

Analiza gotowości i niezawodności taboru kolejowego z uwzględnieniem rezerwy eksploatacyjnej

Z punktu widzenia logistyki zarządzanie taborom kolejowym odgrywa dużą rolę, ponieważ każda awaria pojazdu może skutkować niedostarczeniem ładunku na czas, co wiąże się z koniecznością zapłacenia kar finansowych z tytułu niewywiązania się z umowy o przewóz. W niniejszym artykule przedstawiono symulację gotowości i niezawodności taboru kolejowego składającego się z 10 lokomotyw z uwzględnieniem rezerwy eksploatacyjnej. Rezerwowanie jest jedną z metod pozwalającą na utrzymanie odpowiedniego poziomu gotowości i niezawodności taboru. W pracy dokonano analizy dwóch wariantów: z jedną i z kilkoma lokalizacjami stacjonowania pojazdów rezerwowych. Wykazano, że w celu zapewnienia wysokiego poziomu gotowości i niezawodności bardzo istotne jest skrócenie czasu zastąpienia lokomotywy uszkodzonej przez pojazd rezerwowy.

1 WSTĘP

W procesach transportowych istotną rolę odgrywa problematyka zapewnienia ciągłości procesów przewozowych. Wszelkiego rodzaju wyłączenia pojazdu uniemożliwiają jego dalszą pracę są ryzykiem, które mogą spowodować nie wykonanie zadania przewozowego. Taka sytuacja może spowodować powstanie opóźnień i ich propagację w całym łańcuchu transportowym, co w rezultacie będzie skutkowało koniecznością poniesienia kary finansowej zgodnie z ustaleniami umowy. Aby uniknąć takich sytuacji dąży się do utrzymania współczynnika gotowości technicznej na odpowiednim poziomie, co pozwala w znacząco obniżyć ryzyko awarii pojazdu. Wysoka wartość współczynnika gotowości technicznej wskazuje na krótki czas trwania i małą ilość przestojów spowodowanych przeglądami technicznymi, okresową obsługą i serwisem oraz nieplanowanymi naprawami. W praktyce zwiększenie współczynnika gotowości technicznej jest możliwe poprzez: inwestycje w nowoczesny tabor o dużej niezawodności, zwiększenie działań serwisowych lub zapewnienie pojazdów rezerwowych. Przy czym tylko zapewnienie rezerwy umożliwia szybką reakcję na nieprzewidziane sytuacje w trakcie przewozu ładunków. Pojęcie gotowości technicznej będącej cechą systemu transportowego wykorzystywane jest także do analizy tzw. systemów szybkiego reagowania w losowych chwilach użytkowania operacyjnego [20], np. siły lotnicze, pogotowie ratunkowe, straż pożarna czy systemy transportu zbiorowego – głównie miejskiego [14].

2 ZARZĄDZANIE TABOREM KOLEJOWYM

Zarządzanie taborom kolejowym jest złożonym procesem, zwłaszcza dla dużych przewoźników posiadających znaczącą ilość pojazdów kolejowych. W zarządzaniu taborom duże znaczenie ma dobór odpowiedniego środka transportu do realizacji danego zadania przewozowego. Niejednokrotnie typ przewożonego ładunku wymusza przydział tylko i wyłącznie określonego typu wagonu. Taka sytuacja występuje dla towarów szybko psujących się, niebezpiecznych, sypkich i specjalnych oraz przewozu kontenerów. Dobór wagonu odbywa się na podstawie rodzaju przewożonego ładunku, jego długości i masy [8]. Wagony w Polsce mają najczęściej zastosowanie do przewozu towarów masowych, takich jak: węgiel czy kruszywa. Brakuje natomiast specjalistycznych wagonów do transportu kontenerów czy towarów wysokoprzetworzonych. Z roku na rok liczba wagonów typu chłodnia w Polsce spada. W 2006 r. przewoźnicy jeżdżący w Polsce dysponowali zaledwie liczbą 4-ech tego typu wagonów. Wagony te nie są już eksploatowane, co obniża ofertę przewozową poszczególnych spółek, ale wprowadzane kontenery chłodnie, mogą wypełniać powstałą lukę [10]. Udział typów wagonów eksploatowanych w Polsce przedstawiono w tabeli 1.

Tabor wagonowy w Polsce należy do jednego z największych w Europie. Jednak z uwagi na brak długoterminowej wizji wspierania transportu kolejowego przez państwo, jak również stan techniczny

Tabela 1. Udział typów wagonów w Polsce w latach 2007-2011 [3]

	2007	2008	2009	2010	2011
wagony ogółem	112 842	112 699	107 795	101 740	101 511
kryte	9 807	8 961	7 609	5 814	4 898
węglarki	67 493	66 281	63 166	58 724	59 978
platformy	12 962	13 312	12 871	12 165	11 958
cysterny	13 801	14 877	14 873	15 041	14 665
chłodnie	0	0	0	0	0
z dachami odchylanymi	954	1 015	1 015	1 201	1 197
specjalne	7 825	8 253	8 261	8 129	8 815
SUMA	225 684	225 398	215 590	202 814	203 022

poszczególnych jednostek, które są w większości wyeksploatowane, o parametrach odbiegających od średniej europejskiej, to Polski tabor kolejowy nie klasyfikuje się już tak dobrze. Należy nadmienić, że średni wiek wagonu towarowego w Polsce to 27,1 lat [3]. Obecnie w Polsce eksploatowane jest 3690 lokomotyw (zarówno spalinowych, jak i elektrycznych) wykorzystywanych do wykonywania przewozów towarowych. Według danych Urzędu Transportu Kolejowego 60% z nich to pojazdy spalinowe (2 233 sztuk), a reszta – lokomotywy elektryczne (1457 sztuk). Średni wiek lokomotywy towarowej to aż 32,3 lata. Średni wiek lokomotyw eksploatowanych przez prywatnych przewoźników wynosi natomiast aż 40 lat [16]. Zaawansowany wiek lokomotyw znacząco wpływa na ich gotowość techniczną i niezawodność.

Z punktu widzenia zarządzania logistycznego w przedsiębiorstwie, transport traktowany jest jako element pewnej całości [4]. Takie podejście gwarantuje odpowiedni stopień porozumienia poszczególnych uczestników wewnętrznego łańcucha logistycznego, jak również pozwala na pełną koordynację i optymalizację działań [2, 15, 21]. Logistyka wymaga centralnego kierowania w skali firmy [1]. Prace logistyczne muszą być skoordynowane, a także synchronizacji z pozostałymi działaniami przedsiębiorstwa. Dlatego konieczna jest hierarchiczna organizacja służb logistycznych i scentralizowane kierowanie ich pracą. Im niższe ułożenie logistyki w hierarchicznej strukturze przedsiębiorstwa, tym większe jest niebezpieczeństwo, że zadania logistyczne będą traktowane tylko jako funkcje dodatkowe [2].

W zarządzaniu taborom kolejowym istotne jest nadzorowanie wszystkich pojazdów równocześnie jak i każdego z osobna. Patrząc z perspektywy pojedynczego pojazdu można zauważyć dosyć wysoki poziom ryzyka wynikający z możliwości jego awarii. W takim przypadku oprócz kosztów związanych z naprawą pojawiają się koszty związane z niedotrzymaniem warunków umowy przewozu. Dysponując tylko jednym pojazdem przypisanym do określonego typu zadań nie ma możliwości uniknięcia tego typu

sytuacji. W związku z tym będzie dochodziło do zwiększenia kosztów funkcjonowania przedsiębiorstwa. Natomiast w przypadku rozpatrywania grupy pojazdów, mogących wykonywać podobne zadania, zmniejsza się ryzyko niedostarczenia ładunku w określone miejsce, w określonym czasie. W sytuacji awarii danego środka transportu jest możliwość zastąpienia go innym, rezerwowym. Jeśli doszłoby do awarii pojazdu na linii problem jest dość skomplikowany, ponieważ powoduje zablokowanie całego toru kolejowego. Opóźnienia w dostarczeniu ładunku, będą tym większe im większa jest odległość stacjonowania pojazdu rezerwowego od pojazdu uszkodzonego (rys. 1).



Rys. 1. Schemat sytuacyjny odnoszący się do uszkodzenia pojazdu w trakcie transportu

Na rys.1 przedstawiono przykładowy schemat sytuacji uszkodzenia pojazdu na linii z uwzględnieniem czterech miejsc stacjonowania lokomotyw rezerwowych rozmieszczonych symetrycznie na terenie całego kraju. Każda z lokalizacji odpowiada za obsługiwane określonego obszaru kraju. Jeśli dojdzie do uszkodzenia lokomotywy na trasie to zostanie ona zastąpiona przez lokomotywę rezerwową obsługującą

obszar, na którym doszło do awarii. W przedstawionym schemacie zostałyby wykorzystana rezerwowa lokomotywa stacjonująca w Poznaniu. Zważywszy na globalizację i wzrost wymagań klientów, zarządzanie taborem kolejowym jest coraz bardziej istotne. Zlecniodawcy coraz częściej wymagają od przewoźników kolejowych dużej elastyczności, szybkości działania, a także kompleksowej obsługi związanej z przewozem każdej ilości towaru, o zróżnicowanych gabarytach, w sposób maksymalnie efektywny. Zadania przewozowe, określone potrzebami klientów charakteryzowane są trzema wielkościami [8]:

- rodzajem i ilością ładunków, które należy przewieźć,
- relacją wymaganego przemieszczania ładunków,
- terminem przemieszczania.

Głównym celem przedsiębiorstwa transportowego jest maksymalizacja zysku. Aby go osiągnąć konieczne jest obniżanie kosztów działalności. Koszty związane z zakupem oraz późniejszą obsługą taboru kolejowego są bardzo wysokie. Dlatego też firmy dążą do minimalizacji niewykorzystywanej części taboru kolejowego. Z jednej strony powinno się posiadać rezerwę środków transportu będących w gotowości na wypadek awarii, pozwalających na zagwarantowanie dostarczenia ładunku zgodnie z ustaleniami umowy, z drugiej zaś strony powinno dążyć się do jej minimalizacji.

3 GOTOWOŚĆ I NIEZAWODNOŚĆ TECHNICZNA POJAZDÓW SZYNOWYCH

Ilościowo niezawodność środków transportu szynowego wyraża się za pomocą wskaźników niezawodności. Liczba stosowanych w praktyce wskaźników wynika z definicji niezawodności w sensie wartościującym. Zgodnie z normą PN-N-04000, niezawodność jest to właściwość charakteryzująca zdolność obiektu do wykonania określonych zadań w określonym przedziale czasu i określonych warunkach eksploatacji. W nowszym wydaniu tej normy, niezawodność definiowana jest jako zespół właściwości, które opisują gotowość obiektu i wpływające na nią: nieuszkodzalność, obsługiwalność i zapewnienie środków obsługi [14, 17].

Każdy środek transportu dla potrzeb badania i analizy niezawodności można zdefiniować jako uporządkowaną parę, która składa się ze skończonego i przeliczalnego zbioru elementów oraz struktury funkcjonalnej [6]. Część elementów jest włączona szeregowo w strukturę pojazdu, inna liczba elementów jest włączona równolegle. Jeżeli element jest włączony w strukturę niezawodnościową pojazdu [6, 11]:

- szeregowo, to uszkodzenie elementu powoduje uszkodzenie pojazdu,

- równolegle, to uszkodzenie elementu powoduje zmianę niektórych eksploatacyjnych charakterystyk systemu, przy której pojazd nie traci jeszcze zdadności.

Niezawodność środków transportu szynowego w eksploatacji charakteryzowana jest przede wszystkim przez [18]:

- poprawność działania,
- trwałość,
- obsługiwalność,
- gotowość techniczną.

Każda z tych właściwości może zostać opisana zbiorem charakterystyk w sensie statystycznym. Definicje oraz wyrażenia matematyczne służące do ich wyznaczenia można znaleźć w profesjonalnej literaturze dotyczącej tego zagadnienia np.: [5, 6, 9, 12], jak również w normie PN-EN 61703 [13]. Jednym ze wskaźników charakteryzujących poprawność działania pojazdu jest funkcja niezawodności $R(t)$ określająca prawdopodobieństwo poprawnej pracy dla czasu t :

$$R(t) = P\{T \geq t\} \quad (1)$$

gdzie:

T – jest zmienną losową określającą czas bezawaryjnej pracy (lub przebiegu) elementu, zespołu lub pojazdu

Niezawodność obiektów naprawialnych, tzn. takich, którym przywraca się sprawność, gdy ją utracą, a takim niewątpliwie są środki transportu szynowego, powinna być charakteryzowana zmienną kompleksową, uwzględniającą zarówno uszkadzalność pojazdu, jak i jego obsługiwalność [15]. Charakterystyką spełniającą te wymagania jest wskaźnik gotowości technicznej. Gotowość pojazdu $A(t)$ definiowana jest jako prawdopodobieństwo tego, że w chwili t pojazd znajduje się w stanie zdadności [5]:

$$A(t) = 1 - F(t) + \int_0^t [1 - F(t - \tau)] h(\tau) d\tau \quad (2)$$

gdzie:

$F(t)$ – dystrybuanta rozkładu prawdopodobieństwa czasu poprawnej pracy pojazdu,

$H(t)$ – funkcja gęstości odnowy.

Powyższy wzór praktycznie rzadko jest wykorzystywany w praktyce ze względu na znaczny stopień komplikacji obliczeń. Zwykle stosuje się tzw. wskaźnik gotowości technicznej A definiowany, jako średni udział czasu, w którym pojazd przebywa w stanie zdadności [6, 19]:

$$A = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) \quad (3)$$

Skąd ostatecznie:

$$A = \frac{T_o}{T_o + U_o} \quad (4)$$

gdzie:

T_o – średni czas przebywania pojazdu w stanie zdadności,

U_o – średni czas przebywania pojazdu w stanie niezdatności.

Ze względu na to, że środki transportu szynowego podlegają obsłudze bieżącym, jak również obsłudze profilaktycznym wyróżniono dwa rodzaje gotowości technicznej [20]:

- gotowość operacyjną (A_o), przy obliczeniach, której uwzględnia się czas przebywania pojazdu w stanie niezdatności wywołanym uszkodzeniem (naprawy bieżące),
- gotowość rzeczywistą (A_R), przy obliczeniach, której uwzględnia się zarówno czas przebywania pojazdu w stanie niezdatności wywołanym uszkodzeniem, jak i czas przebywania pojazdu w obsłudze profilaktycznej (poziomy utrzymania).

W celu dokonania oceny gotowości taboru kolejowego, w określonym przedziale czasu (θ, t), np.: pomiędzy naprawami okresowymi, gotowość operacyjną można oszacować ze wzoru:

$$A_o = \frac{\sum_{i=1}^N TZ_i}{\sum_{i=1}^N TZ_i + \sum_{i=1}^N TN_i} \quad (5)$$

gdzie:

TZ_i – czas przebywania pojazdu o numerze i w stanie zdadności,

TN_i – czas przebywania pojazdu o numerze i w stanie niezdatności z powodu obsługi bieżących,

N – liczność próby pojazdów pobranych do badań.

Gotowość rzeczywistą natomiast:

$$A_R = \frac{\sum_{i=1}^N TZ_i}{\sum_{i=1}^N TZ_i + \sum_{i=1}^N TN_i + \sum_{i=1}^N TO_i} \quad (6)$$

gdzie:

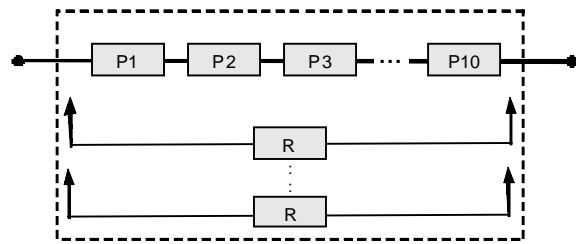
TO_i – czas przebywania pojazdu o numerze i w stanie niezdatności z powodu obsługi profilaktycznych, pozostałe oznaczenia j.w.

4 REZERWOWANIE ŚRODKÓW TRANSPORTU

Jednym ze sposobów zwiększenia gotowości i niezawodności środków transportu jest rezerwowanie. Rezerwowanie polega na tym, że do pojazdów podstawowych dołącza się jeden lub kilka pojazdów rezerwowych, które spełniają funkcje obiektu podstawowego, pracując jednocześnie z nim lub po włączeniu na jego miejsce w miarę występowania kolejnych niesprawności obiektu podstawowego i rezerwowych. W odniesieniu do pojazdów szynowych, rezerwowanie może być realizowane poprzez wykorzystanie pojazdów rezerwowych w sytuacji:

- wykonywania napraw i przeglądów okresowych związanych z utrzymaniem pojazdów podstawowych;
- wykonywania napraw bieżących, wynikających z zawodności pojazdów podstawowych.

Zgodnie z teorią niezawodności tego typu rezerwowanie można zamodelować strukturą niezawodnościową z rezerwą nieobciążoną. Przykład takiej struktury dla 10 pojazdów podstawowych przedstawiono na rysunku 2. W strukturze tej pojazdy rezerwowe są w stanie oczekiwania, a więc nie są obciążone, aż do chwili włączenia ich do pracy na miejsce niesprawnego pojazdu podstawowego.



Rys. 2. Struktura niezawodnościowa z rezerwą nieobciążoną: P1-P10 pojazdy podstawowe, R – pojazdy rezerwowe (opr. własne)

Struktury niezawodnościowe z rezerwą nieobciążoną stosowane są w przypadku systemów, od których wymaga się bardzo wysokiej niezawodności i gotowości. W analizie tych systemów najczęściej zakłada się, że obiekty rezerwowe nie mogą ulec uszkodzeniom, gdy nie pracują i że przebywanie obiektu w stanie, w którym nie pracuje, nie wpływa na jego niezawodność. Poza tym zakłada się, że czas w przeciągu, którego obiekt uszkodzony zostaje zamienionym elementem rezerwowym, jest praktycznie równy zero oraz urządzenie przełączające jest absolutnie niezawodne. Dla takich założeń funkcja niezawodności systemu $R(t)$ składającego się z dwóch elementów: jednego podstawowego i jednego rezerwowego, może być wyrażona jako [12]:

$$R(t) = R_1(t) + \int_0^t f_1(x)R_2(t-x)dx \quad (7)$$

gdzie:

$R_1(t)$ – funkcja niezawodności elementu podstawowego w chwili t ,

$R_2(t)$ – funkcja niezawodności elementu rezerwowego w chwili t ,

$f_1(t)$ – funkcja gęstości prawdopodobieństwa elementu podstawowego w chwili t ,

x – chwila uszkodzenia elementu podstawowego.

Zdarzenie polegające na tym, że czas poprawnej pracy systemu wynosi t , może być osiągnięty na dwa sposoby:

- Czas poprawnej pracy T_1 elementu podstawowego będzie większy lub równy t ($T_1 \geq t$);

Uszkodzenie elementu podstawowego nastąpi w chwili x ($0 \leq x \leq t$), w której funkcje podstawowe przejmuje element rezerwowy i pracuje w czasie nie krótszym niż $t - x$.

Rozważając system, w którym występuje n elementów, równanie (7) przyjmuje postać [7]:

$$R(t) = R_1(t) + \int_0^t f_1(x_1)R_2(t-x_1)dx_1 + \int_0^t f_1(x_1) \int_0^{t-x_1} f_2(x_2)R_3(t-x_1-x_2)dx_2dx_1 + \dots$$

$$\dots + \int_0^t f_1(x_1) \int_0^{t-x_1} f_2(x_2) \int_0^{t-x_1-x_2} f_3(x_3) \dots \int_0^{t-x_1-x_2-\dots-x_{n-2}} f_{n-1}(x_{n-1})R_n(t-x_1-\dots-x_{n-1})dx_{n-1}\dots dx_2dx_1$$
(8)

gdzie:

$R_i(t)$ – funkcja niezawodności elementu i w chwili t ,

$f_i(t)$ – funkcja gęstości prawdopodobieństwa elementu i w chwili t ,

x – chwila uszkodzenia elementu i .

5 SYMULACJA GOTOWOŚCI I NIEZAWODNOŚCI TABORU KOLEJOWEGO

Celem symulacji gotowości i niezawodności taboru składającego się z 10 lokomotyw jest obliczenie niezbędnej liczby pojazdów rezerwowych, które zapewniają wartość wskaźnika gotowości taboru na poziomie $A_R=98,8\%$ w ujęciu rocznym oraz wskaźnika niezawodności taboru na poziomie $R(t)=0,85$ w czasie eksploatacji $t=2190,0$ godz.

5.1 SCENARIUSZ 1: POJAZDY REZERWOWE STACJONUJĄ POZA MIEJSCAMI PRZEPROWADZENIA ZABIEGÓW UTRZYMANIA PROFILAKTYCZNEGO I BIEŻĄCEGO

W scenariuszu 1 założono, że czas zastąpienia pojazdu podstawowego przez pojazd zastępczy wynosi $MLDT=24,0$ godziny. Ponadto, dla potrzeb symulacji założono, że wskaźnik gotowości technicznej pojedynczego pojazdu podstawowego oraz rezerwowego w roku eksploatacji wynosi: $A_R=92,0\%$. Sumaryczny czas niezdatności związany z naprawami bieżącymi i obsługami profilaktycznymi wynosi: $TN=700,8$ godz./rok. Do symulacji wskaźnika niezawodności $R(t)$ przyjęto, że czas poprawnej pracy pojazdu podstawowego i rezerwowego ma rozkład wykładniczy o parametrze $\lambda=4,9068 \times 10^{-4}$ [1/godz.], a oczekiwany czas odnowy $MTTR=109,5$ godz.

Tabela 2. Wyniki symulacji wskaźnika gotowości i niezawodności taboru kolejowego

L.p.	Liczba pojazdów podstawowych n	Liczba pojazdów rezerwowych k	Wskaźnik gotowości technicznej taboru kolejowego A_R	Wskaźnik niezawodności taboru kolejowego $R(t)$
1	10	1	81,81	0,01
2		2	93,38	0,01
3		3	96,33	0,01
4		4	96,93	0,02
5		5	97,01	0,02
6		10	97,04	0,03

Uwzględniając powyższe założenia i wykorzystując specjalistyczne oprogramowanie firmy ReliaSoft, przeprowadzono symulację wskaźnika gotowości technicznej i niezawodności dla taboru składającego się z 10 lokomotyw. Wyniki zestawiono w tabeli 2.

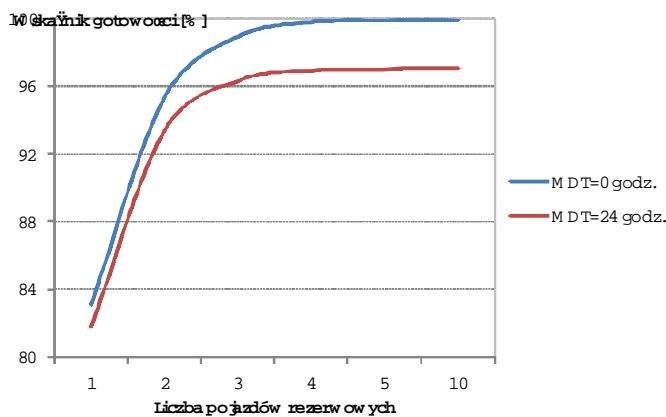
Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że zastosowanie nawet 10 lokomotyw rezerwowych nie zapewnia docelowych poziomów wskaźnika gotowości technicznej oraz wskaźnika niezawodności dla całego taboru.

5.2 SCENARIUSZ 2: POJAZDY REZERWOWE STACJONUJĄ W MIEJSCACH PRZEPROWADZENIA ZABIEGÓW UTRZYMANIA PROFILAKTYCZNEGO I BIEŻĄCEGO

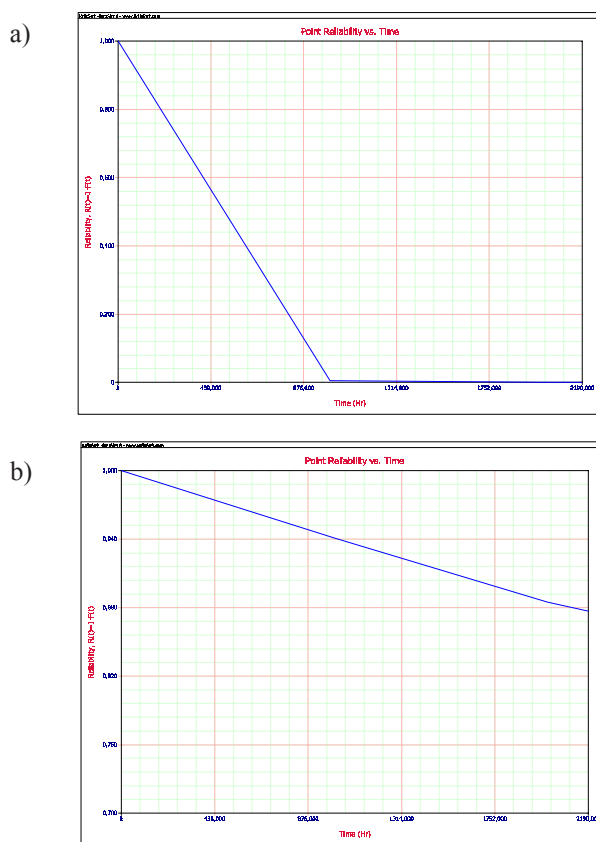
W kolejnym etapie analizy uwzględniono scenariusz 2, w którym założono, że pojazdy rezerwowe stacjonują w miejscu przeprowadzenia zabiegów utrzymania profilaktycznego i bieżącego. Pozwala to na przyjęcie założenia, że czas zastąpienia pojazdu podstawowego przez pojazd rezerwowy może być bliski zeru: $MLDT = 0,0$ godz. Pozostałe założenia są identyczne jak w scenariuszu 1. Wyniki symulacji wskaźnika gotowości i niezawodności dla taboru kolejowego składającego się z 10 lokomotyw zestawiono w tabeli 3. Na rysunku 3 i 4 przedstawiono porównanie otrzymanych wartości wskaźników gotowości i niezawodności dla dwóch analizowanych scenariuszy.

Tabela 3. Wyniki symulacji wskaźnika gotowości i niezawodności taboru kolejowego

L.p.	Liczba pojazdów podstawowych n	Liczba pojazdów rezerwowych k	Wskaźnik gotowości technicznej taboru kolejowego A_R	Wskaźnik niezawodności taboru kolejowego $R(t)$
1	10	1	83,11	0,034
2		2	95,32	0,445
3		3	98,94	0,877



Rys. 3. Wskaźnik gotowości A_R dla taboru 10 pojazdów w zależności od liczby pojazdów rezerwowych



Rys. 4. Wskaźnik niezawodności $R(t)$ dla $t=2190,0$ godz. dla taboru 10 pojazdów a) scenariusz 1 $MLDT=24,0$ godz., b) scenariusz 2 $MDT=0,0$ godz.

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że jeżeli czas zastąpienia pojazdu podstawowego przez pojazd zastępczy jest bliski zeru, to zastosowanie trzech pojazdów rezerwowych zapewnia wskaźnik gotowości technicznej całego taboru na poziomie $A_R=98,94\%$ rocznie, co stanowi wartość wyższą od zakładanej ($98,8\%$). Wprowadzenie trzech pojazdów rezerwowych zapewnia także wskaźnik niezawodności taboru na poziomie $R(t)=0,877$ w czasie eksploatacji $t=2190,0$ godz., co stanowi wartość wyższą od zakładanej ($0,85$). Warunkiem osiągnięcia zadeklarowanych wartości wskaźnika gotowości i niezawodności jest stacjonowanie pojazdów rezerwowych w

miejscach wykonywania zabiegów utrzymania profilaktycznego i bieżącego pojazdów podstawowych.

6 PODSUMOWANIE

Przeprowadzona analiza wskaźnika gotowości technicznej i wskaźnika niezawodności dla taboru 10 lokomotyw wskazuje, że założone wartości możliwe są do osiągnięcia jedynie w przypadku wprowadzenia rezerwy nieobciążonej w liczbie 3 pojazdów. Ponadto wykazano, że warunkiem osiągnięcia założonych wartości wskaźnika gotowości i niezawodności jest stacjonowanie pojazdów rezerwowych w miejscach wykonywania zabiegów utrzymania profilaktycznego i bieżącego pojazdów podstawowych. W dalszych pracach, przeprowadzona symulacja powinna być uzupełniona o ocenę aspektów ekonomicznych takiego rozwiązania. Stan ilościowy pojazdów rezerwowych stanowiący ponad 30% wszystkich pojazdów podstawowych wymaga zaangażowania dodatkowych nakładów na poziomie około 1/3 wartości dziesięciu pojazdów.

Bibliografia

- [1] Coyle J., Bardi E., Langley J., Zarządzanie Logistyczne, PWE, Warszawa 2002.
- [2] Dmowski A., Praktyczne aspekty zarządzania flotą w przedsiębiorstwie branży spożywczej, Eksploatacja i niezawodność nr 3/2008.
- [3] Funkcjonowanie rynku transportu kolejowego w 2011 roku, UTK 2012.
- [4] Gajewska T., Kryteria oceny jakości usług logistycznych, w: Zarządzanie jakością - doskonalenie organizacji, pod red. T. Sikory, Wyd. Naukowe PTTŻ, Kraków 2010.
- [5] Gniedenko B.W., Bielajew J.K., Sołowiew A.D., Metody matematyczne w teorii niezawodności, WNT, Warszawa 1968.
- [6] Hebda M., Janicki D., Trwałość i niezawodność samochodów w eksploatacji, WKiŁ, Warszawa 1977.
- [7] Kuo W., Zuo M.J., Optimal reliability modeling: principles and applications. John Wiley & Sons, 2003.
- [8] Lorenc A., Model of Container Transport System in Long Distance Freightage – Analysis and Optimization of Supply Chain, Logistics and Transport 4(20)/2013.
- [9] Manzini R., Regattieri A., Pham H., Ferrari E., Maintenance for Industrial Systems, Springer, 2010.
- [10] Master Plan dla transportu kolejowego w Polsce do 2030 roku, Ministerstwo Infrastruktury, Warszawa 2008
- [11] Młynarski S., Oprędkiewicz J., Systemowe rozwiązania zapewnienia bezpieczeństwa i niezawodności obiektów technicznych, Problemy Eksploatacji 3/2012, 39-54.
- [12] O'Connor P., Practical Reliability Engineering, 4th Edition. John Wiley & Sons Ltd., 2010.

- [13] PN-EN 61703:2002 Wyrażenia matematyczne dotyczące nieuszkodzalności, gotowości, obsługiwalności i zapewnienia środków obsługi.
- [14] Rymarz J., Niewczas A., Ocena gotowości technicznej autobusów komunikacji miejskiej na przykładzie miejskiego przedsiębiorstwa komunikacji w Lublinie, *Czasopismo Techniczne 4-M/2012*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2012.
- [15] Stajniak M., Fołtyński M., Hajdul M., Krupa A., *Transport i spedycja, ILiM Poznań 2007*.
- [16] Syryjczyk T., Farna P. (red.), *Biała księga 2013 Kolej na działania – mapa problemów polskiego kolejnictwa, Railway Business Forum, Warszawa – Kraków 2013*.
- [17] Szkoda M., *Assessment of Reliability, Availability And Maintainability of Rail Gauge Change Systems. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2014; 16 (3): 415–425 (w druku)*.
- [18] Szkoda M., *Metoda oceny trwałości i niezawodności kolejowych systemów przestawczych. Rozprawa doktorska. Politechnika Krakowska, Kraków 2008*.
- [19] Szkoda M., *Wskaźniki niezawodności środków transportu szynowego, Logistyka 3/2012*.
- [20] Wojciechowski Ł., Cisowski T., Grzegorzczak P., *Metody zarządzania flotą samochodową w firmie, Autobusy 6/2010*.
- [21] Woropay M., Szubartowski M., Migawa K., *Model oceny i kształtowania gotowości operacyjnej podsystemu utrzymania ruchu w systemie transportowym, Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 2003*.



**Prezentowane wyniki badań zostały zrealizowane w ramach projektu EUREKA
E!6726 LOADFIX dofinansowanego
ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju**

