowcu Świętokrzyskim*, „Autobusy”, 2016, nr 4.
13. Oziomek J., Rogowski., *Planowanie przydziału autobusów do linii w aspekcie minimalizacji zużycia paliwa na przykładzie MPK w Ostrowcu Świętokrzyskim*, „TTS Technika Transportu Szybowego”, 2015, nr 12.
14. Pinto Paixao J., Branco I.M., *A Quasi-Assignment Algorithm for Bus Scheduling*, Networks, Vol. 17, 1987.
15. Rabbi E., Tomhave D., Alrasheed A., Yang C.X., *Fuel consumption model for optimal transit bus assignment of gasoline, diesel and hybrid diesel-electric buses to each service route*, Proceedings of The Canadian Society for Mechanical Engineering International Congress 2016.
16. Sahu A., Tapadar R., *Solving the Assignment problem using Genetic Algorithm and Simulated Annealing*, IAENG International Journal of Applied Mathematics 36, 2007.