

Zarządzanie samochodowym taborem ciężarowym — przykłady

Freight Fleet Management — the examples

Niniejszy artykuł jest trzecim z cyklu artykułów, jakie autorzy analizują tematykę zarządzania samochodowym taborem ciężarowym. Artykuł ten prezentuje pięć przykładów zastosowania ilościowych (optymalizacyjnych) metod rozwiązywania wybranych problemów zarządzania taborem. W artykule zaprezentowano przykłady rozwiązania następujących problemów: Make or Buy (MOB), liczebność/kompozycja taboru, wymiana taboru, przydział pojazdów do zadań przewozowych oraz marszrutyzacja (ang. *vehicle routing problem* — VRP). W przypadku każdego z problemów dokonano jego definicji oraz zaprezentowano dane wejściowe i uzyskane rezultaty, w tym rozwiązanie optymalne na tle rozwiązania losowego.

Słowa kluczowe:

Make or Buy, liczebność/kompozycja taboru, wymiana pojazdów, przydział pojazdów, marszrutyzacja.

The paper is the third one from the series of three papers that the Authors dedicate to the freight fleet management topic. The paper presents five examples of the application of quantitative (optimization) methods to selected fleet management problems. The following fleet management problems are considered: Make or Buy problem, fleet sizing/composition problem, vehicle replacement problem, assignment of vehicles to transportation tasks, and the VRP. All the selected problems are carefully defined. Moreover, input and output data (obtained solutions) are presented, including optimal solutions compared to random ones.

Key words:

Make or Buy, fleet sizing/composition, vehicle replacement, vehicle assignment, VRP.

Wprowadzenie

Zarządzanie taborem samochodowym, jak wykazali autorzy w dwu wcześniejszych artykułach (Redmer, Kiciński i Rybak, 2013; Redmer, Kiciński i Rybak, 2014), realizowane jest na wszystkich poziomach zarządzania (strategicznym, taktycznym i operacyjnym), w wielu obszarach (eksploatacji, użytkowania i obsługi), na wielu stanowiskach (specjalisty ds. floty samochodowej, menedżera floty samochodowej, kierownika działu transportu, specjalisty ds. administracji flotą samochodową i innych), obejmuje wiele, różnorodnych zadań (raportowanie i sprawozdawczość, zarządzanie eksploatacją floty samochodowej, kontrolę stanu technicznego pojazdów, rozliczanie szkód komunikacyjnych, optymalizowanie i analizowanie kosztów związanych z taborem i bardzo wiele innych) oraz wykorzystuje wiele

różnych technik/metod zarządzania (intuicyjne, jakościowe i ilościowe). I jakkolwiek w literaturze przedmiotu dotyczących technik/metod zarządzania, dedykowanych obszarowi zarządzania taborem samochodowym jest bardzo wiele (Beaujon i Turnquist, 1991; Laporte, 1992; Nakagawa, 1984; Toth i Vigo, 2002), o tyle droga od opisu teoretycznego, do praktycznego zastosowania poszczególnych technik/metod jest długa i kręta. Wielu autorów opisuje proponowane przez siebie metody bardzo pobieżnie, nie podając przy tym żadnych przykładów, albo prezentując przykłady całkowicie oderwane od praktyki, rzeczywistych danych. Zatem, by przybliżyć metody opisane we wcześniejszym artykule autorów (Redmer, Kiciński i Rybak, 2014), w niniejszym zaprezentowano przykładowe problemy z zakresu zarządzania taborem (bazując na realnych danych) oraz ich rozwiązanie z zastosowaniem wspomnianych metod.

Zastosowanie metod zarządzania taborom na przykładzie wybranych problemów

Make or Buy (tabor własny czy obcy?)

Przykład problemu Make or Buy (MoB) dotyczy uniwersalnego transportu krajowego realizowanego pojazdami wysokotonażowymi (ciągniki siodłowe z 24t naczepami typu plandeka). Przedsiębiorstwo, celem realizacji owych przewozów, eksploatuje własny tabor w liczbie 22 zestawów drogowych. Pozwala to na realizację około 80% przewozów we własnym zakresie. Pozostałe 20% przewozów realizowane jest przy wykorzystaniu zewnętrznych przewoźników, z którymi rozliczenie następuje na bazie całkowitej liczby wykonanych kilometrów (krótkie, lokalne trasy).

Oceny zasadności obecnego rozwiązania transportowego przedsiębiorstwa oraz ewentualnego innego podziału przewozów pomiędzy pojazdy własne (opcja Make), a obce (opcja Buy), dokonano na podstawie wartości całkowitych kosztów zaspokojenia potrzeb przewozowych przedsiębiorstwa w okresie analizy I dla danej wartości $\%P_W^{MAX}$, przy założeniu stopnia zaspokojenia potrzeb przewozowych przedsiębiorstwa we własnym zakresie na poziomie od 0 do 100% maksymalnych obciążeń przewozowych ($\%P_W^{MAX}$) odnotowanych w podokresach i horyzontu czasowego analizy I.

Do przeprowadzenia obliczeń wykorzystano wzór numer (1) zaprezentowany w artykule pt.: „Zarządzanie samochodowym taborom ciężarowym — metody” (Redmer, Kiciński i Rybak, 2014), przekształcony do postaci:

$$K_C(\%P_W^{MAX}) = \sum_{i=1}^I \left[\text{Min} \{ P^{MAX} \cdot \%P_W^{MAX}, P_i \} k_W^w + \text{Max} \{ P_i - P^{MAX} \cdot \%P_W^{MAX}, 0 \} k_O \right] + \left[\frac{P^{MAX} \cdot \%P_W^{MAX}}{W_W} \right] \cdot k_W^d$$

oraz następujące dane:

horyzont czasowy analizy $l = 12$ (miesiąc),
 okres analizy
 wielkość potrzeb przewozowych w kolejnych okresach okresu i
 maksymalna wielkość potrzeb przewozowych występująca w horyzoncie czasowym analizy I
 odsetek maksymalnych potrzeb przewozowych realizowany taborom „własnym”
 przeciętna wydajność rzeczywista taboru „własnego” (jednego pojazdu)
 Koszty jednostkowe wykorzystania (zmiennie) taboru „własnego”
 koszty pełnej dostępności (stałe) taboru „własnego”, jednego pojazdu, w całym horyzoncie czasowym analizy I
 koszty jednostkowe zakupu usługi transportowej na rynku

Jak wynika z rysunku 1, w opisanym przypadku, korzystne jest zredukowanie stopnia realizacji potrzeb przewozowych przedsiębiorstwa taborom własnym z 80 do ok. 60% (co przekłada się na redukcję liczebności taboru własnego z 22 do 16 pojazdów) oraz przekazywanie nie 20, a 40% przewozów przewoźnikom zewnętrznym. Redukcja taka powinna skutkować obniżeniem całkowitych kosztów transportu o ok. 150 000 zł rocznie (spadek kosztów z 5,92 na 5,77 mln. zł rocznie, co stanowi 2,6%). Wytyczony w ten sposób kierunek zmian nie wymaga nakładów inwestycyjnych od przedsiębiorstwa, a uzyskany pozytywny efekt finansowy będzie w praktyce większy o wpływy ze sprzedaży 6 pojazdów (co jedynie częściowo uwzględniono w analizach, jako spadek kosztów dostępności, kosztów stałych eksploatowanego taboru). Rozwiązanie losowe niniejszego problemu generuje średnio całkowite koszty transportu na poziomie 5,98 mln zł rocznie (wartość średnia wyznaczona dla wszystkich innych, niż optymalny, odsetek potrzeb przewozowych przedsiębiorstwa realizowanych taborom własnym), co stanowi koszt wyższy od optymalnego o 3,7%.

Liczebność/kompozycja taboru

Przykład problemu ustalania liczebności taboru dotyczy uniwersalnego transportu krajowego realizowanego dwoma typami pojazdów (skrzyniowymi, tzw. solo o ładowności 14t — l_1 oraz ciągnikami siodłowymi z 24t naczepami typu plandeka — l_2). Zapotrzebowanie (popyt) na przewozy realizowane

$i = 1$ (miesiąc),
 $P_i =$ wg tabeli 1 (km/miesiąc),
 $P^{MAX} = 238\ 000$ (km/miesiąc),
 $\%P_W^{MAX} = 0$ do 100 (%),
 $W_W = 9\ 000$ (km/miesiąc),
 $k_W^w = 1,65$ (zł/km),
 $k_W^d = 100\ 000$ (zł/rok),
 $k_O = 2,8$ (zł/km przebiegu).

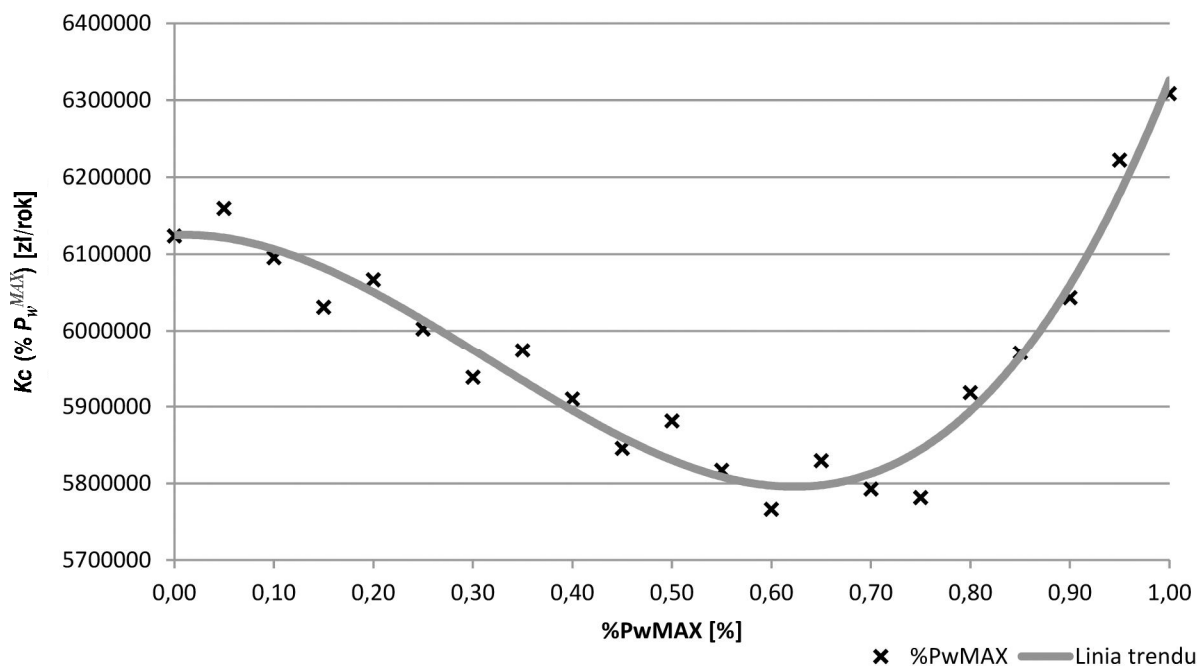
Tabela 1

Wielkość potrzeb przewozowych (popytu) występująca w podokresie i okresu analizy (tys. km/miesiąc)

	Podokres analizy i											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Popyt	137	137	175	181	168	197	183	221	238	201	179	170

Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 1

Zależność całkowitych kosztów zaspokojenia potrzeb przewozowych przedsiębiorstwa K_C (% P_W^{MAX}) w okresie analizy i od stopnia wykorzystania opcji make (taboru własnego)

Źródło: opracowanie własne.

przez przedsiębiorstwo podzielono na trzy typy, ze względu na, wyrażoną w tonach, wielkość zamówień składanych przez klientów (przewozy do 6t — P_1 , 6 do 14t — P_2 oraz 14 do 24t — P_3).

Oceny optymalnej, odpowiadającej potrzebom przedsiębiorstwa, kompozycji (liczebności) taboru dokonano na podstawie stopnia wykorzystania wydajności (możliwego do zrealizowania przebiegu) taboru K_p (l_j), przy założeniu takiej liczebności l_j owych dwóch typów pojazdów (l_1 i l_2), która w pełni zaspokaja potrzeby przewozowe przedsiębiorstwa. W efekcie, liczba pojazdów typu l_1 może się zmieniać od 0 do 45, zaś l_2 od 0 do 40 pojazdów.

Ponadto, uwzględniono zakres wydajności pojazdu typu j , określający jego możliwości przewozowe w odniesieniu do poszczególnych rodzajów popytu i . Innymi słowy, określający, jaka część wydajności (możliwego do zrealizowania przebiegu) pojazdu typu j może zostać przeznaczona na realizację przewozów typu i , przy uwzględnieniu wzajemnego do-

pasowania pojazdu i popytu. W analizowanym przypadku pod uwagę wzięto relację ładowności pojazdu oraz wielkości zamówień w ramach danego rodzaju popytu. Dla przykładu (tab. 2) pojazd 24-tonowy może w pełni realizować przewozy wysokotonażowe, bo niezależnie od tego, czy stanowiące ich podstawę zamówienia, to zamówienia 14, czy 24t, możliwe jest zaplanowanie sensownej trasy (czy to 2, czy 1 punktowej). Z kolei, gdyby pojazd ten miał realizować przewozy niskotonażowe, do 6t, wówczas ma to sens ewentualnie dla zamówień o wielkości 6t lub prawie 6t, dających 4-ro punktową trasę (w analizowanym przypadku zamówienia takie stanowiły 10% wszystkich zamówień typu 1, czyli 0 – 6t).

Do przeprowadzenia obliczeń wykorzystano wzór numer (2) zaprezentowany w artykule pt.: „Zarządzanie samochodowym taborem ciężarowym — metody” (Redmer, Kiciński i Rybak, 2014) oraz następujące dane:

okres analizy
 liczba typów popytu i
 liczba typów pojazdów j
 wielkość potrzeb przewozowych (popytu) typu i w okresie analizy
 przeciętna wydajność rzeczywista jednego pojazdu typu j w okresie analizy
 zakres wydajności pojazdu typu j , określający jego możliwości przewozowe w odniesieniu do poszczególnych typów popytu i

$= 1$ (rok),
 $I = 3$ (-),
 $J = 2$ (-),
 $P_1 = 437\,400$ (km/rok),
 $P_2 = 1\,093\,500$ (km/rok),
 $P_3 = 2\,187\,000$ (km/rok),
 $W_1 = 85\,000$ (km/rok),
 $W_2 = 100\,000$ (km/rok),
 $zW_{ij} =$ wg tabeli 2 (-).

Tabela 2

Zakres wydajności pojazdu typu j , określający jego możliwości przewozowe w odniesieniu do popytu typu i (-)

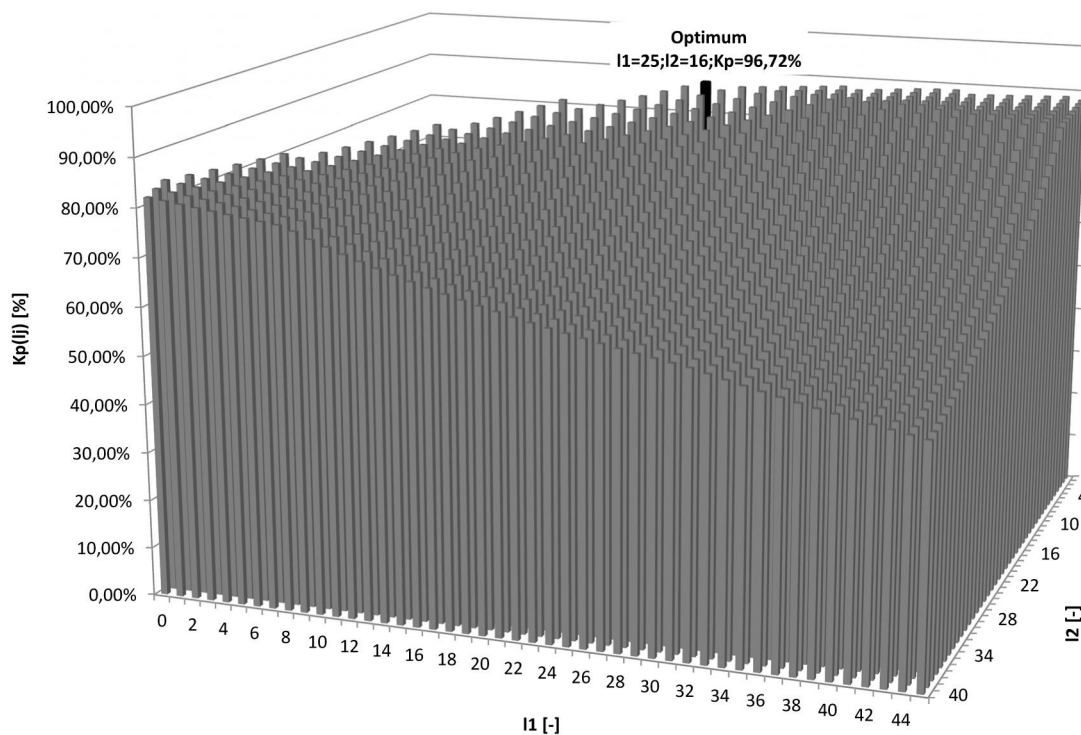
Typ pojazdu j	Typ popytu i		
	1 (0 ÷ 6t)	2 (6 ÷ 14t)	3 (14 ÷ 24t)
1 (14t)	0,8	1,0	0,5
2 (24t)	0,1	0,5	1,0

Źródło: opracowanie własne.

Jak wynika z rysunku 2, w opisanym przypadku, korzystne jest skomponowanie taboru z 25 pojazdów typu 1 (14t) oraz 16 pojazdów typu 2 (24t). Rozwiązanie takie w pełni zaspokaja potrzeby przewozowe przedsiębiorstwa oraz powinno zapewnić wysoki stopień wykorzystania możliwości przewozowych pojazdów, ich przebiegu (na poziomie niemal 97%). Oczywiście w praktyce, ów wskaźnik wykorzystania taboru może okazać się niższy, ale zakładając błąd systematyczny prowadzonych analiz, niższy wskaźnik wystąpi też przy innych, potencjalnych kompozycjach taboru.

Rysunek 2

Zależność stopnia wykorzystania $KP(I_j)$ rzeczywistej wydajności (przebiegu) taboru złożonego z pojazdów typu 1 w liczbie I_1 oraz pojazdów typu 2 w liczbie I_2



Źródło: opracowanie własne.

Uogólniając rozwiązanie i przyjmując, że satysfakcjonujące jest uzyskanie wskaźnika wykorzystania na poziomie minimum 95%, można stwierdzić, że tabor ów powinien się składać odpowiednio z pojazdów typu 1 i typu 2 w liczbie: 23 i 18 lub 24 i 17 lub 26 i 16 lub 27 i 15 lub 28 i 14, czy wreszcie owych 25 i 16. Czyli 23 do 28 pojazdów 14-tonowych oraz odpowiednio dobranej liczby 14 do 18 pojazdów 24-tonowych.

Rozwiązanie losowe niniejszego problemu skutkuje średnim stopniem wykorzystania możliwości przewozowych pojazdów, ich przebiegu, na poziomie ok. 75% (wartość średnia wyznaczona dla wszystkich innych, niż optymalny, kombinacji liczebności pojazdów typu 1 i typu 2 z przedziału od 0 do odpowiednio 45 i 40 pojazdów, takich kombinacji, które w pełni zaspokajają potrzeby przewozowe przedsiębiorstwa), co stanowi stopień wykorzystania niższy od optymalnego o niemal 23%.

Wymiana taboru

Przykład problemu wymiany taboru dotyczy nowego ciągnika siodłowego o normie emisji spalin EURO5, użytkowanego w transporcie międzynarodowym i pozyskanego na drodze 5-cioletniego leasingu finansowego.

Oceny zasadności wymiany analizowanego ciągnika siodłowego dokonano na podstawie wartości zdyskontowanych kosztów jednostkowych jego eksploatacji przy założeniu wymiany w wieku od 36 do 120 miesięcy (od 3 do 10 lat).

Do przeprowadzenia obliczeń wykorzystano wzór numer (3) zaprezentowany w artykule pt.: „Zarządzanie samochodowym taborem ciężarowym — metody” (Redmer, Kiciński i Rybak, 2014) oraz następujące dane:

horyzont czasowy analizy
okres analizy
wiek pojazdu w chwili wymiany
całkowite koszty pozyskania pojazdu ponoszone w kolejnych okresach analizy i
wartość księgowa brutto pojazdu (cena zakupu netto)
stopa amortyzacji pojazdu w kolejnych okresach analizy i
stopa podatkowa
koszty stałe eksploatacji pojazdu w wieku t ponoszone w kolejnych okresach analizy i
jednostkowe koszty zmienne eksploatacji pojazdu w wieku t ponoszone w kolejnych okresach analizy i
intensywność użytkowania (przebieg) pojazdu w wieku t w kolejnych okresach analizy i
wartość rynkowa (sprzedaży) netto pojazdu w wieku $t = t_p$
stopa procentowa — cena kapitału

Jak wynika z rysunku 3, w opisanym przypadku, korzystne jest zakończenie eksploatacji analizowanego ciągnika siodłowego wraz z końcem okresu leasingu, to jest po 60 miesiącach (5 latach), ewentualnie pozostawienie go w taborze na jeszcze jeden, kolejny rok (zależnie od formy leasingu i zapisów zawartych w umowie leasingowej). Odnosząc się do sprawy precyzyjnie, optymalny okres eksploatacji pojazdu to dokładnie 66 miesięcy. Stąd 5 lub 6 lat eksploatacji stanowi rozwiązanie najlepsze. Dalsza eksploatacja pojazdu, powyżej 6 roku jest nieopłacalna, przynajmniej przy założeniu pracy pojazdu w przewozach międzynarodowych.

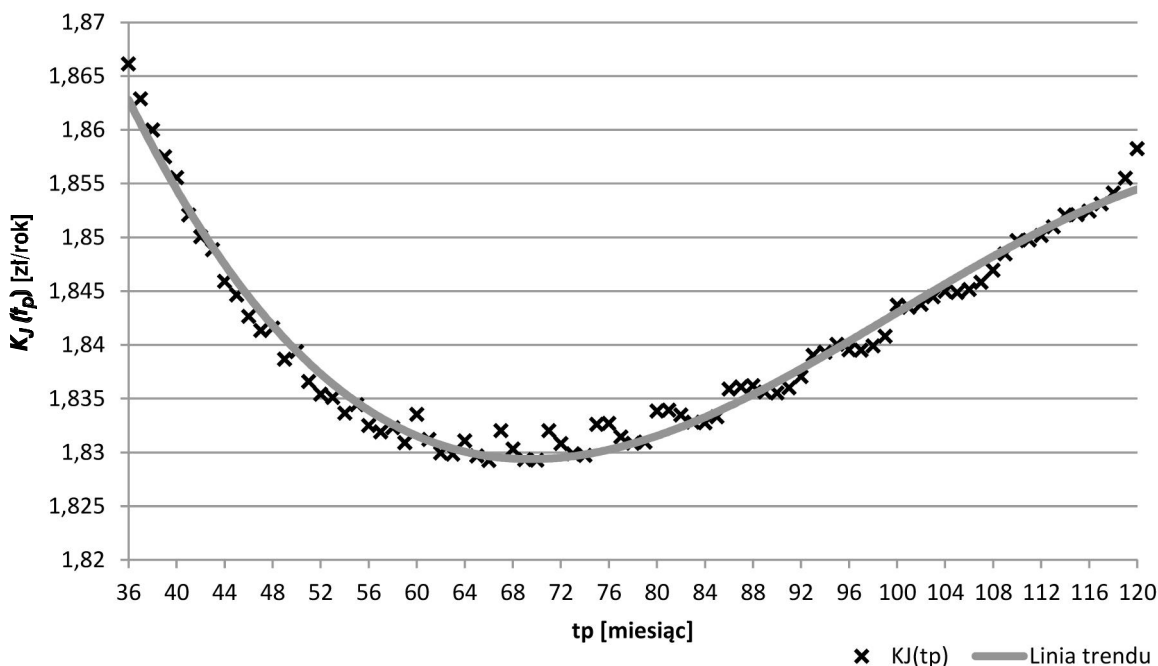
Rozwiązanie losowe niniejszego problemu generuje średnio wartość zdyskontowanych kosztów jednostkowych eksploatacji analizowanego pojazdu na poziomie wyższym od optymalnego o 0,6% (wartość średnia wyznaczona dla wszystkich innych, niż optymalny, okresów eksploatacji pojazdu z założonego przedziału czasowego). I jakkolwiek różnica ta może wydawać się niewielka, to pod uwagę należy wziąć, że dotyczy ona kosztów każdego kilometra przebiegu pojazdu w całym okresie jego eksploatacji, co np. przy rentowności polskich firm transportowych na poziomie zaledwie kilku procent, jest już znaczące (ponadto koszty te są zdyskontowane, w efekcie ich wartości mają charakter czysto analityczny, zaś rzeczywiste oszczędności z tytułu prawidłowego, optymalnego zaplanowania wymiany taboru powinny być istotnie większe).

Odnośnie, stanowiącego podstawę obliczeń, wzoru numer (3) zaprezentowanego w artykule

I = 1200 (miesiąc),
 i = 1 (miesiąc),
 t_p = od 3 do 120 (miesiąc),
 P_i = 6 000 (zł/miesiąc),
 WKB = 325 000 (zł),
 SA_i = 0,0117 (–/miesiąc; 14% rocznie),
 SP = 0,19 (–),
 $KEs_i(t)$ = 1 500 (zł/miesiąc), dla pojazdu nowego i malejące w tempie 0,25% miesięcznie,
 $KEz_i(t)$ = 2,6 (zł/km), dla pojazdu nowego i rosnące w tempie 0,17% miesięcznie,
 $IU_i(t)$ = 12 000 (km/miesiąc), dla pojazdu nowego i malejąca w tempie 0,2% miesięcznie,
 $S_i(t = t_p)$ = 50% WKB po 36 miesiącach eksploatacji pojazdu nowego i malejąca w tempie 0,4% miesięcznie,
 r = 0,001 (–/miesiąc; co w przybliżeniu odpowiada wartości inflacji rocznej na poziomie 1,3%).

Rysunek 3

Zależność zdyskontowanych kosztów jednostkowych eksploatacji pojazdu od jego wieku t_p w chwili wymieniany



Źródło: opracowanie własne.

pt.: „Zarządzanie samochodowym taborem ciężarowym — metody” (Redmer, Kiciński i Rybak, 2014), warto dodać, że iloczyn wielkości WKB , SA_i oraz SP (tj. odpowiednio wartości księgowej brutto i stopy amortyzacji pojazdu oraz stopy podatkowej), stanowi tzw. „tarczę podatkową”, która w przypadkach innych, niż zakup gotówkowy i leasing finansowy, form pozyskania pojazdu naliczana może być niekoniecznie na podstawie wartości księgowej brutto i stopy amortyzacji pojazdu, ale np. sumy części kapitałowej i odsetkowej rat leasingowych (leasing operacyjny), czy kredytowych.

Przydział pojazdów do zadań

Przykład problemu przydziału pojazdów do zadań dotyczy taboru złożonego z 10 zestawów drogowych, w skład których wchodzi ciągniki siodłowe różnych marek, o normie emisji spalin od EURO3 do EURO5 i mocy silnika od 480 do 620 KM. Dla

tych pojazdów zdefiniowano 10 zadań przewozowych, zróżnicowanych pod względem całkowitej długości trasy oraz jej przebiegu (teren płaski oraz teren górzisty, drogi powiatowe, krajowe klasy A, S, GP i P).

Przydziału analizowanego taboru (pojazdów i) do zadań przewozowych (j) dokonano z uwzględnieniem, wyznaczonego w ostatnim roku, średniego zużyciu paliwa przez poszczególne ciągniki siodłowe w terenie płaskim oraz górzystym, zużycia dodatku AdBlue (dotyczy pojazdów z normą emisji spalin EURO4 i EURO5) oraz aktualnych opłat za przejazd płatnymi odcinkami dróg w Polsce. Przydziału dokonano tak, by zminimalizować całkowite koszty K_c realizacji owych 10 zadań przewozowych.

Do przeprowadzenia obliczeń wykorzystano wzór numer (4) zaprezentowany w artykule pt. „Zarządzanie samochodowym taborem ciężarowym — metody” (Redmer, Kiciński i Rybak, 2014), przekształcony do postaci:

$$K_C(x_{ij}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(\underbrace{c_i^{ON} \cdot \frac{z_i^{ONG} \cdot l_j^g + z_i^{ONP} \cdot l_j^p}{100} + c_i^{AS} \cdot l_j^{AS} + c_i^{GGP} \cdot l_j^{GGP} + c^{AB} \cdot z_{ij}^{AB}}_{c_{ij}} \right) \cdot x_{ij}$$

oraz następujące dane:

liczba pojazdów i

$$n = 10 (-),$$

liczba zdań przewozowych j

$$n = 10 (-),$$

jednostkowa cena zakupu ON

$$= c^{ON} 5,20 \text{ (zł/litr)},$$

jednostkowa cena zakupu AdBlue

$$c^{AB} = 2,40 \text{ (zł/litr)},$$

długość trasy zadania przewozowego j składającego się z odcinka przebiegającego w terenie płaskim l_j^p

$$l_j = \text{od 245 do 810 (km), w zależności od zadania przewozowego } j \text{ od 16 do 100\% długości trasy przebiega w terenie górzystym,}$$

oraz górzystym $l_j^g (l_j = l_j^p + l_j^g)$

jednostkowa cena przejazdu drogami krajowymi klasy A i S

$$c_i^{AS} = \text{od 0,27 do 0,46 (zł/wozokilometr) w zależności od normy emisji spalin,}$$

jednostkowa cena przejazdu drogami krajowymi klasy G i GP

$$c_i^{GGP} = \text{od 0,21 do 0,37 (zł/wozokilometr) w zależności od normy emisji spalin}$$

średnie zużycie paliwa przez pojazd i w terenie płaskim w zależności od marki ciągnika siodłowego,

$$z_i^{ONp} = \text{od 31,3 do 35,6 (litr/100km),}$$

średnie zużycie paliwa przez pojazd i w terenie górzystym w zależności od marki ciągnika siodłowego,

$$z_i^{ONg} = \text{od 44,5 do 50,2 (litr/100km),}$$

średnie zużycie AdBlue przez pojazd i przy realizacji zadania j

$$z_{ij}^{AB} = \text{od 0 do 5\% zużycia ON lub od 0 do 1,6 (litr/100km).}$$

W efekcie uzyskano macierz kosztów przydziału i -tego pojazdu do realizacji j -tego zadania, którą przedstawiono w tabeli 3.

tek ten wynosi średnio 50%). Zwiększone koszty realizacji zadania, z tytułu zakupu dodatku AdBlue (pojazdy o wyższych normach emisji spalin), rekom-

Tabela 3

Koszty całkowite c_{ij} realizacji j -tych zadań przewozowych przez i -te pojazdy (zł)

Nr pojazdu i	Koszt realizacji zadania przewozowego j									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1*	1 782	1 492	1 700	1 388	1 048	1 036	939	938	693	460
2	1 892	1 586	1 820	1 471	1 129	1 111	1 017	1 005	749	490
3	1 754	1 437	1 741	1 361	1 023	1 027	916	925	672	435
4	1 746	1 450	1 708	1 355	1 036	1 027	933	927	685	444
5	1 718	1 445	1 657	1 333	1 038	1 016	940	919	690	448
6	1 794	1 490	1 750	1 393	1 063	1 053	956	951	703	457
7*	1 762	1 483	1 672	1 372	1 043	1 027	937	930	692	459
8	1 856	1 541	1 807	1 442	1 096	1 087	984	982	724	472
9**	1 674	1 406	1 570	1 307	972	963	866	874	644	434
10**	1 689	1 417	1 585	1 319	979	971	872	881	649	437

* — pojazdy z normą EURO 4, ** — pojazdy z normą EURO 5

Źródło: opracowanie własne.

Jak wynika z rysunku 4, w opisanym przypadku, przydział pojazdów do zadań zależy tak od parametrów taboru, jak i cech poszczególnych zadań. I tak, pojazdy, które spełniają normy emisji spalin EURO4 i EURO5 przydzielane są do zadań przewozowych, w których długie odcinki tras w znacznej części przebiegają drogami płatnymi (pojazdy 1, 7, 9 i 10 realizujące odpowiednio zadania przewozowe 7, 6, 3 i 5, w przypadku których drogi płatne to średnio 79% długości trasy, w przypadku pozostałych zadań odse-

pensowane są mniejszymi stawkami za przejazd drogami płatnymi. W rozwiązaniu optymalnym koszty dodatku AdBlue wyniosły 81 zł, czyli 0,7% kosztów całkowitych.

Dla porównania, rozwiązanie, w którym pojazdy o najmniejszym średnim spalaniu przydzielane są do realizacji zadań przewozowych o najdłuższych trasach (pozornie logiczne), generuje całkowite koszty transportu na poziomie 11 367 zł, co stanowi koszt wyższy od optymalnego o 1,58%. Z kolei zakładając,

Rysunek 4

Optymalny przydział pojazdów do zadań o koszcie całkowitym $K_c = 11\,190$ zł

Nr pojazdu i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1							■			
2										■
3		■								
4				■						
5	■									
6								■		
7						■				
8									■	
9			■							
10					■					
Zadanie przewozowe j^*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	810/56/12/25	740/74/32/0	640/12/70/8	640/44/0/31	500/56/40/40	460/37/65/0	450/56/71/22	430/37/0/70	345/43/0/87	245/30/0/41

(*) - zapis 810/56/12/25 oznacza: długość trasy zadania przewozowego / % długości trasy zadania przewozowego w terenie górzystym / % długości trasy zadania przewozowego drogami A i S / % długości trasy zadania przewozowego drogami G i GP

Źródło: opracowanie własne.

że pojazdy spełniające wyższą normę emisji spalin przydzielane są do zadań, w których sumaryczna długość płatnych odcinków dróg jest największa, otrzymujemy rozwiązanie o całkowitych kosztach transportu na poziomie 11 308 zł, czyli wyższych od poziomu optymalnego o 1,05%. Rozwiązanie losowe niniejszego problemu generuje średnio całkowite koszty transportu na poziomie 11 383 zł (wartość średnia wyznaczona dla wszystkich innych, niż optymalny, przydział pojazdów do zadań), co stanowi średnio koszt wyższy od optymalnego o 1,7%.

Planowanie tras pojazdów

Przykład problemu planowania tras (marszrutyzacji), dla zagadnienia rozwożkowego, dotyczy taboru złożonego z 3 zestawów drogowych, w skład których wchodzi ciągniki siodłowe wraz z naczepami o jednakowej pojemności wyrażonej w paletach. Taborem tym wykonywany jest transport zamówionego przez klientów ładunku. Miejsce załadunku zlokalizowane jest w bliskim sąsiedztwie „bazy” przedsiębiorstwa transportowego (dla uproszczenia w analizach pominięto tą odległość). Dla rozważanego przypadku zdefiniowano 9 klientów (punktów rozładunku), o zróżnicowanym popycie wyrażonym w paletach.

Do przeprowadzenia obliczeń wykorzystano wzór numer (5) zaprezentowany w artykule pt. „Zarządzanie samochodowym taborem ciężarowym — metody” (Redmer, Kiciński i Rybak, 2014) oraz następujące dane:

„koszt” przejazdu drogą e

(odległość pomiędzy punktami i oraz j)

wielkość popytu zgłaszana przez klienta i

ładowność (pojemność) pojedynczego zestawu drogowego

Lokalizację klientów względem „bazy” oraz ich numerację przedstawiono na rysunku 5. Oprócz tego, założono, że każdy przewóz musi zostać wykonany w ciągu jednego dnia, a pojazd wyrusza z „bazy” zlokalizowanej w Poznaniu oraz powraca do niej, po dostarczeniu ładunku do poszczególnych klientów.

Dla tak zdefiniowanych klientów optymalne rozwiązanie przedstawiono w tabeli 4. Poszczególnym zestawom drogowym przyporządkowano różną liczbę klientów — dla zestawu 1 — dwóch klientów, dla zestawu 2 — czterech klientów, dla zestawu 3 — trzech klientów.

Wprowadzenie niewielkiej, losowej zmiany w rozwiązaniu optymalnym, np. poprzez zmianę marszruty dla zestawu nr 2 na: Baza — klient 7 — klient 3 — klient 1 — klient 4 — Baza, powoduje pogorszenie kryterium długości trasy o 30 km, czyli o 7,3%.

Jak podkreślano w artykule pt. „Zarządzanie samochodowym taborem ciężarowym — metody” (Redmer, Kiciński i Rybak, 2014), problem planowania tras (marszrutyzacji) należy do problemów NP-trudnych optymalizacji kombinatorycznej (ang. NP-hard problems) — liczba potencjalnych rozwiązań problemu wzrasta nieliniowo. Oprócz tego, należy podkreślić, że liczba poszukiwanych dróg wchodzących w skład optymalnych marszrut pojazdów rośnie wraz z liczbą pojazdów oraz liczbą obsługiwanych klientów (rys. 6). Przykładowo, dla problemu, w którym ładunek rozwożony jest przez 2 pojazdy do 10 klientów, liczba poszukiwanych dróg wynosi 12. Natomiast dla podwojonej liczby pojazdów i klientów wartość ta wzrasta do 24.

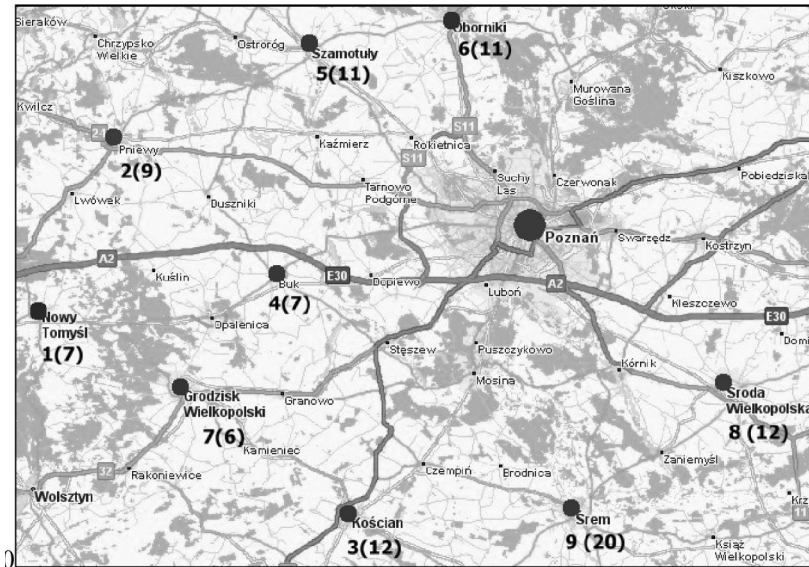
ce (c_{ij}) = od 21 do 103 (kilometr),

q_i = od 6 do 20 (paleta),

Q = 33 (paleta).

Rysunek 5

Lokalizacje „bazy” oraz poszczególnych klientów (w nawiasach podano zapotrzebowanie wrazone w paletach)



Źródło: opracowanie własne.

Tabela 4

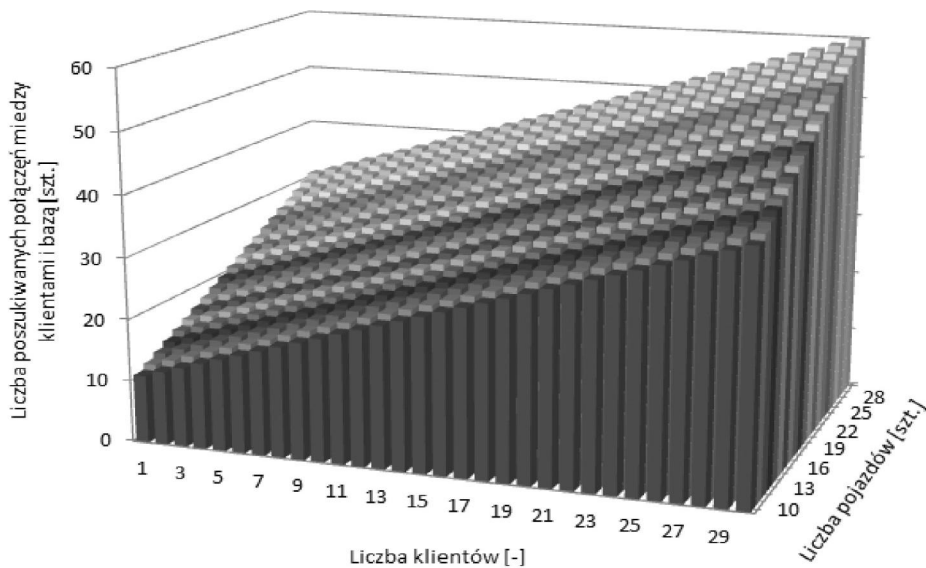
Rozwiązanie optymalne rozważanego problemu planowania tras (marszrutyzacji)

Nr zestawu <i>i</i>	Trasa przejazdu (marszruta)	Długość trasy (km)	Liczba palet (-)
1	Baza — klient 8 — klient 9 — Baza	103	32
2	Baza — klient 3 — klient 7 — klient 1 — klient 4 — Baza	174	32
3	Baza — klient 6 — klient 5 — klient 2 — Baza	135	31
	Razem:	412	95

Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 6

Zależność liczby poszukiwanych dróg (bezpośrednich połączeń) pomiędzy klientami, w tym „bazą” od liczby pojazdów oraz klientów



Źródło: opracowanie własne.

Rozwiązanie losowe niniejszego problemu generuje średnio sumaryczną długość tras na poziomie 510 km (wartość średnia wyznaczona dla wszystkich innych, niż optymalny plan tras), co stanowi koszt wyższy od optymalnego o 23,8%.

Podsumowanie

Jak pokazano w artykule pt.: „Zarządzanie samochodowym taborem ciężarowym — metody” (Redmer, Kiciński i Rybak, 2014), metod zarządzania ciężarowym taborem samochodowym jest bardzo wiele i są one bardzo różnorodne. Rodzi się zatem pytanie, czy ich stosowanie może przynieść efekty? Powyższe przykłady zastosowania ilościowych metod zarządzania taborem do wybranych problemów pokazały, że uzyskiwane rozwiązania optymalne, z jednej strony, są trudne do ustalenia intuicyjnego, z drugiej zaś logiczne i lepsze od rozwiązań losowych o 0,6 do ponad 23%. Najbardziej podatnymi na usprawnienia okazały się problemy kompozycji taboru oraz marszrutyżacji, jakkolwiek należy mieć na uwadze, że uzyskiwany

efekt zależy w dużym stopniu od charakterystyki (parametrów) rozwiązywanego problemu oraz tego, że akurat oceny rozwiązań tych właśnie problemów nie dokonano na bazie kosztu (wielkości finansowej). Ma to, zdaniem autorów, odzwierciedlenie w praktyce — optymalizacja pozwala na polepszenie w większym stopniu kryteriów nieekonomicznych (np. stopnia wykorzystania), przy jednoczesnej mniejszej poprawie kryteriów ekonomicznych (np. kosztów).

Bazując na powyższych obserwacjach, w opinii autorów, zasadne jest stosowanie ilościowych (optymalizacyjnych) metod do zarządzania taborem, jakkolwiek ich praktyczne zastosowanie, w konkretnym przypadku, wymaga jednak szeregu dostosowań.

Niniejszy artykuł kończy serię trzech, opublikowanych na łamach „Gospodarki Materiałowej i Logistyki”, artykułów poświęconych zarządzaniu samochodowym taborem ciężarowym z zastosowaniem metod ilościowych. Dwa poprzednie to „Zarządzanie samochodowym taborem ciężarowym — istota i zakres” (Redmer, Kiciński i Rybak, 2013) oraz „Zarządzanie samochodowym taborem ciężarowym — metody” (Redmer, Kiciński i Rybak, 2014).

Literatura

- Beaujon, G.J. Turnquist, M.J. (1991). A model for fleet sizing and vehicle allocation. *Transportation Science*, 25 (1), 19–45.
- Laporte, G. (1992). The Vehicle Routing Problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, 59, 345–358.
- Nakagawa, T. (1984). A summary of discrete replacement policies. *European Journal of Operational Research*, 17, 382–392.
- Redmer, A. Kiciński, M. Rybak, R. (2013). Zarządzanie samochodowym taborem ciężarowym — istota i zakres. *Gospodarka Materiałowa i Logistyka*, (7), 13–20.
- Redmer, A. Kiciński, M. Rybak, R. (2014). Zarządzanie samochodowym taborem ciężarowym — metody. *Gospodarka Materiałowa i Logistyka*, (4), 11–18.
- Toth, P. Vigo, D. (2002). *The vehicle routing problem*. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics.

Zespół recenzentów miesięcznika „Gospodarka Materiałowa i Logistyka” w 2014 r.:

- **prof. dr hab. Piotr Blaik** — Uniwersytet Opolski
- **prof. dr hab. Marek Ciesielski** — Uniwersytet Ekonomiczny w Poznaniu
- **prof. dr hab. Marek Fertsch** — Politechnika Poznańska
- **prof. dr hab. Danuta Kisperska-Moroń** — Uniwersytet Ekonomiczny w Katowicach
- **prof. dr hab. Joanicjusz Nazarko** — Politechnika Białostocka
- **prof. dr hab. Maria Nowicka-Skowron** — Politechnika Częstochowska
- **prof. dr hab. Agnieszka Skowrońska** — Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu
- **prof. dr hab. inż. Anna Sobotka** — Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
- **prof. dr.-Ing. Frank Straube** — Technische Universität Berlin
- **prof. dr hab. inż. Jacek Szoltysek** — Uniwersytet Ekonomiczny w Katowicach
- **prof. dr hab. Maciej Szymczak** — Uniwersytet Ekonomiczny w Poznaniu
- **prof. dr hab. inż. Jan Szymshal** — Politechnika Śląska w Katowicach
- **prof. dr hab. Maciej Urbaniak** — Uniwersytet Łódzki