

Andrzej NIEWCZAS¹, Łukasz MÓRAWSKI¹, Ewa DĘBICKA¹,
Joanna RYMARZ²

¹*Motor Transport Institute (Instytut Transportu Samochodowego)*

²*Lublin University of Technology (Politechnika Lubelska)*

PREDICTING COSTS OF CITY BUSES' INCAPACITY RISK

Prognozowanie kosztów ryzyka niezdatności autobusów miejskich

Abstract: *The paper describes operational efficiency research of city buses from two manufacturers during the 6 years of operation under real conditions. The presented operational efficiency assessment model includes unplanned incidental repairs costs, downtime costs, as well as the likelihood of losing customer-passenger's trust. The results of the efficiency calculations were used to estimate the expected costs of buses' incapacity risk. It has been demonstrated that the operational efficiency and incapacity risk costs can be a criterion for the optimal period of operation, as well as the criterion of comparison of bus makes in a transport company.*

Keywords: reliability, public transport, operational efficiency

Streszczenie: *W pracy opisano badania efektywności eksploatacyjnej autobusów miejskich dwóch producentów w czasie sześciu lat użytkowania w warunkach rzeczywistych. Prezentowany model oceny efektywności uwzględnia koszty napraw nieplanowanych, koszty przestoju, a także prawdopodobieństwo utraty zaufania klienta – pasażera. Wyniki obliczeń efektywności wykorzystano do oszacowania przewidywanych kosztów ryzyka niezdatności autobusów. Wykazano, że efektywność eksploatacyjna i koszty ryzyka niezdatności mogą stanowić kryterium optymalnego okresu eksploatacji, jak również kryterium porównania marek autobusów w przedsiębiorstwie transportowym.*

Słowa kluczowe: niezawodność, transport publiczny, efektywność eksploatacyjna

1. Introduction

Along with the development of urban agglomerations, the requirements and expectations of residents in relation to the city's infrastructure, also increase. This development leads to increase the living standards of the inhabitants, but on the other hand to an increase in costs of living. The resultant effect of these phenomena is the so-called suburbanisation, or the migration of people from cities to suburban areas [3]. This leads to the separation of the "strict" city (centre), with the headquarters of the workplaces and the suburban area where the housing estates are located. In such an urbanization model, the functioning of well-coordinated public transport fulfilling high quality and quantity requirements of travellers, is of great significance. In quality terms these requirements are understood as high reliability of transport means, punctuality and safety of the transport. In quantity terms, it is first and foremost the right number of transport means, adequate to the extensive transport network.

In the situation of dynamic development of large urban agglomerations, it is a challenge to the urban transport companies, to expect high quality transport with acceptable investment and operating costs. The quality of transport performed is strongly dependent on the reliability of the vehicles used. The high level of reliability determines high operational efficiency and punctuality of transport as well as maintaining steady level of customers – passengers' confidence.

However, ensuring high reliability of vehicles and maintaining it in the planned period of operation is a difficult task. Therefore, each urban transport system should take into account business continuity safeguards related to the risk of the incapacity of the vehicles fleet owned. This risk is generated already at the stage of purchasing transport means. It is also the basis for predicting operating costs [1, 4, 5].

In this article, using the proprietary operational efficiency evaluation model and a database of incidental defects and repairs from the period of 6 years in relation to the group of city buses of two makes - domestic and imported, the expected costs of their incapacity risk were determined. In addition to the costs of unplanned repairs, the costs of lost revenue during the forced buses' downtime, were also included in the calculations, as well as costs related to the probable risk of losing customer's confidence.

2. The course of research

The research used data collected at a selected public transport company operating in one of the largest cities in Poland. For comparative purposes, the focus

was on buses of two manufacturers, which for the purposes of this article were marked as follows: D - domestic, I - imported. In order to meet the homogeneity conditions of the statistical test, the vehicles from one production lot of each make were used for the trials. Buses were operated under the same road and climatic conditions. Samples of 20 D buses and 22 in the case of the I manufacturer, were put into operation at a similar calendar time. The follow-up period was 72 months (6 years). During that time, buses carried out regular passenger transport serving in rotation the scheduled public transport routes [8].

In table 1 there are technical and operational indicators for buses of both makes, and in table 2 collective operational intensity indicators are presented. It was adopted, in accordance with the applicable legal regulations, that the annual depreciation of vehicles is 10% of the purchase price of the bus and is constant over the entire period of operation.

Table 1

Essential technical and operational parameters of buses

Parameters	D	I
General characteristics	two-axle, single-deck, low-floor	
Type-approval category	M3	
Class	I (city), MAXI (vehicles 10,5-13 m long)	
Number of seats	29	27
Number of standing places	74	78
Engine type	compression ignition	
Engine capacity [cm ³]	9186	7201
Engine max. power [kW]	188	210
Curb weight [kg]	10900	10860
Permissible total weight [kg]	18000	
Purchase cost [thousand of PLN]	750	830

Table 2

Operational intensity indicators [8]

Indicator	D	I
Samples count [pieces]	20	22
Test time n [months]	72	
Average mileage in the period	438,30	417,94
Of 72 months [thousand of km]	6,09	6,46
Average monthly mileage [thousand of km]	75	83
Annual depreciation [thousand of PLN]	6,25	6,92

To calculate the operational efficiency, the proprietary modification of the operational efficiency model presented in [2] was used. The equation describing the model improved in this paper is expressed by the formula:

$$W_e = \frac{1}{\left(\frac{N_u}{A_z}\right) + (1 - K_g) + F(t_k)} \quad (1)$$

where:

N_u – cumulative cost of incidental repairs in the time interval (0, t_k),

A_z – amount of depreciation up to the moment t_k ,

K_g – technical readiness coefficient in the k -th interval of operation,

$F(t_k)$ – Weibull distribution of time till the first defect,

t_k – the upper end of the k -th time interval of operation (k -th interval of operation).

The model assumes balancing the threshold (minimum) revenue and vehicle depreciation costs.

Weibull distribution used as a time distribution model till the first defect is described by the formula:

$$F(t_k) = 1 - e^{-\left(\frac{t_k}{a}\right)^b} \quad (2)$$

where:

a – scale parameter,

b – shape parameter.

The scale and shape parameters were calculated based on the defects register of the tested D and I make buses. The calculation results are given in table 3.

Table 3

Durability distribution parameters of the tested buses [7]

Manufacturer	Scale a parameter	Shape b parameter
D	87,9 x 10 ³	0,955
I	80,5 x 10 ³	0,819

The above-mentioned equation of the operational efficiency indicator (1) allows to determine the costs of incapacity risk, the general formula of which is defined as follows:

$$K_e = N_u + R_b + R_p \quad (3)$$

The components in formula (3) express the costs of risk related to maintaining the serviceability of the vehicle affected by the unscheduled repairs – N_u , costs of risk related to the loss of revenue during vehicle downtime in the operational period t_k – R_b , costs of the risk of losing customer – passenger's confidence caused by the vehicle's incapacity – R_p . The full equation (3) is expressed by the formula:

$$K_e = \sum_{k=1}^n N_u(t_k) + \sum_{k=1}^n [\Delta A_z (1 - K_g(t_k))] + A_z * 0,2F(t_k) \quad (4)$$

where:

$N_u(t_k)$ – costs of unplanned repairs in the k -th interval of operation,

ΔA_z – depreciation amount calculated in conversion to the average monthly mileage of the bus,

$K_g(t_k)$ – technical readiness factor in the k -th interval of the operation.

The model does not take into account planned costs. In particular, the costs of fuel, urea costs (Adblue), costs of planned technical services, personnel costs, insurance costs, taxes, other material costs were not taken into account. The risk of the loss of confidence expressed as the last component of the sum in the equations (3) and (4) contains an additional factor of 0.2, which assumes that only every fifth passenger (20%) will give up public transport due to repeated incapacity of buses and resulting lack of punctuality of services [9].

3. Research results

The efficiency indicator W_e calculated from the equation (1), depending on the operational mileage, is shown in fig. 1. The calculations were made in relation to the average monthly mileage. The graph shows a progressive decrease in the efficiency indicator along with the increasing time of use for the buses of both makes. Considering the entire observation period, the average value of the indicator for the D make is 1.181, and for the I make it is at the level of 1.228.

In order to more accurately compare vehicle makes with each other, taking into account their operational wear and tear, the total observation period has been divided into two specific periods. In the first place into a warranty period (0-2 years) and a post-warranty period (3-6 years) (fig. 2). The values of the efficiency indicator in these both periods are compared for both makes, in particular during the post-warranty period. It is important that after the warranty period, the average

value of the efficiency indicator in the remaining period of operation is two times lower. A detailed analysis of the costs of unplanned repairs allows to conclude that a more appropriate division is the period of full operational usefulness (in short FOU) and limited operational usefulness (LOU) [6]. The table 4 shows time ranges of operation on a monthly basis, based on which the limits of FOU and LOU periods for both makes were defined.

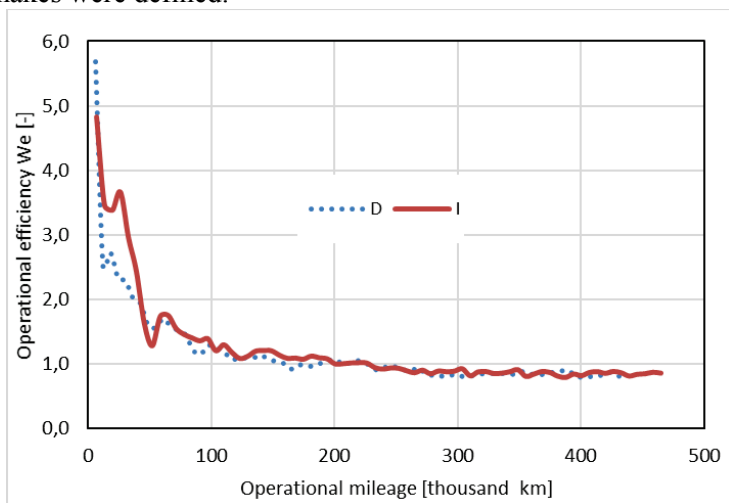


Fig. 1. Operational efficiency indicator W_e as a function of the operating mileage for the total period of observation

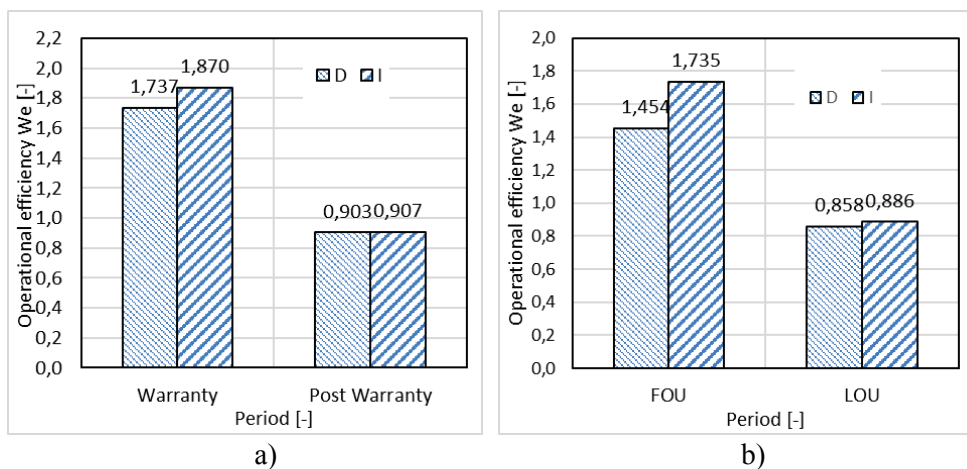


Fig. 2. Average value of the operational efficiency indicator during the warranty and post-warranty period (a) and full operational usefulness and limited usefulness (b)

Table 4

Breakdown into FOU and LOU periods

Period	D	I
FOU [mth]	0 – 36	0 – 29
LOU [mth]	37 – 72	30 – 72

For FOU and LOU periods, statistical comparison of mean values using variance analysis method was carried out. The Shapiro-Wilk's and one-way variance analysis tests were used. The descriptive statistics are presented in table 5.

The structure of risk costs calculated according to the equation (5) for the D and I makes is presented in figures 3 and 4. In order to increase clarity, additional lines were added with the auxiliary axis defining the percentage share of costs.

Table 5

The values of descriptive statistics of operational efficiency for both brands in different periods of bus use

Period	D / I			
	lower quartile	median	upper quartile	standard deviation
Warranty	1,151/1,201	1,491/1,394	1,960/1,923	0,954/1,002
Post-warranty	0,836/0,85	0,880/0,877	0,972/0,936	0,081/0,087
FOU	0,823/1,132	1,101/1,294	0,307/1,731	0,830/0,958
LOU	0,821/0,846	0,848/0,875	0,881/0,912	0,045/0,064
Total	0,852/0,865	0,973/0,937	1,146/1,201	0,680/0,739

In the initial period, the greatest risk is R_b downtime, about 80-90% of costs. The risk costs associated with the possible loss of customer's confidence R_p have steadily been growing since the beginning of the operation. At the bus's mileage of about 55 thousand km for the D make the R_p costs are beginning to dominate in the total costs and this trend it is maintained during the entire further period of operation. A similar situation takes place in the case of the I make, but the characteristic increase in the cost of losing the customer's confidence occurs at the mileage of approx. 70 thousand km. The maximum share of the costs of risk of losing customer's confidence for the D make was 59.6%, and for the I make it was 64.0%.

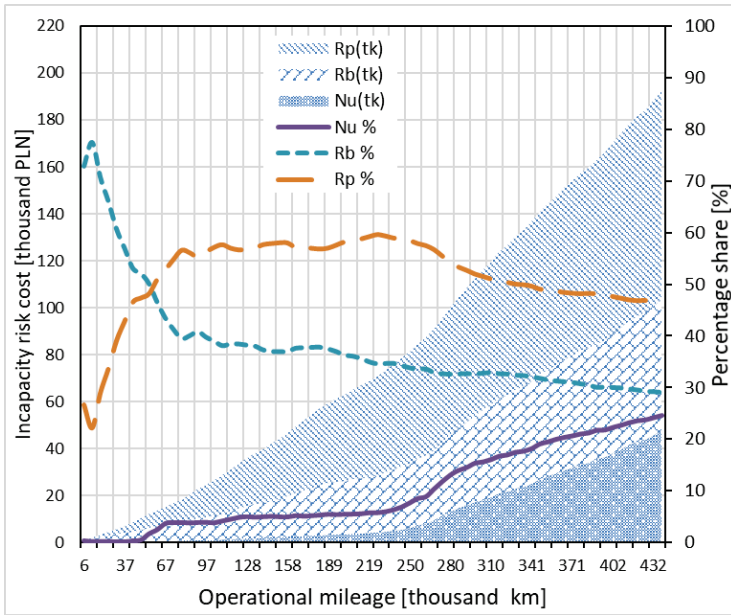


Fig. 3. Structure of the incapacity risk costs and percentage shares of the costs components for the D make

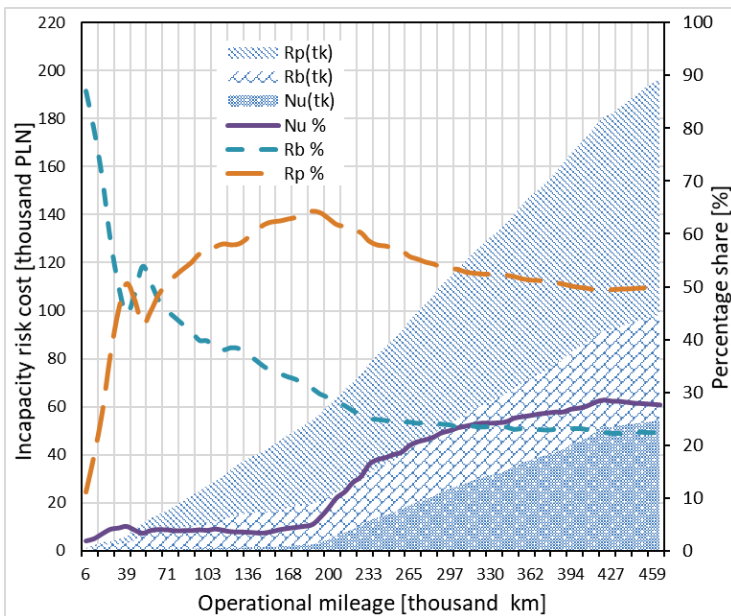


Fig. 4. Structure of the incapacity risk costs and percentage shares of the costs components for the I make

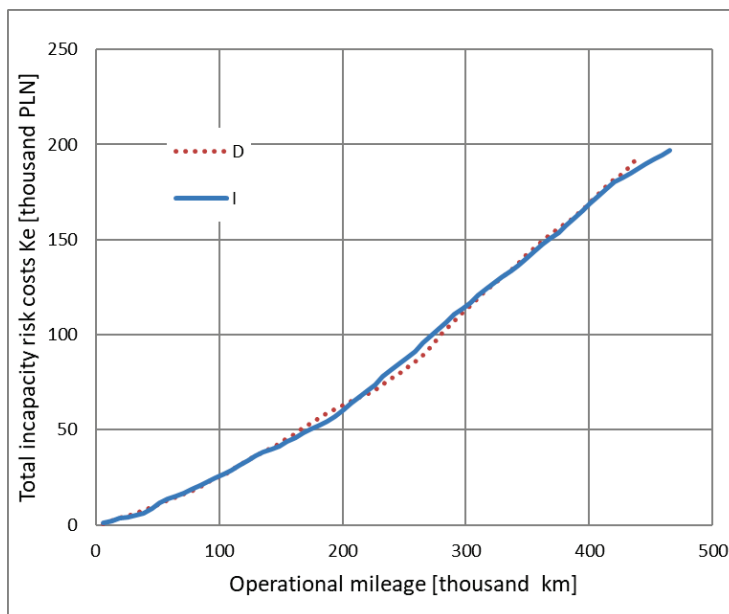


Fig. 5. Total costs of incapacity risk for both manufacturers of D and I buses

An important difference between the two makes is the moment when vehicles start to generate increased costs of unplanned repairs. This can be ascertained based on the analysis of the course of N_u repair costs and the costs R_p of the risk of losing trust. For the D make, this moment falls on the operating mileage of approx. 260 thousand km, for the I make it is about 200,000 km. The cumulated costs for both makes of vehicles in the period of operation are comparable (fig. 5). Vehicles of the D and I makes generate relatively low incidental repair costs in the FOU period (figs. 6, 7). At the end of the full operational usefulness period, it is 5.8% for the D make and 4.6% for the I one respectively. The share of downtime risk related costs also has a similar course for both bus makes and decreases with the increase in the operating time, reaching the share values of 30-35%, while the costs of risk are different and amount to approx. 24 thousand. PLN for the D make and approx. 17,000 for I one. For the D make, costs of the risk of losing confidence at the end of the FOU period constitute about 60% of total costs, and in the case of the I make it is about 65%.

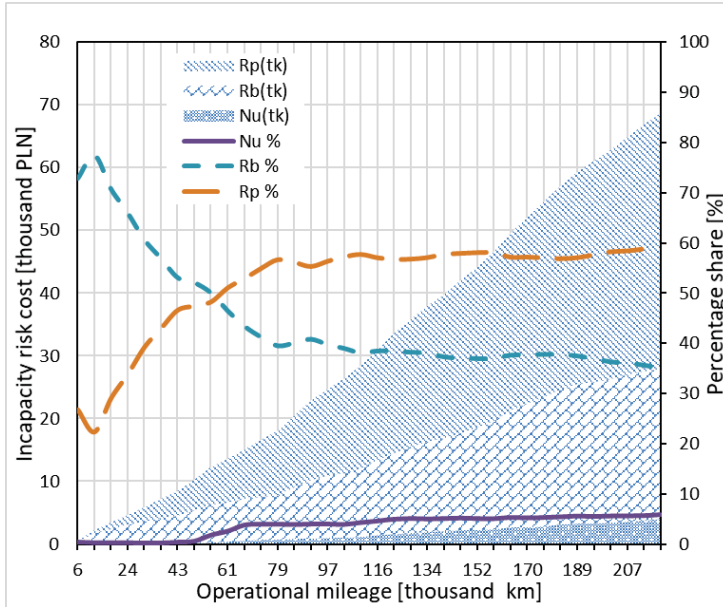


Fig. 6. Structure of the incapacity risk costs and percentage shares of the costs components for the D make in the FOU period

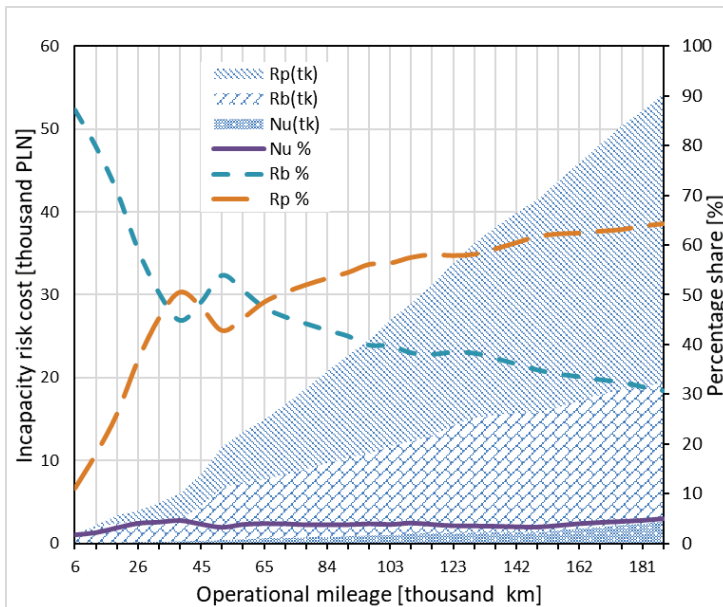


Fig. 7. Structure of the incapacity risk costs and percentage shares of the costs components for the I make in the FOU period

4. Discussion on the results

The results of the operational efficiency calculations obtained allow to conclude that the highest efficiency of buses (over 1) occurs in the first period of 150 thousand km for both makes (fig. 1). The values of operational efficiency are comparable for both examined makes both in the warranty and post-warranty periods (fig. 2a). This may indicate a very similar bus life cycle design model used by both manufacturers. However, the difference in the purchase price of each bus - 80 thousand PLN (table 1), should be noted. High reliability and thus high operational efficiency during the warranty period is particularly important from the manufacturer's point of view, because during this period the manufacturer covers the costs of repairs. However, regardless of the manufacturer, the user (transport company) is burdened with the costs of unplanned downtime and loss of customer confidence. The most favourable situation for the company would be a situation in which the warranty period would be matched to the reliability limit of the operating time. In most cases, however, it is economically unprofitable.

The presented paper introduces a new division of the predicted operational time into the period of full operational usefulness (FOU), determined by low costs of unplanned repairs while maintaining a high operational efficiency indicator and into the limited operational usefulness (LOU), in which vehicle's wear defects occur, generating the need for repairs.

The determined efficiency indicator in the FOU period for both vehicle makes indicates a difference of 0.281. However, the difference in efficiency of both makes in the LOU period is only 0.028.

The factor that distinguishes the presented model of operational efficiency assessment is the inclusion of risk costs due to the loss of customer confidence. As shown, these costs can have a significant share in the total costs.

5. Conclusions

1. An extended assessment of the expected operational efficiency of buses should include the costs of the risk of losing passengers (users) confidence. These costs are a significant component of the total costs of the bus reliability.
2. Characteristics of the course of individual components of vehicles' incapacity risk as a function of operating time is the basis for defining the boundary between the periods of their full operational usefulness (FOU) and limited operational usefulness (LOU). This can be used to determine the optimal time

of their operation or to compare vehicle makes from the point of view of operational potential.

6. References

1. Andrzejczak K.: Metody prognozowania w modelu eksploatacyjnym środków transportu. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2013.
2. Dmowski A.: Model oceny efektywności eksploatacyjnej samochodu ciężarowego w warunkach wynajmu długoterminowego przy uwzględnieniu wskaźników niezawodnościowych. Rozprawa doktorska, Instytut Lotnictwa, 2017.
3. Gawron H.: Rozwój aglomeracji miejskich i ich znaczenie dla rozwoju lokalnego rynku nieruchomości. Zarządzanie i Finanse, 4(12)/2014.
4. Kulińska E.: Model parametryzacji kosztów ryzyka w procesie transportu. Logistyka, 6/2013.
5. Michalski R., Wierzbicki S.: Comparative reliability tests of city transport busses. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, 4(32)/2006.
6. Niewczas A., Rymarz J., Dębicka E.: Stages of operating vehicles with respect to operational efficiency using city buses as an example. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, 21(1)/2019, DOI 10.17531/ein.2019.1.3.
7. Niewczas A., Rymarz J., Pieniak D.: Porównawcza analiza niezawodności komunikacji miejskiej. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport, 101/2014.
8. Rymarz J., Badania efektywności eksploatacyjnej autobusów komunikacji miejskiej. Rozprawa doktorska, Politechnika Lubelska, Lublin 2015.
9. Zwierzchowska M.: Ocena jakości usług komunikacji miejskiej – dobór zmiennych do badania metodą delficką. Autobusy, 5/2018.

PROGNOZOWANIE KOSZTÓW RYZYKA NIEZDATNOŚCI AUTOBUSÓW MIEJSKICH

1. Wprowadzenie

Wraz z rozwojem aglomeracji miejskich, rosną także wymagania i oczekiwania mieszkańców w stosunku do infrastruktury miasta. Rozwój ten prowadzi do wzrostu poziomu życia mieszkańców, lecz z drugiej strony do wzrostu kosztów utrzymania. Wypadkowym skutkiem tych zjawisk jest tzw. suburbanizacja, czyli migracja ludności z miast na tereny podmiejskie [3]. Prowadzi to do wyodrębnienia strefy „ścisłego” miasta (centrum), gdzie skoncentrowane są siedziby zakładów pracy, i strefy podmiejskiej, gdzie zlokalizowane są osiedla mieszkalne. W takim modelu urbanizacji duże znaczenie ma funkcjonowanie dobrze skoordynowanego transportu publicznego, spełniającego wysokie wymagania jakościowe i ilościowe podróżujących. Pod względem jakościowym wymagania te rozumiane są jako duża niezawodność środków transportowych, punktualność i bezpieczeństwo przewozów. Pod względem ilościowym to przede wszystkim właściwa liczba środków transportowych, adekwatna do rozbudowanej sieci komunikacyjnej.

W sytuacji dynamicznego rozwoju dużych aglomeracji miejskich, wyzwaniem stawia się wobec miejskich przedsiębiorstw transportowych, oczekując zapewnienia wysokiej jakości przewozów przy akceptowalnych kosztach inwestycyjnych i eksploatacyjnych. Jakość realizowanych przewozów jest silnie uzależniona od niezawodności użytkowanych pojazdów. Wysoki poziom niezawodności warunkuje wysoką efektywność eksploatacyjną oraz terminowość przewozów i utrzymanie stabilnego zaufania klientów – pasażerów.

Zapewnienie wysokiej niezawodności pojazdów i jej utrzymanie w zaplanowanym okresie eksploatacji jest trudnym zadaniem. Dlatego każdy system transportu miejskiego powinien uwzględniać zabezpieczenia ciągłości działania związane z ryzykiem niezdatności posiadanej floty pojazdów. Ryzyko to jest generowane już na etapie zakupu środków transportowych. Jest ono również podstawą prognozowania kosztów eksploatacji [1, 4, 5].

W niniejszym artykule, wykorzystując autorski model oceny efektywności eksploatacyjnej oraz bazę danych o uszkodzeniach i naprawach incydentalnych

z okresu sześciu lat w odniesieniu do grupy autobusów miejskich dwóch marek – krajowej i importowanej, określono przewidywane koszty ryzyka ich niezdatności. W obliczeniach poza kosztami napraw nieplanowanych, uwzględniono również koszty związane z utraconym przychodem w czasie wymuszonego przestoju autobusów, a także koszty związane z prawdopodobnym ryzykiem utraty zaufania klienta.

2. Przebieg badań

W badaniach wykorzystano dane zebrane w wybranym przedsiębiorstwie komunikacji miejskiej działającym na terenie jednego z większych miast w Polsce. W celach porównawczych skupiono się na autobusach dwóch producentów, które na potrzeby niniejszego artykułu zostały oznaczone następująco: D – producent krajowy, I – producent zagraniczny. Aby spełnić warunki jednorodności próby statystycznej, do badań wykorzystano pojazdy pochodzące z jednej partii produkcyjnej każdej marki. Autobusy były eksploatowane w tych samych warunkach drogowych i klimatycznych. Próbkę autobusów w liczbie 20 marki D i 22 w przypadku marki I były wprowadzone do eksploatacji w zbliżonym czasie kalendarzowym. Okres obserwacji wynosił 72 miesiące (6 lat). W tym czasie autobusy realizowały regularne przewozy pasażerów, obsługując rotacyjnie rozkładowe linie komunikacji miejskiej [8].

W tabeli 1 zamieszczono wskaźniki techniczno-eksploatacyjne autobusów obu marek, a w tabeli 2 przedstawiono zbiorcze wskaźniki intensywności użytkowania. Przyjęto, zgodnie z obowiązującymi regulacjami prawnymi, że roczna amortyzacja pojazdów wynosi 10% ceny zakupu autobusu i jest stała przez cały okres użytkowania.

Tabela 1

Podstawowe wskaźniki techniczno-eksploatacyjne autobusów

Wskaźnik	D	I
Charakterystyka ogólna	dwuosiowy, jednopokładowy, niskopodłogowy	
Kategoria homologacyjna	M3	
Klasa	I (miejski), MAXI (pojazdy o długości 10,5-13 m)	
Liczba miejsc siedzących	29	27
Liczba miejsc stojących	74	78
Rodzaj silnika	zapłon samoczynny	
Pojemność silnika [cm ³]	9186	7201

Moc maks. silnika [kW]	188	210
Masa własna [kg]	10900	10860
Dopuszczalna masa całkowita [kg]	18000	
Koszt zakupu [tys. zł]	750	830

Tabela 2

Wskaźniki intensywności użytkowania [8]

Wskaźnik	D	I
Liczność próby [szt.]	20	22
Czas badania n [msc.]	72	
Średni przebieg w okresie 72 msc. [tys. km]	438,30	417,94
Średni przebieg miesięczny [tys. km]	6,09	6,46
Amortyzacja roczna [tys. zł]	75	83
Amortyzacja miesięczna [tys. zł]	6,25	6,92

Do obliczeń efektywności eksploatacyjnej wykorzystano autorską modyfikację modelu efektywności eksploatacyjnej zaprezentowanego w pracy [2]. Równanie opisujące udoskonalony w niniejszej pracy model wyrażone jest wzorem:

$$W_e = \frac{1}{\left(\frac{N_u}{A_z}\right) + (1 - K_g) + F(t_k)} \quad (1)$$

gdzie:

- N_u – skumulowany koszt napraw incydentalnych w przedziale czasu $(0, t_k)$,
- A_z – kwota amortyzacji do chwili t_k ,
- K_g – współczynnik gotowości technicznej w k -tym przedziale użytkowania,
- $F(t_k)$ – dystrybuanta rozkładu Weibulla czasu do pierwszego uszkodzenia,
- t_k – kres górny k -tego przedziału czasu użytkowania (k -tego przedziału przebiegu).

Model zakłada zrównoważenie przychodu progowego (minimalnego) i kosztów amortyzacji pojazdu.

Dystrybuanta rozkładu Weibulla przyjętego jako model rozkładu czasu do pierwszego uszkodzenia opisana jest wzorem:

$$F(t_k) = 1 - e^{-\left(\frac{t_k}{a}\right)^b} \quad (2)$$

gdzie:

a – parametr skali,

b – parametr kształtu.

Parametry skali i kształtu obliczono na podstawie rejestru uszkodzeń badanych autobusów marki D i marki I. Wyniki obliczeń podano w tabeli 3.

Tabela 3

Parametry rozkładu trwałości badanych autobusów [7]

Producent	Parametr skali a	Parametr kształtu b
D	$87,9 \times 10^3$	0,955
I	$80,5 \times 10^3$	0,819

Przedstawione powyżej równanie wskaźnika efektywności eksploatacyjnej (1) pozwala na określenie kosztów ryzyka niezdatności, którego wzór ogólny określony jest następująco:

$$K_e = N_u + R_b + R_p \quad (3)$$

Składniki we wzorze (3) wyrażają koszty ryzyka związane z utrzymaniem zdadności pojazdu spowodowane nieplanowanymi naprawami – N_u , kosztami ryzyka związanymi z utratą przychodów podczas przestojów pojazdu w okresie eksploatacji t_k – R_b , kosztami ryzyka utraty zaufania klienta – pasażera spowodowane niezdatnością pojazdu – R_p . Forma rozwinięta równania (3) wyraża się wzorem:

$$K_e = \sum_{k=1}^n N_u(t_k) + \sum_{k=1}^n [\Delta A_z (1 - K_g(t_k))] + A_z * 0,2F(t_k) \quad (4)$$

gdzie:

$N_u(t_k)$ – koszty napraw nieplanowanych w k -tym przedziale przebiegu,

ΔA_z – kwota amortyzacji w przeliczeniu na średni miesięczny przebieg autobusu,

$K_g(t_k)$ – współczynnik gotowości technicznej w k -tym przedziale przebiegu.

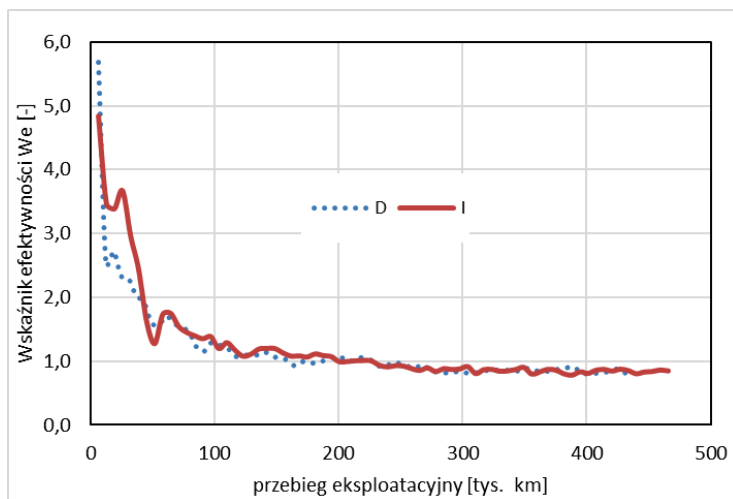
W modelu zrezygnowano z uwzględniania kosztów planowanych. W szczególności nie uwzględniono kosztów: paliwa, mocznika (Adblue), planowanych obsług technicznych, osobowych, ubezpieczeń, podatków, pozostałych kosztów materiałowych. Ryzyko utraty zaufania wyrażone jako ostatni

składnik sumy w równaniach (3) i (4) zawiera dodatkowy współczynnik 0,2 będący założeniem, że jedynie co piąty pasażer (20%) zrezygnuje z transportu publicznego na skutek powtarzalnej niezdatności autobusów i wynikającej stąd nieterminowości przewozów [9].

3. Wyniki badań

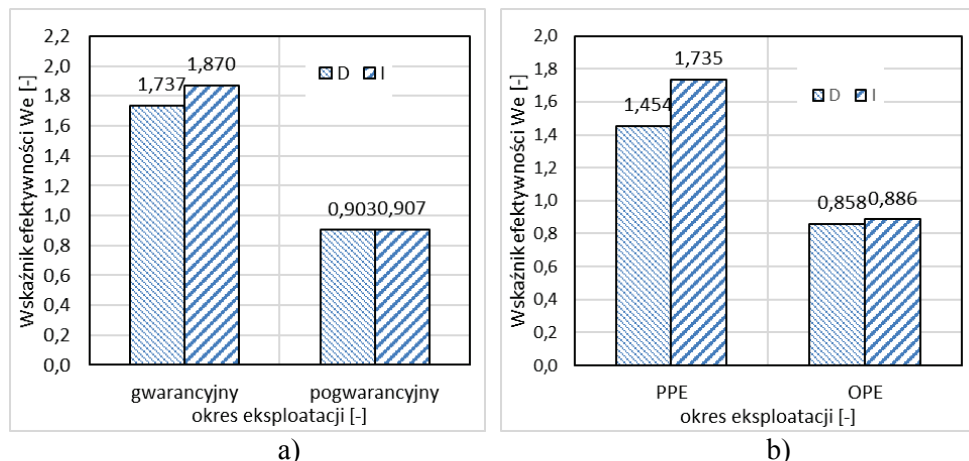
Wskaźnik efektywności W_e obliczony z równania (1) w zależności od przebiegu eksploatacyjnego przedstawiono na rys. 1. Obliczenia wykonano w odniesieniu do średniego miesięcznego przebiegu. Na wykresie można zauważyć progresywne obniżanie się wskaźnika efektywności wraz z wrastającym czasem użytkowania dla autobusów obu marek. Rozpatrując cały okres obserwacji, średnia wartość wskaźnika dla marki D wynosi 1,181, a dla marki I kształtuje się na poziomie 1,228.

W celu bardziej dokładnego porównania marek pojazdów między sobą przy uwzględnieniu ich zużycia eksploatacyjnego, podzielono całkowity okres obserwacji na dwa szczegółowe okresy. W pierwszej kolejności na okres gwarancyjny (0–2 lat) i okres pogwarancyjny (3–6 lat) (rys. 2). Wartości wskaźnika efektywności w obu tych okresach są porównywane dla obu marek, w szczególności w okresie pogwarancyjnym. Istotne jest, że po upływie okresu gwarancji średnia wartość wskaźnika efektywności w pozostałym czasie eksploatacji jest dwa razy mniejsza. Szczegółowa analiza kosztów napraw nieplanowanych pozwala stwierdzić, że bardziej odpowiednim podziałem jest okres pełnej przydatności eksploatacyjnej (w skrócie PPE) i ograniczonej przydatności eksploatacyjnej (OPE) [6]. W tab. 4 przedstawiono zakresy czasu użytkowania w ujęciu miesięcznym, na podstawie których określono granicę okresów PPE i OPE dla obu marek.



Rys. 1. Wskaźnik efektywności eksploatacyjnej W_e w funkcji przebiegu eksploatacyjnego dla całkowitego okresu obserwacji

Dla okresów PPE i OPE przeprowadzono statystyczne porównanie wartości średnich z wykorzystaniem metody analizy wariancji. Wykorzystano testy Shapiro–Wilka i jednoczynnikowej analizy wariancji. Statystyki opisowe przedstawiono w tab. 5.



Rys. 2. Średnia wartość wskaźnika efektywności eksploatacyjnej w okresie gwarancyjnym i pogwarancyjnym (a) oraz pełnej przydatności eksploatacyjnej i ograniczonej przydatności eksploatacyjnej (b)

Tabela 4

Podział na okres PPE i OPE

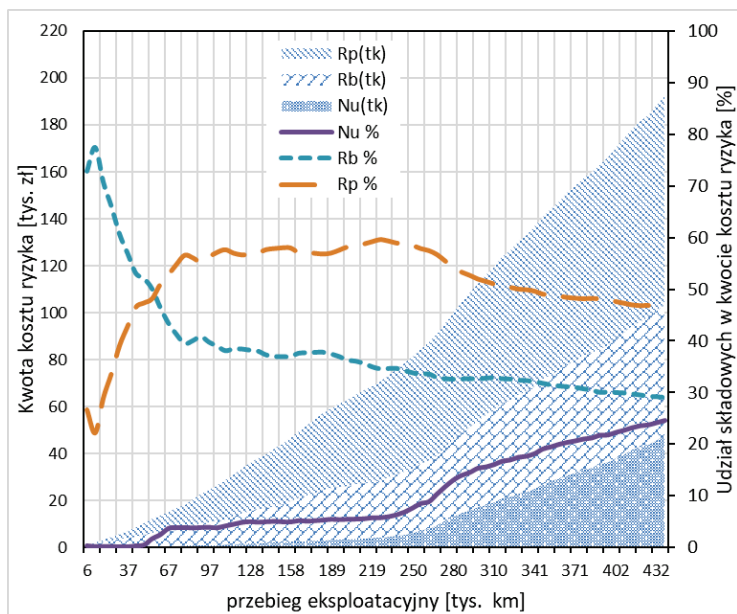
Okres	D	I
PPE [msc]	0 – 36	0 – 29
OPE [msc]	37 – 72	30 – 72

Strukturę kosztów ryzyka obliczonego według równania (5) dla marki D i marki I przedstawiono na rys. 3 i 4. Dla zwiększenia czytelności naniesiono dodatkowo linie z osią pomocniczą określające procentowy udział kosztów. W początkowym okresie największe ryzyko stanowią przestoje R_b , ok. 80–90% kosztów. Koszty ryzyka związane z możliwą utratą klienta R_p sukcesywnie rosną od chwili rozpoczęcia eksploatacji. Przy przebiegu autobusu ok. 55 tys. km dla marki D koszty R_p zaczynają dominować w kosztach całkowitych i ten trend jest utrzymywany w czasie całego dalszego okresu eksploatacji. Podobna sytuacja ma miejsce w przypadku marki I, lecz charakterystyczny wzrost kosztu utraty zaufania klienta następuje przy przebiegu ok. 70 tys. km. Maksymalny udział kosztów ryzyka utraty zaufania klienta dla marki D wyniósł 59,6 %, a dla marki I 64%.

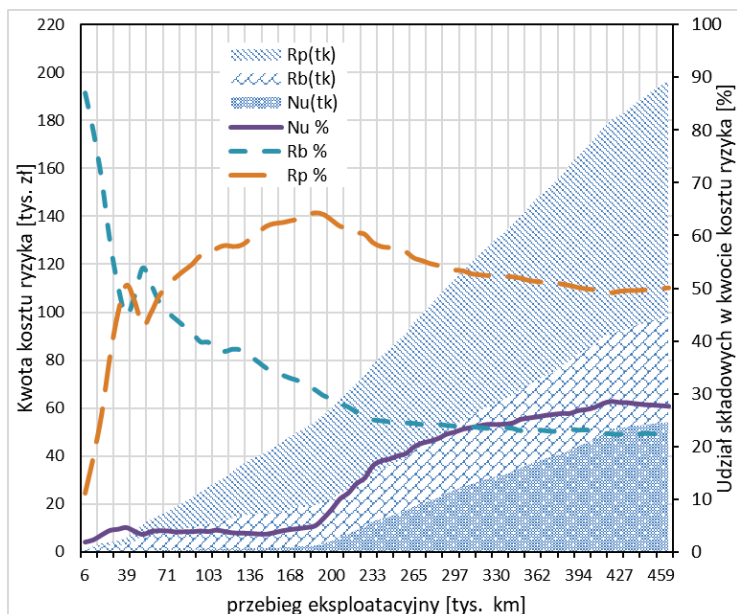
Tabela 5

Wartości statystyk opisowych efektywności eksploatacyjnej dla obu marek w różnych okresach użytkowania autobusów

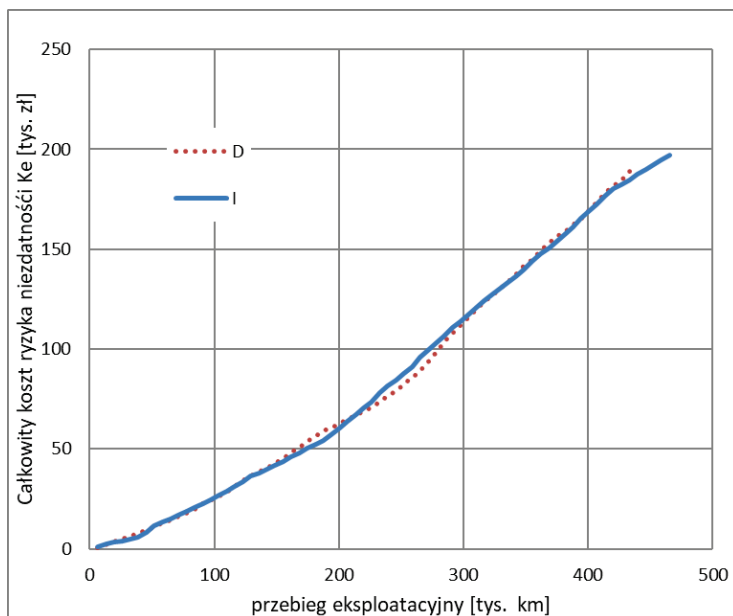
Okres	D / I			
	kwartyl dolny	mediana	kwartyl górny	odchylenie stand.
gwarancyjny	1,151/1,201	1,491/1,394	1,960/1,923	0,954/1,002
pogwarancyjny	0,836/0,85	0,880/0,877	0,972/0,936	0,081/0,087
PPE	0,823/1,132	1,101/1,294	0,307/1,731	0,830/0,958
OPE	0,821/0,846	0,848/0,875	0,881/0,912	0,045/0,064
całkowity	0,852/0,865	0,973/0,937	1,146/1,201	0,680/0,739



Rys. 3. Struktura kosztów ryzyka niezdatności i udziały procentowe składowych kosztów dla marki D

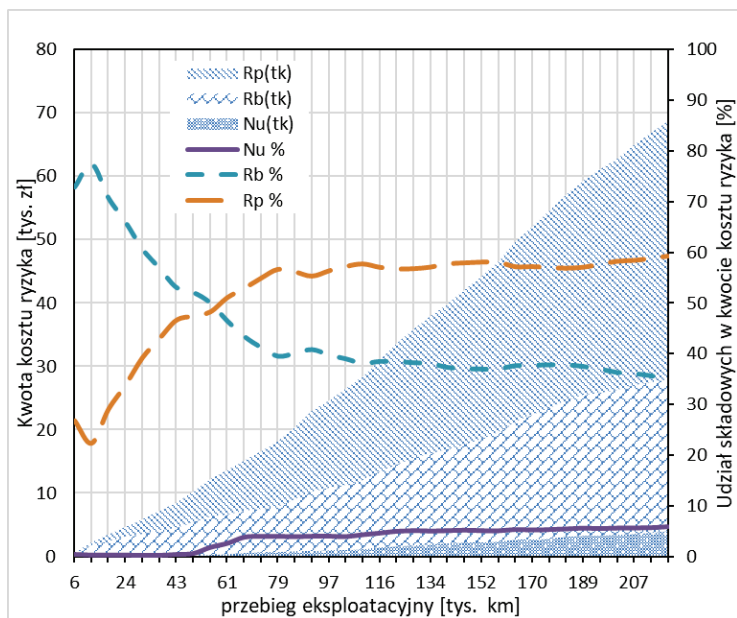


Rys. 4. Struktura kosztów ryzyka niezdatności i udziały procentowe składowych kosztów dla marki I

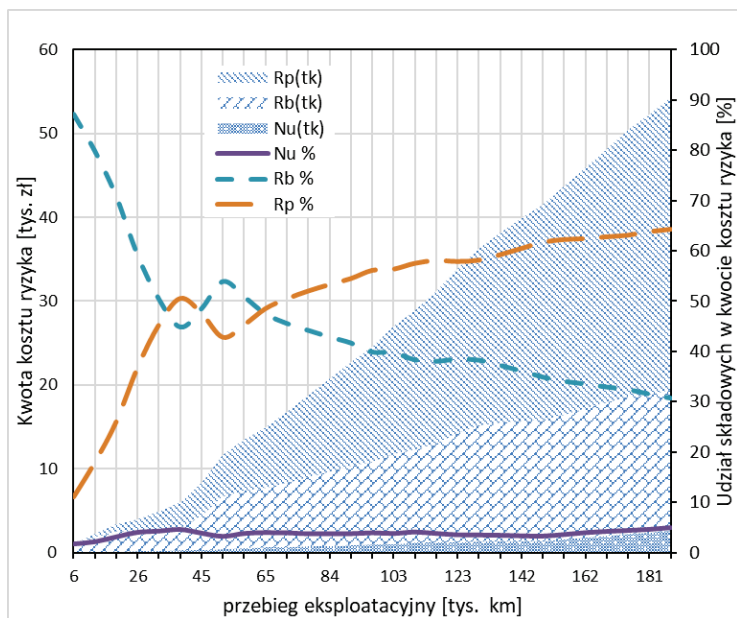


Rys. 5. Całkowite koszty ryzyka niezdatności dla obu producentów autobusów D i I

Istotną różnicą pomiędzy obiema markami jest chwila kiedy pojazdy zaczynają generować zwiększone koszty napraw nieplanowanych. Można to stwierdzić na podstawie analizy przebiegu kosztów napraw N_u i kosztów ryzyka utraty zaufania R_p . Dla marki D chwila ta przypada na przebieg eksploatacyjny ok. 260 tys. km, dla marki I jest to około 200 tys. km. Skumulowane koszty dla obu marek pojazdów w okresie eksploatacji są porównywalne (rys. 5). Pojazdy marki D i I w okresie PPE generują stosunkowo niskie koszty napraw incydentalnych (rys. 6, 7). Na koniec okresu pełnej przydatności eksploatacyjnej jest to odpowiednio 5,8% dla marki D i 4,6% dla I. Udział kosztów ryzyka związanego z przestojami również ma zbliżony przebieg dla obu marek autobusów i maleje wraz ze wzrostem czasu eksploatacyjnego, osiągając wartości udziału na poziomie 30–35%, kwoty kosztów ryzyka są różne i wynoszą ok. 24 tys. zł dla marki D i ok. 17 tys. zł dla I. Dla marki D koszty ryzyka utraty zaufania pod koniec okresu PPE stanowią ok. 60% kosztów całkowitych, a w przypadku marki I jest to ok. 65%.



Rys. 6. Struktura kosztów ryzyka niezdatności i udziały procentowe składowych kosztów dla marki D w okresie PPE



Rys. 7. Struktura kosztów ryzyka niezdatności i udziały procentowe składowych kosztów dla marki I w okresie PPE

4. Dyskusja wyników

Otrzymane wyniki obliczeń efektywności eksploatacyjnej pozwalają stwierdzić, że najwyższa efektywność autobusów (powyżej jedności) zachodzi w pierwszym okresie 150 tys. km dla obu marek (rys. 1). Wartości efektywności eksploatacyjnej są porównywalne dla obu badanych marek zarówno w okresie gwarancyjnym, jak i pogwarancyjnym (rys. 2a). Może to świadczyć o bardzo zbliżonym modelu projektowania cyklu „życia” autobusów stosowanym przez obu producentów. Należy jednak zwrócić uwagę na różnicę w cenie zakupu autobusów – 80 tys. zł (tab. 1). Wysoka niezawodność, a tym samym duża efektywność eksploatacyjna w okresie gwarancyjnym jest szczególnie ważna z punktu widzenia producenta, ponieważ w tym okresie producent pokrywa koszty napraw. Jednak niezależnie od producenta użytkownik (przedsiębiorstwo transportowe) jest obciążony kosztami ryzyka nieplanowanych przestojów i utraty zaufania klienta. Najkorzystniejsza dla przedsiębiorstwa byłaby sytuacja, w której okres gwarancji byłby dopasowany do niezawodnościowej granicy czasu eksploatacji. W większości przypadków jest to jednak ekonomicznie nieopłacalne. W prezentowanej pracy wprowadzono nowy podział prognozowanego czasu eksploatacji na okres pełnej przydatności eksploatacyjnej (PPE), determinowany przez niskie koszty napraw nieplanowanych przy jednoczesnym zachowaniu wysokiego wskaźnika efektywności eksploatacyjnej oraz okres ograniczonej przydatności eksploatacyjnej (OPE), w którym występują uszkodzenia zużyciowe pojazdu, generujące potrzebę napraw.

Wyznaczony wskaźnik efektywności w okresie PPE dla obu marek pojazdów wskazuje na różnicę wynoszącą 0,281. Natomiast różnica efektywności obu marek w okresie OPE wynosi tylko 0,028.

Czynnikiem wyróżniającym przedstawiony model oceny efektywności eksploatacyjnej jest uwzględnienie kosztów ryzyka z tytułu utraty zaufania klienta. Jak wykazano, koszty te mogą mieć znaczący udział w kosztach całkowitych.

5. Wnioski

1. Rozszerzona ocena przewidywanej efektywności eksploatacyjnej autobusów powinna obejmować koszty ryzyka utraty zaufania pasażerów (użytkowników). Koszty te stanowią znaczący składnik całkowitych kosztów niezawodności autobusów.
2. Charakterystyka przebiegu poszczególnych składników ryzyka niezdatności pojazdów w funkcji czasu użytkowania jest podstawą do określenia granicy

między okresami ich pełnej przydatności eksploatacyjnej (PPE) i ograniczonej przydatności eksploatacyjnej (OPE). Może to być wykorzystane do ustalenia optymalnego czasu ich użytkowania lub do porównywania marek pojazdów z punktu widzenia potencjału eksploatacyjnego.

6. Literatura

1. Andrzejczak K.: Metody prognozowania w modelu eksploatacyjnym środków transportu. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2013.
2. Dmowski A.: Model oceny efektywności eksploatacyjnej samochodu ciężarowego w warunkach wynajmu długoterminowego przy uwzględnieniu wskaźników niezawodnościowych. Rozprawa doktorska, Instytut Lotnictwa, 2017.
3. Gawron H.: Rozwój aglomeracji miejskich i ich znaczenie dla rozwoju lokalnego rynku nieruchomości. Zarządzanie i Finanse, 4(12)/2014.
4. Kulińska E.: Model parametryzacji kosztów ryzyka w procesie transportu. Logistyka, 6/2013.
5. Michalski R., Wierzbicki S.: Badania porównawcze niezawodności autobusów komunikacji miejskiej. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, 4(32)/2006.
6. Niewczas A., Rymarz J., Dębicka E.: Etapy użytkowania pojazdów ze względu na efektywność eksploatacyjną na przykładzie autobusów miejskich. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, 21(1)/2019, DOI 10.17531/ein.2019.1.3.
7. Niewczas A., Rymarz J., Pieniak D.: Porównawcza analiza niezawodności komunikacji miejskiej. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport, 101/2014.
8. Rymarz J., Badania efektywności eksploatacyjnej autobusów komunikacji miejskiej. Rozprawa doktorska, Politechnika Lubelska, Lublin 2015.
9. Zwierzchowska M.: Ocena jakości usług komunikacji miejskiej – dobór zmiennych do badania metodą delficką. Autobusy, 5/2018.