

Prof. dr hab. inż. Andrzej Niewczas
Instytut Transportu Samochodowego
ul. Jagiellońska 80, 03-301 Warszawa, Polska
e-mail: andrzej.niewczas@its.waw.pl

Dr inż. Joanna Rymarz
Instytut Transportu, Silników Spalinowych i Ekologii
Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 36, 20-816 Lublin, Polska
e-mail: j.rymarz@pollub.pl

Dr Ewa Dębicka
Instytut Transportu Samochodowego
ul. Jagiellońska 80, 03-301 Warszawa, Polska
e-mail: ewa.debicka@its.waw.pl

Etapy użytkowania pojazdów ze względu na efektywność eksploatacyjną na przykładzie autobusów miejskich

Słowa kluczowe: autobusy komunikacji miejskiej, koszty napraw uszkodzeń zużyciowych, efektywność eksploatacyjna, etapy użytkowania

Abstrakt

Celem artykułu jest porównanie efektywności eksploatacyjnej autobusów miejskich w różnych etapach okresu użytkowania. Przeprowadzono badania gotowości technicznej, kosztów napraw i przychodów w czasie sześciu lat eksploatacji na przykładzie dwóch popularnych marek autobusów (krajowych i importowanych). Na podstawie tych badań wyznaczono charakterystykę efektywności eksploatacyjnej autobusów. Wykazano, że czas użytkowania wpływa znacząco na efektywność eksploatacji. Rozpatrzono podział całkowitego okresu użytkowania pojazdów na okres gwarancyjny i pogwarancyjny oraz wprowadzono nowy podział na „okres pełnej przydatności eksploatacyjnej” i „okres ograniczonej przydatności eksploatacyjnej”. Ten nowy podział czasu użytkowania na etapy umożliwi wyznaczenie najbardziej racjonalnej granicy użytkowania pojazdu do chwili wycofania go z eksploatacji. Może być także wykorzystany przy wyborze marki pojazdu w ramach programu odnowy lub rozbudowy floty.

1. Wstęp

W dużych aglomeracjach miejskich transport publiczny, staje wobec nowego wyzwania, jakim jest progresywny wzrost liczby użytkowanych pojazdów i wynikające stąd ograniczenia płynności ruchu i bezpieczeństwa jazdy oraz hałas i zanieczyszczenie środowiska. Badania prowadzone w wielu krajach dowiodły, że transport publiczny powinien bezwzględnie dominować w osobowym ruchu miejskim ze względu na ekologiczność i efektywność przewozową [6], [10], [18].

Istotnym problemem publicznego transportu zbiorowego jest niezawodność środków transportu. Niski poziom niezawodności autobusów pogarsza punktualność funkcjonowania systemu i obniża zaufanie u pasażerów, a także zwiększa koszty przewozów i obniża efektywne wykorzystanie floty. Dlatego też, wiele przedsiębiorstw transportowych, dużą uwagę poświęca zagadnieniom doboru środków transportu o wysokiej jakości [15]. Dąży się tutaj do zrównoważenia dwóch wymagań: zapewnienia maksymalnego poziomu niezawodności przy akceptowalnym poziomie kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych [5], [3], [7], [8], [16]. Z tego powodu w przedsiębiorstwach komunikacyjnych wykorzystuje się systemy monitorowania ryzyka uszkodzeń zużyciowych oraz diagnozowania zmiany wartości rezydualnej użytkowanych pojazdów [17]. Jest to ważny problem z punktu widzenia zapewnienia ciągłości działania systemu komunikacji w mieście. Innym ważnym problemem w procesie eksploatacji pojazdów jest zagadnienie granicznego czasu (kresu) użytkowania, po którym należy wycofać pojazd z eksploatacji (wymienić lub zlikwidować) [14], [1].

W pracy [12] przedstawiono wyniki badań gotowości technicznej autobusów miejskich w funkcji czasu użytkowania. Wykazano, że gotowość techniczna w okresie gwarancyjnym i pogwarancyjnym może różnić się istotnie w zależności od marki autobusu. Bardziej kompleksowy obraz charakterystyki eksploatacyjnej pojazdu można otrzymać po uwzględnieniu kosztów napraw związanych z fizycznym zużywaniem się podzespołów i elementów [11], [17]. Można wtedy ocenić efektywność eksploatacyjną pojazdu w zależności od czasu użytkowania lub przebiegu drogowego. Efektywność eksploatacyjna jest jedną z najważniejszych cech jakości eksploatacyjnej pojazdu i może stanowić kryterium oceny jego przydatności eksploatacyjnej [13], [14], [2].

W niniejszym artykule przedstawiono autorski model oceny efektywności eksploatacyjnej i jego wykorzystanie do wyznaczania racjonalnego czasu użytkowania (resursu) autobusów. Model ten uwzględnia wskaźniki gotowości technicznej i niezawodności pojazdów oraz związane z tym koszty napraw i przestojów. Model jest podstawą nowego podziału czasu użytkowania na okres pełnej przydatności eksploatacyjnej i ograniczonej przydatności

eksploatacyjnej autobusów. Model został zweryfikowany na podstawie badań autobusów w okresie 6 lat eksploatacji na przykładzie miasta Lublin.

2. Model oceny efektywności eksploatacji

W niniejszej pracy posłużono się pojęciem przychodu z realizacji planowanych zadań przewozowych o charakterze quasi ciągłym. Wyróżniono przychód potencjalny P_P oraz przychód prognozowany P_R . Średni w i -tym miesiącu potencjalny przychód P_{Pi} w badanej próbie autobusów obliczono ze wzoru:

$$P_{Pi} = \lambda_i \times s \quad (1)$$

gdzie:

λ_i – intensywność użytkowania, średnia miesięczna liczba kilometrów dla jednego autobusu w i -tym miesiącu użytkowania [km];

s – stawka przewozowa za 1 km stosowana w badanym przedsiębiorstwie [zł/km];

$i = 1, 2, 3, \dots, 72$

Przychód prognozowany P_{Ri} w i -tym miesiącu użytkowania autobusu obliczono według wzoru:

$$P_{Ri} = K_{gi} \times P_{Pi} \quad (2)$$

gdzie:

K_{gi} – średni wskaźnik gotowości technicznej w i -tym miesiącu użytkowania [-].

$$K_{Gi} = \frac{N_{zi} - N_{ni}}{N_{zi}} \quad (3)$$

gdzie: N_{zi} – ilość wozodni inwentarzowych w i -tym miesiącu użytkowania; N_{ni} – ilość wozodni przestojów ze względu na naprawę w i -tym miesiącu użytkowania.

Nie uwzględniono przestojów krótszych niż jeden dzień.

Wskaźnik efektywności eksploatacyjnej autobusu w i -tym miesiącu użytkowania $E_{e,i}$ obliczono ze wzoru:

$$E_{e,i} = \frac{P_{Ri}}{C_{Ni}} \quad (4)$$

gdzie: C_{Ni} – koszt napraw autobusu w i -tym miesiącu [zł]

Wskaźnik średniej efektywności eksploatacyjnej E_e [-] autobusu w rozpatrywanym okresie użytkowania obliczono według wzoru:

$$E_e = \frac{1}{n} \sum_{i=n_p}^{n_k} \frac{P_{Ri}}{C_{Ni}} \quad (5)$$

gdzie: n – liczba miesięcy w rozpatrywanym okresie użytkowania; n_p – początkowy miesiąc w rozpatrywanym okresie użytkowania; n_k – końcowy miesiąc w rozpatrywanym okresie użytkowania.

3. Przebieg badań

Do badań wybrano dwie popularne marki autobusów – markę krajową (oznaczoną w artykule jako D) oraz markę zagraniczną (oznaczoną jako I). W rozpatrywanym tu problemie porównywania marek pojazdów, biorąc pod uwagę podobieństwo charakterystyk techniczno - ekonomicznych pominięto planowane koszty użytkowania (koszty paliwa, koszty płynów eksploatacyjnych, koszty osobowe) oraz programowane koszty obsługi technicznych i odpisy amortyzacyjne [13], [11].

Podstawowe dane techniczno – eksploatacyjne autobusów zamieszczono w tabeli 1. Badania prowadzone były metodą próby ciągłej. Autobusy były eksploatowane w porównywalnych warunkach drogowych i klimatycznych. Wybór pojazdów z jednej partii produkcyjnej oraz fakt jednoczesnego wprowadzenia ich do eksploatacji były podstawą uznania próby jako jednorodnej.

Tab. 1. Wskaźniki techniczno – eksploatacyjne badanych autobusów

	D	I
Moc silnika [kW]	188	210
Max. moment obrotowy [Nm]	1 050	1 100
Długość [mm]	12 000	11 950
Masa własna [kg]	10 900	10 860
Całkowita masa max. [kg]	18 000	18 000
Miejsca siedzące	29	27
Miejsca stojące	74	78

Tab. 2. Wskaźniki intensywności użytkowania badanych autobusów

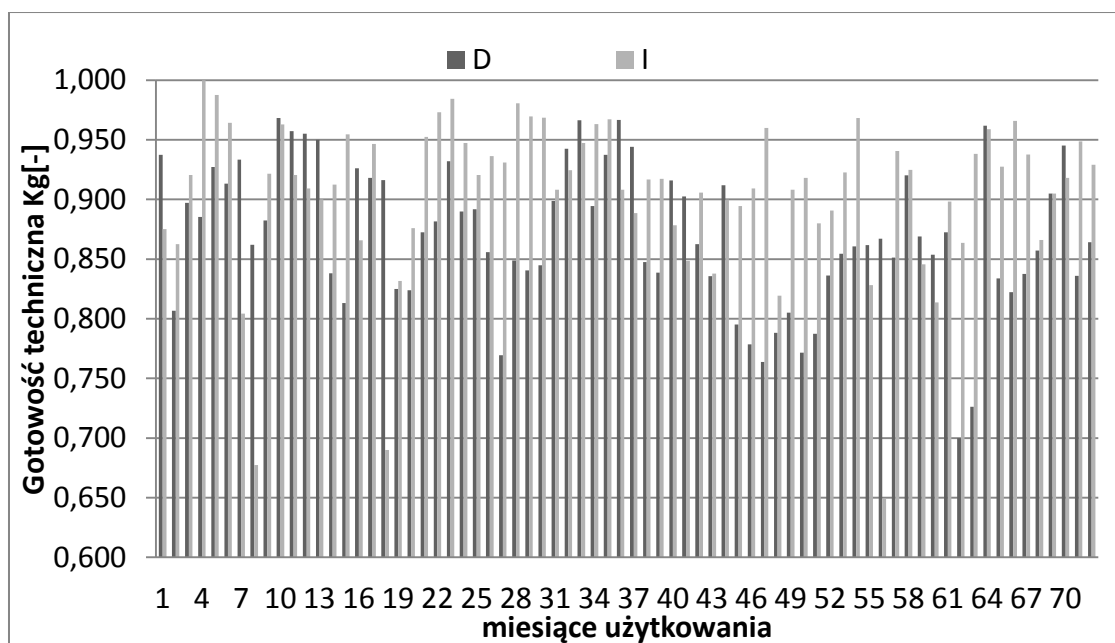
L.p.	Nazwa wskaźnika	Jednostka miary	Wielkość wskaźnika	
			D	I
1	Liczność próby	szt	20	22
2	Średni przebieg pojazdu w okresie badań	km	438 303	438 942
3	Średni przebieg pojazdu w miesiącu	min	77	130
		śr.	6088	6464
		max	8859	8948
5	Całkowity czas badań	miesiące	72	72

Liczność próby wynosiła 20 pojazdów marki D oraz 22 pojazdy marki I. Dane eksploatacyjne rejestrowano w okresie 72 miesięcy. Odpowiadało to łącznym przebiegom eksploatacyjnym równym odpowiednio 8,766 mln km dla wszystkich autobusów z próby D i 9,656 mln km wszystkich autobusów z próby I. Średni obserwowany przebieg drogowy okresu użytkowania wyniósł 438,3 tys km dla autobusów marki D i 438,9 tys km dla autobusów marki I (tabela 2). Średnie dzienne przebiegi wynosiły około 250 km. Średni miesięczny przebieg wyniósł 6 088 km dla autobusów D i 6 464 km dla autobusów I.

4. Wyniki badań

4.1. Gotowość techniczna autobusów

Wskaźniki gotowości technicznej autobusów w funkcji czasu użytkowania w ujęciu miesięcznym przedstawiono na rysunku 1. W początkowym okresie (do 27 miesiąca) gotowość pojazdów marki D wyniosła średnio 0,890, a następnie zmniejszyła się, osiągając w 62 miesiącu wartość minimalną 0,700. Średnia gotowość autobusów marki I wyniosła ok. 0,900 w początkowym okresie eksploatacji. W okresie późniejszym (pogwarancyjnym) zmniejszyła się do ok. 0,650, co było spowodowane długim oczekiwaniem na części zamienne.

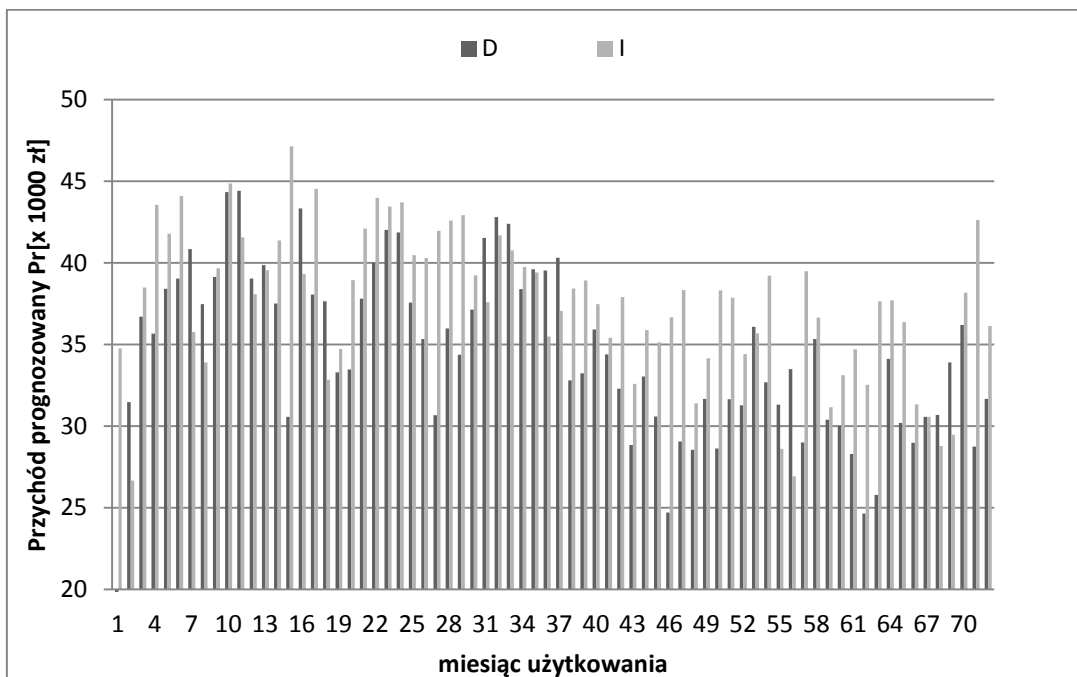


Rys. 1. Gotowość techniczna autobusów w funkcji czasu użytkowania w ujęciu miesięcznym [12]

4.2. Przychód prognozowany

Wskaźniki przychodu prognozowanego P_{Ri} obliczono na podstawie wzoru (2) przyjmując stawkę przewozową $s=6,5$ zł/km, stosowaną w MPK Lublin. Warto zaznaczyć, że wielkość stawki s może w ogólności przyjmować bardzo zróżnicowane wartości [4]. Wyniki badań

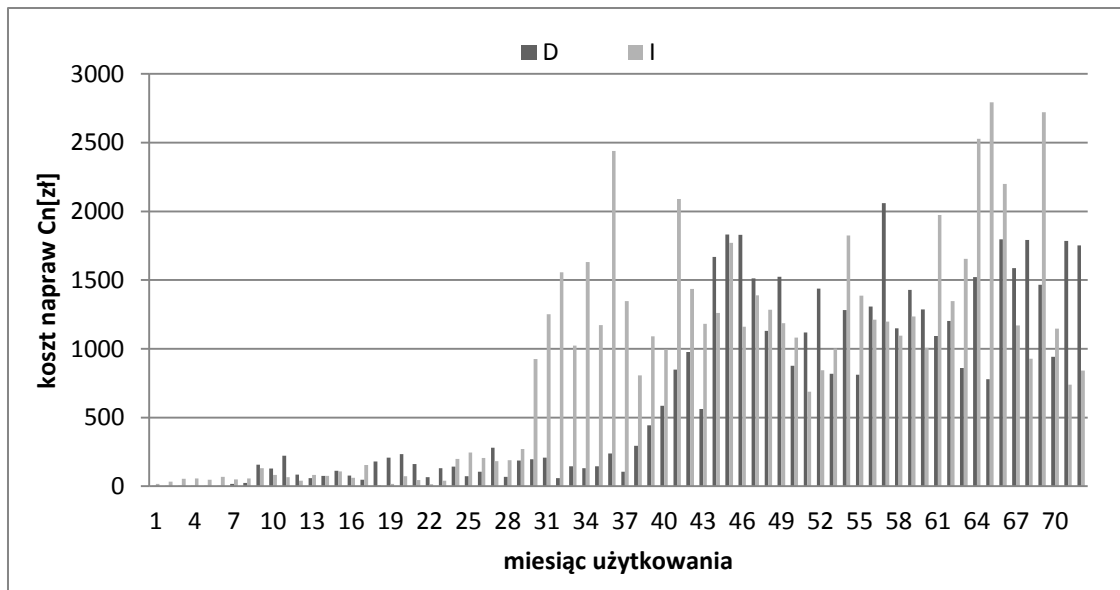
przychodu dotyczące autobusów marki D i marki I przedstawiono w funkcji czasu użytkowania na rysunku 2 w ujęciu miesięcznym. W gwarancyjnym okresie eksploatacji (0 - 24 miesiące) średni przychód prognozowany dla autobusów marki D wyniósł średnio 37,5 tys zł (na 1 autobus), natomiast dla autobusów marki I - 39,8 tys zł. Względnie duży przychód w początkowym okresie eksploatacji w znacznym stopniu spowodowany był niskimi kosztami użytkownika i małą liczbą uszkodzeń. Wraz ze wzrostem czasu użytkowania przychód malał. W okresie pogwarancyjnym zanotowano odpowiednio poziom ok. 33,0 tys. zł (marka D) i ok. 36,5 tys. zł (marka I).



Rys. 2. Średni miesięczny przychód prognozowany w funkcji czasu użytkowania [9]

4.3. Charakterystyka kosztów napraw autobusów

Do kosztów napraw C_{Ni} zaliczono naprawy części spowodowane eksploatacyjnym zużyciem, w tym między innymi: klocków hamulcowych, wycieraczek, żarówek, bezpieczników, chłodnic, itp. Natomiast nie uwzględniono części, których uszkodzenia nie były bezpośrednio związane z wiekiem (przebiegiem) pojazdu (np. lusterka, szyby, części wymieniane z powodów przypadkowych uszkodzeń mechanicznych lub kradzieży) oraz części, zaliczonych do dodatkowego wyposażenia autobusu (np. monitory LCD, automaty do sprzedaży biletów). Na rysunku 3 przedstawiono wykres miesięcznych kosztów napraw w całym obserwowanym okresie użytkowania pojazdów.



Rys. 3. Miesięczny koszt napraw przypadający na 1 autobus [9]

Rozpatrując dynamikę kosztów przedstawionych na rys. 3 można zauważyć, że w początkowym okresie użytkowania pojazdów marki I (1- 29 miesięcy) średni miesięczny koszt naprawy wyniósł ok. 90 zł. W następnym okresie koszt napraw gwałtownie się zwiększył, osiągając średni poziom ok. 1380 zł. Podobny, skokowy wzrost kosztu napraw występuje w przypadku pojazdów marki D, jednak dopiero po ok. 40 miesiącach użytkowania. Średni koszt napraw autobusów D w pierwszym okresie (1-40 miesięcy) wyniósł 110 zł, natomiast w drugim okresie (41-72 miesiące) – 1200 zł.

Analizując strukturę niezawodności autobusów wykazano, że niezawodność związana ze zużyciem eksploatacyjnym poszczególnych układów konstrukcyjnych jest różna w zależności od marki autobusu (tabela 3). W obu badanych pojazdach największa liczba uszkodzeń związana jest z układem elektrycznym. Prawdopodobieństwo poprawnej pracy tego układu jest najniższe, a przebiegi między uszkodzeniami najkrótsze spośród wszystkich analizowanych układów.

W przypadku obu marek najbardziej wyróżniającymi się źródłami uszkodzeń zużyciowych okazały się układ elektryczny i oświetlenie. Natomiast największą niezawodność stwierdzono w przypadku układów zawieszenia, ogrzewania i klimatyzacji oraz ogumienia. Analizując uszkodzenia poszczególnych układów w autobusach marki D stwierdzono, iż najczęściej uszkadzały się układy: elektryczny, silnik, drzwi oraz oświetlenia. Natomiast największe przebiegi między uszkodzeniami wystąpiły w układach ogrzewania i klimatyzacji oraz w układzie zawieszenia. W autobusach marki I zaobserwowano, że najczęściej uszkadzają się cztery następujące układy: elektryczny, pneumatyczny, drzwi, przeniesienia napędu i oświetlenia.

Tab. 3. Zestawienie wyników oceny niezawodności dla $R^*(t)=0,5$

Lp.	Układ konstrukcyjny	Przebieg między uszkodzeniami [km]	
		Marka D	Marka I
1.	silnik (US)	15 068	39 580
2.	chłodzenia (UCH)	27 364	76 200
3.	zasilania (UZ)	46 969	58 090
4.	hamulcowy (UH)	46 693	40 040
5.	przeniesienia napędu (UN)	44 647	29 616
6.	zawieszenia (UZW)	80 076	94 444
7.	elektryczny (UE)	7 360	11 361
8.	pneumatyczny (UP)	17 355	29 233
9.	ogrzewanie i klimatyzacja (UOK)	87 424	81 946
10.	drzwi (UD)	15 215	24 779
11.	ogumienie (UOG)	54 545	94 444
12.	oświetlenie (UOW)	9 867	7 325

Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano, że autobusy marki I charakteryzują się większym przebiegiem pomiędzy uszkodzeniami niż autobusy marki D. Średnia wartość przebiegu między uszkodzeniami wynosi 2786 km w przypadku autobusów I oraz 1787 km w przypadku autobusów D.

4.4. Efektywność eksploatacyjna autobusów

Efektywność eksploatacyjną E_{ek} obliczono według wzoru 4. Na rysunku 4 przedstawiono wykres efektywności eksploatacyjnej w ujęciu miesięcznym. Efektywność eksploatacyjna autobusów marki D uśredniona w całym badanym okresie $n=72$ miesiące użytkowania wyniosła $E_{ek}^D (n=72)=306$. Oznacza to, że 306 zł przychodu uzyskano po wydatkowaniu kwoty 1 zł na naprawę. Odpowiednio efektywność autobusów marki I wyniosła $E_{ek}^I (n=72)=263$. Przebieg efektywności eksploatacyjnej badanych autobusów cechuje się skokową zmianą wartości oraz dynamiki po upływie określonego czasu użytkowania.

Na podstawie analizy przebiegu efektywności przedstawionej na rys. 4 oraz analizy uszkodzeń i kosztów napraw (rys. 3) wprowadzono nowy podział całkowitego okresu użytkowania na okres pełnej przydatności eksploatacyjnej (PPE) i następujący po nim okres ograniczonej przydatności eksploatacyjnej (OPE).

W przypadku marki D uznano, że granica między PPE i OPE wynosi $n_x^D=40$ miesięcy, natomiast w przypadku marki I $n_x^I=30$ miesięcy.

Jako kryterium doboru najlepszej granicy podziału na etapy PPE i OPE przyjęto minimalną wartość względnego błędu średniokwadratowego w zbiorze wartości E_{ek} charakteryzujących etap ograniczonej przydatności eksploatacyjnej pojazdu.

Kryterium optymalizacji (funkcję celu) zapisano wzorem:

$$v(n_x) = \frac{S(n_x)}{\frac{1}{n_k - n_x} \sum_{i=n_x}^{n_k} E_{e,i}} \rightarrow \min \quad (6)$$

$$S(n_x) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=n_x}^{n_k} (E_{e,i} - \frac{1}{n_k - n_x} \sum_{i=n_x}^{n_k} E_{e,i})^2} \quad (7)$$

gdzie:

$v(n_x)$ – względny błąd średniokwadratowy efektywności eksploatacyjnej pojazdu w etapie ograniczonej przydatności eksploatacyjnej,

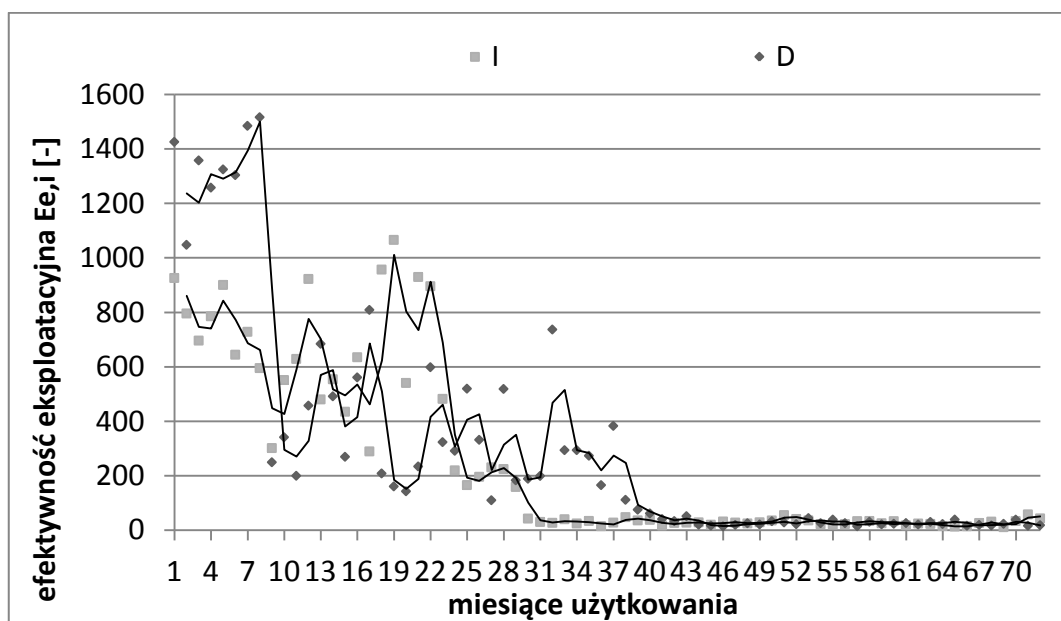
$S(n_x)$ – błąd średniokwadratowy efektywności eksploatacyjnej pojazdu w etapie ograniczonej przydatności eksploatacyjnej,

E_{ei} – efektywność pojazdu w i -tym miesiącu użytkowania,

$i=1,2,3 \dots n$, n - liczba miesięcy w badanym okresie,

n_x – poszukiwana liczba miesięcy stanowiąca granicę między okresem pełnej a okresem ograniczonej przydatności eksploatacyjnej pojazdu,

n_k – końcowy, badany miesiąc użytkowania (całkowita liczba miesięcy w badanym okresie użytkowania).



Rys. 4. Przebieg efektywności eksploatacyjnej autobusów w funkcji czasu użytkowania w ujęciu miesięcznym

Tab. 4. Statystyki opisowe efektywności eksploatacyjnej autobusów w okresie pełnej przydatności eksploatacyjnej (PPE) oraz ograniczonej przydatności eksploatacyjnej (OPE)

okres eksploatacji	marka autobusu	Efektywność eksploatacyjna				
		wartość średnia E_e	błąd standardowy S	Względny błąd v	$E_{e_{min}}$	$E_{e_{max}}$
PPE	D	530	445	0,841	61	383
OPE		26	9	0,358	14	51
PPE	I	566	285	0,504	42	1066
OPE		29	10	0,358	11	58

Tab. 5. Statystyki opisowe efektywności eksploatacyjnej autobusów w okresie gwarancyjnym (G) i pogwarancyjnym (P)

okres eksploatacji	marka autobusu	Efektywność eksploatacyjna				
		wartość średnia E_e	błąd standardowy S	Względny błąd v	$E_{e_{min}}$	$E_{e_{max}}$
G	D	698	488	0,699	143	1517
P		110	158	1,439	14	737
G	I	665	227	0,341	219	1066
P		46	52	1,128	11	231

Tab. 6. Statystyki opisowe efektywności eksploatacyjnej autobusów w pierwszym i drugim ujednoliconym okresie użytkowania

okres eksploatacji	marka autobusu	Efektywność eksploatacyjna				
		wartość średnia E_e	błąd standardowy S	Względny błąd v	$E_{e_{min}}$	$E_{e_{max}}$
ujednolicony pierwszy	D	571	449	0,786	110	1517
ujednolicony drugi		41	61	1,498	14	383
ujednolicony pierwszy	I	476	329	0,690	15	1066
ujednolicony drugi		29	11	0,369	11	58

W tabeli 4 podano wyniki obliczeń efektywności eksploatacyjnej przy zastosowaniu powyżej opisanej zasady optymalnego podziału okresu użytkowania na etapy - wzór 6. Efektywność eksploatacyjna autobusów w okresie pełnej przydatności (PPE) wyniosła $E_{ep}^D=530$ – marka D; $E_{ep}^I=566$ – marka I, natomiast w okresie ograniczonej przydatności (OPE) uzyskano $E_{eO}^D=26$ – marka D; $E_{eO}^I=29$ - marka I.

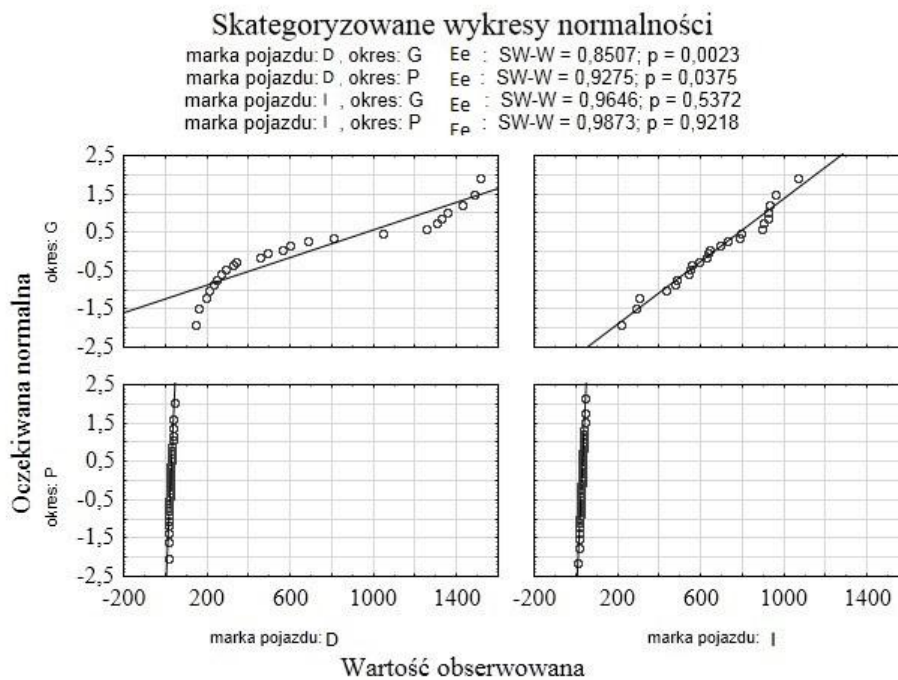
W celu porównania przeprowadzono analogiczne obliczenia przy założeniu podziału okresu użytkowania na okres gwarancyjny (G) i pogwarancyjny (P) (tabela 5) oraz przy założeniu podziału „standaryzowanego” obejmującego jednakowo dla obu marek pojazdów: etap ujednolicony pierwszy – pierwsze 36 miesięcy użytkowania oraz etap ujednolicony drugi – pozostałe 36 miesięcy użytkowania (tabela 6).

Analizując wyniki oceny statystycznej podane w tabelach 4,5,6 należy zauważyć, że przy optymalnym podziale okresu użytkowania na etapy według kryterium stabilnego poziomu efektywności eksploatacyjnej współczynnik zmienności (OPE) wyniósł $v_D(n_x)=0,358$ dla marki D oraz $v_I(n_x)= 0,358$ dla marki I, podczas gdy w przypadku podziału na okres gwarancyjny i

pogwarancyjny otrzymano odpowiednio $v_D=1,439$ i $v_I=1,128$, a w przypadku podziału „standaryzowanego” $v_D=1,498$ i $v_I=0,369$.

4.5. Ocena statystyczna istotności różnic średnich wartości efektywności eksploatacyjnej

Przeprowadzono jednoczynnikową analizę wariancji z podziałem na okres gwarancyjny i pogwarancyjny oraz z podziałem na okres pełnej przydatności eksploatacyjnej (PPE) i ograniczonej przydatności eksploatacyjnej (OPE). Czynnikiem klasyfikującym była „marka pojazdu”, natomiast zmienną zależną (objaśnianą) była efektywność eksploatacyjna.



Rys. 5. Skategoryzowane wykresy normalności zmiennej zależnej – efektywność eksploatacyjna autobusów marki D i I w okresie gwarancyjnym (G) i pogwarancyjnym (P)

Tab. 7. Wyniki testu ANOVA rang Kruskala-Wallisa dla czynnika „marka pojazdu” w okresie gwarancyjnym

zależna: pozycja	ANOVA rang Kruskala-Wallisa; efektywność eksploatacji			
	Zmienna niezależna (grupująca): marka pojazdu			
	Test Kruskala-Wallisa: $H(1, N=48)=0,3099490$; $p=0,5777$			
	kod	N ważnych	suma rang	średnia ranga
D	101	24	561,0	23,375
I	102	24	615,0	25,625
N – liczba wszystkich ważnych obserwacji, 1 – liczba stopni swobody asymptotycznego rozkładu χ^2 statystyki H, H – wartość statystyki testu Kruskala-Wallisa, p – poziom prawdopodobieństwa				

Uznano, że rozpatrywane zmienne są mierzalne i niezależne. W analizowanych zbiorach sprawdzono zgodność danych z rozkładem normalnym. Wyznaczono wykresy normalności dla każdej z grup (marek autobusów). Wyniki testu zgodności W Shapiro – Wilka przedstawiono na rysunku 5. W teście stwierdzono, że poziom istotności spełniał warunek zgodności $p > \alpha = 0,05$ tylko w przypadku autobusów I. Natomiast w przypadku autobusów D odrzucono hipotezę o normalności rozkładów.

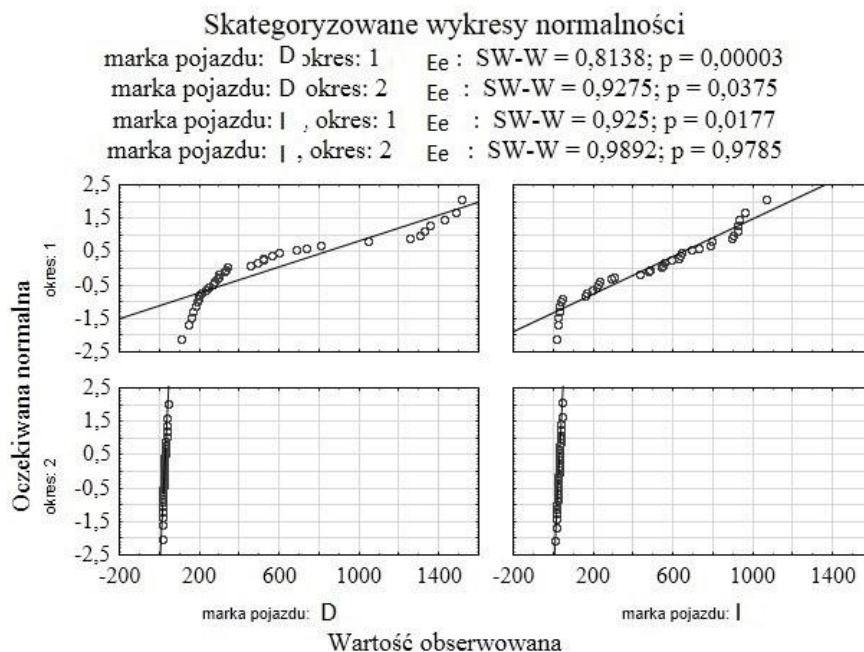
Do sprawdzenia porównywalności średnich zastosowano test Kruskala-Wallisa w przedziałach gwarancyjnym (G) i pogwarancyjnym (P). W okresie gwarancyjnym w teście Kruskala-Wallisa (tab. 7) poziom istotności wynosi 0,5777 i jest większy niż 0,05, zatem nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej.

Następnie przeprowadzono analizę wariancji dla czynnika „marka pojazdu” w okresie pogwarancyjnym. Wyniki testów Kruskala-Wallisa przedstawiono w tabeli 8. Poziom istotności wynosił tu 0,1233 i był większy niż 0,05. Uznano zatem, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej o równości wartości średnich.

Tab. 8. Wyniki testu ANOVA rang Kruskala-Wallisa zmiennej zależnej – efektywność eksploatacji dla czynnika „marka pojazdu” w okresie pogwarancyjnym

zależna: pozycja	ANOVA rang Kruskala-Wallisa; Efektywność eksploatacji			
	Zmienna niezależna (grupująca): marka pojazdu			
Test Kruskala-Wallisa: $H(1, N=72)=2,3746; p=0,1233$				
	kod	N ważnych	suma rang	średnia ranga
D	101	31	996,0	32,129
I	102	41	1632,0	39,805

N – liczba wszystkich ważnych obserwacji, 1 – liczba stopni swobody asymptotycznego rozkładu χ^2 statystyki H, H – wartość statystyki testu Kruskala-Wallisa, p – poziom prawdopodobieństwa



Rys. 6. Skategoryzowane wykresy normalności zmiennej zależnej – efektywność eksploatacji dla autobusów marki D i I w okresie pełnej przydatności eksploatacyjnej (1) oraz ograniczonej przydatności eksploatacyjnej (2)

W kolejności przeprowadzono jednoczynnikową analizę wariancji z podziałem na okres pełnej przydatności eksploatacyjnej (PPE) i okres ograniczonej przydatności eksploatacyjnej (OPE). Czynnikiem klasyfikującym była „marka pojazdu”, natomiast zmienną zależną była efektywność eksploatacyjna.

Stwierdzono, że założenia niezależności zmiennych oraz mierzalności zostały spełnione. Normalność rozkładu zmiennych sprawdzono, tworząc skategoryzowane wykresy normalności dla każdej z marek pojazdu (rys. 6). Porównując wartości średnie efektywności w teście W Shapiro – Wilka stwierdzono, że poziom istotności w trzech przypadkach jest mniejszy od założonego, $p < \alpha = 0,05$ (oprócz autobusów I w okresie OPE). Dlatego odrzucono hipotezę zerową o jednorodności wariancji. Zastosowano natomiast nieparametryczny test Kruskala-Wallisa. Wyniki testu dla okresu PPE przedstawiono w tabeli 9, a dla okresu OPE w tabeli 10. Dla obu marek pojazdów w okresie pełnej zdadności eksploatacyjnej poziom istotności p spełniał nierówność $p > \alpha = 0,05$. Stwierdzono zatem, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o równości wartości średnich. Zatem można uznać, że w okresie pełnej przydatności eksploatacyjnej (PPE) średnia efektywność eksploatacji autobusów obu marek nie różni się istotnie.

Tab. 91. Wyniki testu ANOVA rang Kruskala-Wallisa zmiennej zależnej – efektywność eksploatacji dla czynnika „marka pojazdu” w okresie pełnej przydatności eksploatacyjnej (PPE)

zależna: pozycja	ANOVA rang Kruskala-Wallisa; efektywność eksploatacji Zmienna niezależna (grupująca): marka Test Kruskala-Wallisa: $H(1, N=72)=0,3171$; $p=0,5734$			
	kod	N ważnych	suma rang	średnia ranga
D	102	36	1264,000	35,11111
I	101	36	1364,000	37,88889

N – liczba wszystkich ważnych obserwacji, 1 – liczba stopni swobody asymptotycznego rozkładu χ^2 statystyki H, H – wartość statystyki testu Kruskala-Wallisa, p – poziom prawdopodobieństwa

Tab. 10. Wyniki testu ANOVA rang Kruskala-Wallisa zmiennej zależnej – efektywność eksploatacji dla czynnika „marka pojazdu” w okresie ograniczonej przydatności eksploatacyjnej (OPE)

zależna: pozycja	ANOVA rang Kruskala-Wallisa; efektywność eksploatacji Zmienna niezależna (grupująca): marka Test Kruskala-Wallisa: $H(1, N=65)=1,589$; $p=0,2074$			
	kod	N ważnych	suma rang	średnia ranga
D	102	34	1218,0	35,824
I	101	31	927,0	29,903

N – liczba wszystkich ważnych obserwacji, 1 – liczba stopni swobody asymptotycznego rozkładu χ^2 statystyki H, H – wartość statystyki testu Kruskala-Wallisa, p – poziom prawdopodobieństwa

Wyniki testów Kruskala-Wallisa w okresie OPE przedstawione w tabeli 10 wskazują, że poziom istotności wynosi 0,2074 i jest większy niż 0,05. Zatem nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej o równości wartości średnich i można stwierdzić, że marka pojazdu nie

wpływa istotnie na średnią efektywność eksploatacji w okresie ograniczonej przydatności eksploatacyjnych.

Kolejny etap analizy wariancji przeprowadzono dla czynnika „okres eksploatacji” - PPE i OPE. Zmienną zależną była efektywność eksploatacji dla dwóch analizowanych marek autobusów.

Tab. 11. Wyniki testu ANOVA rang Kruskala-Wallisa zmiennej zależnej – efektywność eksploatacji dla czynnika okres pełnej przydatności eksploatacyjnej (PPE) i ograniczonej przydatności eksploatacyjnej (OPE) autobusów D

zależna: pozycja	ANOVA rang Kruskala-Wallisa; Efektywność eksploatacji Zmienna niezależna (grupująca): PPE i OPE Test Kruskala-Wallisa: $H(1, N=67)=49,235$; $p=0,000$			
	kod	N ważnych	suma rang	średnia ranga
PPE	1	36	1782,000	49,50000
OPE	2	31	496,000	16,00000

N – liczba wszystkich ważnych obserwacji, 1 – liczba stopni swobody asymptotycznego rozkładu χ^2 statystyki H, H – wartość statystyki testu Kruskala-Wallisa, p – poziom prawdopodobieństwa

W teście Kruskala-Wallisa poziom istotności dla autobusów D wynosi 0,000 i jest mniejszy niż 0,05 (tabela 11). Zatem odrzucono hipotezę zerową o równości wartości średnich. Okresy eksploatacji różnią się pod względem średniej efektywności eksploatacyjnej.

Tab. 122. Wyniki testu ANOVA rang Kruskala-Wallisa zmiennej zależnej – efektywność eksploatacji dla czynnika „okres eksploatacji” pełnej przydatności eksploatacyjnej (PPE) i ograniczonej przydatności eksploatacyjnej (OPE) autobusów I

zależna: pozycja	ANOVA rang Kruskala-Wallisa; Efektywność eksploatacji Zmienna niezależna (grupująca): PPE i OPE Test Kruskala-Wallisa: $H(1, N=70)=36,766$; $p=0,000$			
	kod	N ważnych	suma rang	średnia ranga
PPE	1	36	1794,000	49,83333
OPE	2	34	691,000	20,32353

N – liczba wszystkich ważnych obserwacji, 1 – liczba stopni swobody asymptotycznego rozkładu χ^2 statystyki H, H – wartość statystyki testu Kruskala-Wallisa, p – poziom prawdopodobieństwa

W teście Kruskala-Wallisa poziom istotności dla autobusów I wynosi 0,000 i jest mniejszy niż 0,05 (tabela 12). Zatem odrzucono hipotezę zerową o równości wartości średnich. Przeprowadzona analiza statystyczna wskazuje, że w każdym z rozpatrywanych okresów użytkowania: PPE i OPE, a także gwarancyjnym (G) i pogwarancyjnym (P) wartości średnie efektywności obu badanych marek autobusów nie różnią się istotnie. Natomiast każda z marek ma istotnie różną efektywność w okresie ograniczonej przydatności eksploatacyjnej (OPE) w porównaniu do okresu pełnej przydatności eksploatacyjnej (PPE).

5. Wnioski

Na podstawie badań doświadczalnych dotyczących efektywności eksploatacyjnej autobusów miejskich, sformułowano następujące wnioski:

1. Jeżeli za kryterium oceny autobusów przyjmie się ich efektywność eksploatacyjną wówczas w całkowitym okresie użytkowania badanych autobusów można wyróżnić dwa odmienne etapy stanu ich przydatności eksploatacyjnej: etap pełnej przydatności oraz etap ograniczonej przydatności eksploatacyjnej.
2. Kryterium podziału czasu użytkowania na etapy wynika ze skokowej zmiany średniej efektywności eksploatacyjnej pojazdu zdefiniowanej jako stosunek prognozowanych przychodów (wynikających z gotowości technicznej i stawki przewozowej) do kosztów napraw związanych ze zużyciem części pojazdu. Etap pełnej przydatności eksploatacyjnej wyróżnia się wysoką gotowością techniczną, niskimi kosztami napraw oraz względnie wysoką efektywnością eksploatacyjną pojazdu. Etap ograniczonej przydatności eksploatacyjnej charakteryzuje się zwiększonymi kosztami napraw i zmniejszoną, ale stabilną efektywnością eksploatacyjną pojazdu.
3. Wykazano, że prawidłowość podziału czasu użytkowania na okresy różnej przydatności eksploatacyjnej powtarza się w obu przypadkach badanych marek autobusów, natomiast istnieją między markami różnice dotyczące długości tych etapów.
4. Wykazano, że w sensie statystycznym efektywność eksploatacyjna obydwu badanych marek nie różni się istotnie zarówno w okresie pełnej przydatności eksploatacyjnej, jak i w okresie ograniczonej przydatności eksploatacyjnej. Podobnie zauważa się brak różnicy wartości średnich efektywności między markami w okresie gwarancyjnym i pogwarancyjnym.
5. Przedstawiony w artykule wskaźnik efektywności eksploatacyjnej pojazdu może być wykorzystany jako kryterium doboru racjonalnego okresu użytkowania autobusów.
6. Przedstawiony w artykule wskaźnik efektywności może być zastosowany w odniesieniu do innych użytkowych pojazdów samochodowych, a także w odniesieniu do samochodów osobowych.

Bibliografia

1. Andrzejczak K. Metody prognozowania w modelowaniu eksploatacji środków transportu. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2013.
2. Ayadi A, Hammami S. An analysis of the performance of public bus transport in Tunisian cities. *Transportation Research Part A* 2015; 75: 51–60.
3. Baaren RJ, Curran R. How to improve operational availability and cost effectiveness using a pragmatic RAMS value driven design effort - A military helicopter case study. *Proceedings of the Third International Air Transport and Operations Symposium 2012*; 27–35.
4. Bentkowska-Senator K, Kordel Z, Gis W, Waśkiewicz J, Balke I, Pawlak P. *Polski transport samochodowy ładunków*. Warszawa: Instytut Transportu Samochodowego, 2016.

5. Boyer KK, Pagell M. Measurement issues in empirical research: improving measures of operations strategy and advanced manufacturing technology. *Journal of Operations Management* 2000; 18: 361–374.
6. Chen X, Yu L, Zhang Y, Guo J. Analyzing urban bus service reliability at the stop, route, and network levels. *Transportation Research Part A* 2009; 43: 722–734.
7. Chen X, Lei X, Zhang X, Xiao W, Li J. An integrated model of production scheduling and maintenance planning under imperfect preventive maintenance. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2015; 17(1): 70–79.
8. Daraio C, Diana M, Di Costa F, Leporelli C, Matteucci G, Nastasi A. Efficiency and effectiveness in the urban public transport sector: A critical review with directions for future research. *European Journal of Operational Research* 2016; 248: 1–20.
9. Ignaciuk P, Rymarz J, Niewczas A. Effectiveness of the failure rate on maintenance costs of the city buses. *Journal of Konbin* 2015; 3(35): 99–108.
10. Nelson JD, Mulley C. The impact of the application of new technology on public transport service provision and the passenger experience: A focus on implementation in Australia. *Research in Transportation Economics* 2013; 39: 300–308.
11. Rymarz J. Badania efektywności eksploatacyjnej autobusów komunikacji miejskiej. Rozprawa doktorska, Politechnika Lubelska, 2015.
12. Rymarz J, Niewczas A, Krzyżak A. Comparison of operational availability of public city buses by analysis of variance. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2016; 3(18): 373–378.
13. Rymarz J, Niewczas A, Pieniak D. Reliability analysis of the selected brands of city buses at municipal transport company. *Journal of Konbin* 2013; 26(1): 111–122.
14. Selech J, Kurczewski P. Life Cycle Costing (LCC) jako nowoczesny model zarządzania kosztami cyklu życia na przykładzie obiektów technicznych. *Problemy eksploatacji. Maintenance problems* 2012; 1(84): 99-108.
15. Świdorski A, Józwiak A, Jachimowski R. Operational quality measures of vehicles applied for the transport services evaluation using artificial neural networks. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2018; 20(2): 292–299.
16. Veeneman W, Wilschut J, Urlings T, Blank J. Efficient frontier analysis of Dutch public transport tendering: A first analysis. *Research in Transportation Economics* 2014; 48: 101–108.
17. Wu F, Niknam SA, Kobza JE. A cost effective degradation-based maintenance strategy under imperfect repair. *Reliability Engineering and System Safety* 144: 234–243.
18. Yatskiv I, Pticina I, Savrasovs M. Urban public transport system's reliability estimation using microscopic simulation. *Transport and Telecommunication* 2012; 13(3): 219–228.