

Dr inż. Maciej Szkoda

Politechnika Krakowska
Wydział Mechaniczny
Al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków, Polska
E-mail: maciek@m8.mech.pk.edu.pl

Ocena nieuszkodzalności, gotowości i podatności utrzymaniowej kolejowych systemów przestawczych

Słowa kluczowe: analiza niezawodności, system przestawczy, zmiana szerokości toru

Streszczenie: Praca dotyczy porównawczej oceny niezawodności dwóch kolejowych systemów przestawczych: systemu wymiany wózków wagonowych i systemu samoczynnie rozsuwanych zestawów kołowych SUW 2000. W zastosowanej metodzie oceny, niezawodność jest traktowana jako właściwość kompleksowa obejmująca takie cechy systemów jak: nieuszkodzalność, gotowość i podatność utrzymaniową. Przeprowadzone obliczenia wyselekcjonowanych wskaźników niezawodnościowych, oparte na danych eksploatacyjnych wykazały, że system SUW 2000 może stanowić alternatywną metodę pokonania bariery różnej szerokości toru w stosunku do aktualnie stosowanej wymiany wózków wagonowych.

1. Wprowadzenie

Rozwój gospodarczy w znacznym stopniu zależy od sprawnego systemu transportowego, który powinien umożliwiać niezawodny, bezpieczny i efektywny przewóz towarów zarówno w ruchu krajowym, jak i międzynarodowym. Zapewnienie tych warunków jest szczególnie trudne dla transportu kolejowego pomiędzy Europą a Azją. Związane jest to z różnymi szerokościami torów występujących na kontynencie euroazjatyckim. Większość europejskich państw, podobnie jak Polska, ma tory o szerokości 1435 mm, ale koleje byłej Wspólnoty Niepodległych Państw (WNP) i innych, w tym Litwy, Łotwy i Estonii posiadają linie kolejowe o prześwicie toru 1520 mm. Na terenie Azji, pociąg porusza się po torze szerokim 1520 mm, by w Chinach i Korei znowu trafić na linie normalnotorowe 1435 mm. Jeszcze szersze tory są w Hiszpanii i Portugalii – 1668 mm.

O potrzebie prac badawczych mających na celu usprawnienie metod pokonania bariery różnej szerokości torów świadczyć może fakt podejmowania tego tematu przez międzynarodowe konsorcja w ramach programów Unii Europejskiej jak również przez Międzynarodowy Związek Kolei (UIC) [3, 7, 10]. W latach 1995-2005 w Instytucie Pojazdów Szynowych Politechniki Krakowskiej wykonano szereg prac badawczo-rozwojowych i projektów celowych poświęconych temu zagadnieniu [2, 21, 31, 33, 38]. Również w aktualnej światowej literaturze dostępne są opracowania poświęcone realizacji przewozów pomiędzy kolejami o różnej szerokości torów, a w szczególności pomiędzy Europą a Azją [5, 13, 22, 27, 36, 40]. Autorzy tych prac podkreślają, że rozwój transportu kolejowego na kontynencie euroazjatyckim jest możliwy poprzez wdrożenie nowych efektywnych metod pokonania bariery różnej szerokości torów. Obecnie czas tracony w punktach granicznych na przeładunek towaru lub na wymianę zespołów biegowych wraz z obiegiem dokumentów sięga nawet do 46% całkowitego czasu transportu [13, 23].

W przewozach towarowych aktualnie stosowane są dwie technologie pokonania bariery różnej szerokości torów [2, 31]:

- technologia przeładunkowa,
- technologia przestawcza.

Technologia przeładunkowa polega na przeładunku przewożonego towaru w punktach granicznych z wagonów normalnotorowych do wagonów szerokotorowych lub odwrotnie. W zależności od rodzaju przewożonego ładunku, w technologii tej można wyróżnić: przeładowanie, przelewanie lub przesypywanie [31].

Kolejowe systemy przestawcze, będące przedmiotem rozważań w niniejszej pracy, oparte są na drugim z możliwych sposobów realizacji przewozów pomiędzy kolejami o różnej szerokości torów, tzw. technologii przestawczej [2]. W systemach tych przewóz odbywa się w tym samym środku transportowym, który jest przestawiany w punkcie granicznym z jednej szerokości toru na drugą. Przesławianie może być realizowane poprzez: wymianę wózków wagonowych, wymianę zestawów kołowych lub zastosowanie samoczynnie rozsuwanych zestawów kołowych. W przewozach towarowych obecnie stosowana jest wyłącznie wymiana wózków wagonowych z podniesieniem nadwozia wagonu. Metody polegające na wymianie zestawów kołowych były analizowane w ramach projektu badawczego [21], jednak nie znalazły one praktycznego zastosowania. W drugiej połowie ubiegłego stulecia, prowadzono intensywne prace badawcze nad automatycznymi technologiami pokonania bariery różnej szerokości torów (tzw. systemy samoczynnie rozsuwanych zestawów kołowych) w Niemczech, Hiszpanii, Rosji, Bułgarii, Polsce i w Japonii. Do tych, które znalazły praktyczne zastosowanie zalicza się: system Talgo (Hiszpania), system DB Rafil (Niemcy), system BT (Bułgaria) i polski system SUW 2000. W ramach projektu [3] wykonano analizę porównawczą tych systemów. Główny nacisk kładziono na aspekty prawne, ekonomiczne i logistyczne, jak również na korzyści płynące dla operatorów kolejowych. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że najbardziej dopracowany i zaawansowany technicznie jest polski system SUW 2000 zaprojektowany przez dr hab. inż. R. Suwalskiego [5]. Pierwsze lata eksploatacji systemu poświęcone były badaniom nad wyeliminowaniem zjawiska frettingu pomiędzy podpiąściem osi i tuleją piasty koła. Analiza różnych wariantów konstrukcji i materiałów umożliwiła wprowadzenie systemu samoczynnie rozsuwanych zestawów kołowych do handlowej eksploatacji nadzorowanej. W pracach [5, 40] przedstawiono wyniki badań z eksploatacji nadzorowanej systemu SUW 2000, prowadzonej w latach 2003-2008 w przewozach pasażerskich i towarowych, pomiędzy Polską a Ukrainą. Aktualnie, system samoczynnie rozsuwanych zestawów kołowych SUW 2000 stosowany jest tylko w przewozach pasażerskich pomiędzy Polską a Ukrainą (pociąg relacji Wrocław - Lwów).

Wszystkie dotychczas wykonane prace poświęcone zastosowaniu systemu SUW 2000 w przewozach towarowych ograniczają się do analiz porównawczych tego rozwiązania w ujęciu techniczno-ekonomicznym bez uwzględnienia jego niezawodności. Stąd, podjęto próbę wykonania porównawczej oceny niezawodności systemu samoczynnie rozsuwanych zestawów kołowych SUW 2000 w porównaniu do aktualnie stosowanej w transporcie materiałów niebezpiecznych wymiany wózków wagonowych. Analiza stanu istniejącego wykazała, że system przewozów przestawczych w transporcie materiałów niebezpiecznych w szczególności wymaga usprawnienia. Obecne rozwiązania stosowane w punktach granicznych na wschodniej granicy Polski dla tej grupy ładunkowej, charakteryzują się niską efektywnością oraz stwarzają poważne zagrożenie dla środowiska i bezpieczeństwa personelu obsługi. Pozwala to przypuszczać, że wyniki prezentowane w niniejszej pracy są nowe i mają istotne znaczenie dla dalszych prac badawczo-rozwojowych nad innowacyjnymi metodami pokonywania bariery różnej szerokości torów w przewozach towarowych.

2. Ocena nieuszkodzalności, gotowości i podatności utrzymaniowej

Kolejowe systemy przestawcze należą do grupy obiektów odnawialnych. Dla tego typu obiektów, metody opisu niezawodności stosowane do obiektów pracujących do pierwszego uszkodzenia, np.: z użyciem tylko funkcji niezawodności $R(t)$ czy intensywności uszkodzeń $\lambda(t)$ są niewystarczające. W zastosowanej metodzie oceny, niezawodność jest traktowana jako właściwość kompleksowa obejmująca takie cechy systemów jak: nieuszkodzalność, gotowość i podatność utrzymaniową (z ang. *Reliability, Availability and Maintainability* w skrócie *RAM*). Cechy te można zdefiniować następująco [16, 19]:

- Nieuszkodzalność (zdatność) rozumiana jest jako zdolność systemu do wypełnienia wymaganych funkcji w danych warunkach eksploatacji i w danym przedziale czasu;
- Gotowość to zdolność systemu do utrzymywania się w stanie umożliwiającym wypełnienie wymaganych funkcji w danych warunkach, w danej chwili lub w danym przedziale czasu, przy założeniu, że dostarczane są wymagane środki zewnętrzne;
- Podatność utrzymaniową (obsługiwalność) definiuje się jako właściwość charakteryzującą przystosowanie do wykonywania napraw w celu odtworzenia stanu zdatności w określonych warunkach eksploatacji z wykorzystaniem ustalonych metod i środków.

Znajdowanie się systemu w stanie gotowości oznacza, że system nie jest wyłączony z eksploatacji z powodu obsługi utrzymania profilaktycznego oraz nie znajduje się w stanie niezdatności z powodu uszkodzenia. Gotowość zależy nie tylko od przestojów związanych z utrzymaniem, ale zależy również od prawdopodobieństwa niewykonania przez system przypisanych mu funkcji (efekt uszkadzalności) [15]. Podatność utrzymaniowa w odniesieniu do kolejowych systemów przestawczych dotyczy utrzymania bieżącego i utrzymania profilaktycznego. Utrzymanie bieżące umożliwia przywrócenie zdatności obiektu, który uległ uszkodzeniu i ponowne wprowadzenie go eksploatacji. Natomiast, utrzymanie profilaktyczne realizowane jest w ramach ustalonego cyklu utrzymania obiektu w celu zwiększenia jego niezawodności i kontroli stanu zużycia [25]. Celem skutecznego utrzymania jest minimalizowanie czasu nieplanowanych przestojów systemu (*Mean Down Time MDT*) i związanych z tym kosztów [39].

Ogólne wytyczne dotyczące analizy nieuszkodzalności, gotowości i podatności utrzymaniowej ujęte są w normie PN-EN 50126 *Zastosowania kolejowe – Specyfikacja niezawodności, dostępności, podatności utrzymaniowej i bezpieczeństwa* [19]. W profesjonalnej literaturze dotyczącej tego zagadnienia dostępny jest szczegółowy opis, definicje oraz formuły obliczeniowe różnych wskaźników wykorzystywanych do oceny [1, 8, 14, 17, 26]. Analiza nieuszkodzalności, gotowości i podatności utrzymaniowej była przedmiotem wielu badań naukowych w ostatnich dekadach. Obecnie jest stosowana w różnych sektorach przemysłu, włączając przemysł lotniczy, zbrojeniowy, energetyczny, przetwórczy i transportowy [6, 9, 11, 15, 24, 25, 35]. Przykładowo w pracy [9] autorzy opisują możliwości zastosowania modelu RAM w praktyce przemysłowej do identyfikacji urządzeń krytycznych ze względu na częste awarie lub wysokie wymagania w zakresie utrzymania. W pracy [24] przedstawiono zastosowanie analizy RAM jako pomocne narzędzie przy projektowaniu systemów, we wprowadzaniu zmian konstrukcyjnych w celu osiągnięcia minimalnej liczby uszkodzeń i zwiększenia średniego czasu między uszkodzeniami (*Mean Time Between Failure MTBF*). W pracy [35] analizowany jest problem relacji pomiędzy gotowością, podatnością utrzymaniową środków transportu szynowego, a kosztami nieplanowanych przestojów i utrzymania pojazdu. Określono model optymalnej realizacji przeglądów i napraw okresowych z punktu widzenia kosztów, uwzględniając bieżące dane o uszkodzeniach pojazdu. W niniejszej pracy analiza nieuszkodzalności, gotowości i podatności utrzymaniowej odnosi się do kolejowych systemów przestawczych.

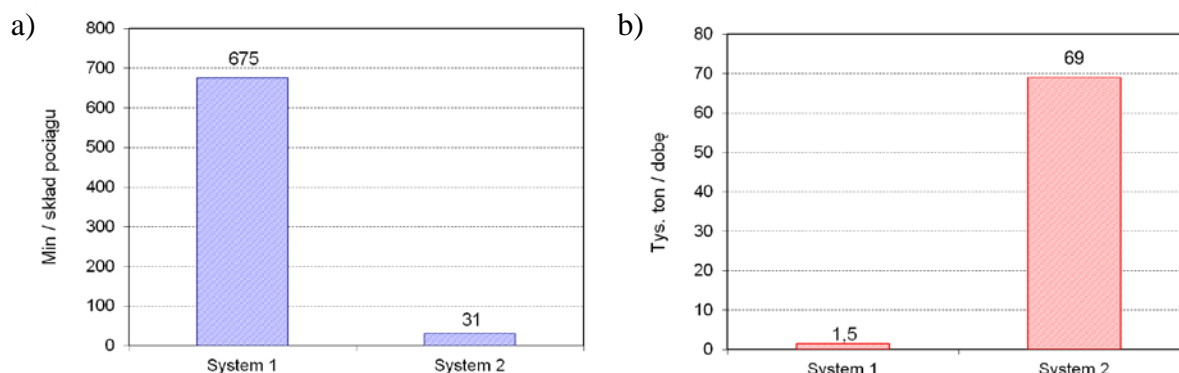
3. Analiza porównawcza kolejowych systemów przestawczych

3.1 Systemy podlegające analizie

Do oceny nieuszkodzalności, gotowości i podatności utrzymaniowej przyjęto dwa systemy związane z transportem materiałów niebezpiecznych:

- **System 1**, w którym zmiana szerokości torów odbywa się poprzez aktualnie stosowaną wymianę wózków wagonowych z podniesieniem nadwozia wagonu;
- **System 2**, w którym zmiana szerokości torów odbywa się przy zastosowaniu perspektywicznej metody – samoczynnie rozsuwanych zestawów kołowych SUW 2000.

Na rysunku 1 przedstawiono porównanie procesu obsługi analizowanych systemów. W analizie pominięto czas operacji związanych z przyjęciem pociągu tj. czas sprawdzenia zabezpieczeń, sprawdzenia zgodności dokumentów przewozowych, czas związany z odprawą celną i ważeniem wagonów.



Rys. 1. a) Czas obsługi w punkcie granicznym, b) Wydajność systemów [30, 32]

Biorąc pod uwagę czas obsługi składu pociągu w punkcie granicznym i wynikającą z niego wydajność, bezkonkurencyjny jest wariant z samoczynnie rozsuwanymi zestawami kołowymi SUW 2000. Zastosowanie systemu pozwala na znaczące skrócenie czasu przewozu do 18 godzin w zależności od przewożonego ładunku [4, 29]. Występują tu jednak ograniczenia związane z uniwersalnością obsługi. Technologia ta wymaga przewozów w składach całopociągowych, względnie wstępnego rozrządzenia przed punktem styku różnej szerokości torów.

3.2 Dane niezawodnościowe

Podstawą do oceny nieuszkodzalności, gotowości i podatności utrzymaniowej systemów były dane eksploatacyjne zebrane przy współpracy z PKP Cargo S.A. w rzeczywistych warunkach pracy, obejmujące dla systemu wymiany wózków około 7 lat, a dla systemu samoczynnie rozsuwanych zestawów kołowych prawie 4 lata eksploatacji. Umożliwiło to obserwację przebiegu eksploatacji elementów systemów w różnorodnych warunkach, a tym samym pozyskanie wiarygodnych i obszernych danych do analizy niezawodnościowej. Dane niezawodnościowe gromadzone były na wewnętrznych raportach i dokumentach ewidencyjnych PKP Cargo S.A., które pełniły funkcje kart eksploatacyjnych. Dokumenty te zawierały szczegółowe informacje dotyczące:

- daty wystąpienia uszkodzenia,
- okoliczności wykrycia uszkodzenia,
- przyczyn uszkodzenia,

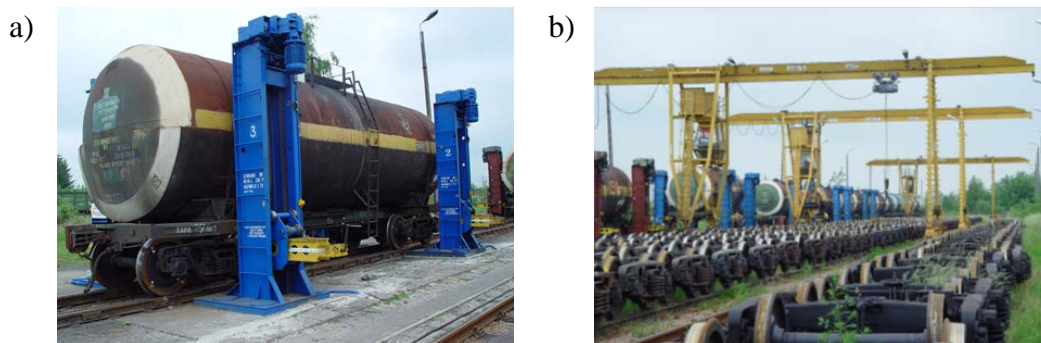
- charakterystyk czasowych obsługi, tj. czas trwania naprawy bieżącej, czasy przestoju organizacyjnych (oczekiwanie na naprawę, oczekiwanie na odbiór po naprawie),
- pracochłonności napraw bieżących,
- wartości liczbowych różnych cech mierzalnych przed naprawą i po naprawie,
- pracochłonności i czasów trwania obsługi planowych (przeglądy, naprawy okresowe),
- zużytych materiałów i części zamiennych,
- technologii operacji naprawczych,
- i inne dodatkowe informacje.

Szczegółowe dane dotyczące procesu eksploatacji, ilości i rodzaju zarejestrowanych uszkodzeń badanych systemów zawarte są w pracy [33].

3.3 Założenia i struktury niezawodnościowe systemów

Ocena nieuszkodzalności, gotowości i podatności utrzymaniowej rozpatrywanych systemów miała charakter porównawczy, więc z analizy, a tym samym ze struktur niezawodnościowych, wyłączono elementy wspólne, które mają taki sam wpływ w jednym i drugim systemie np.: infrastrukturę kolejową 1435 i 1520 mm, pojazdy trakcyjne i inne. Ośrodek zainteresowania w porównywanych systemach stanowiły elementy wyposażenia technicznego punktów styku różnej szerokości torów oraz tabor kolejowy zaangażowany w procesie transportowym.

W systemie 1 do przestawienia wagonu z jednej szerokości toru na drugą stosowane są stanowiska wymiany wózków wagonowych wraz ze współpracującymi suwnicami bramowymi (rys. 2a i 2b). W systemie 2 rozbudowana infrastruktura techniczna punktu wymiany wózków zastąpiona jest torowym stanowiskiem przestawczym (rys. 3).

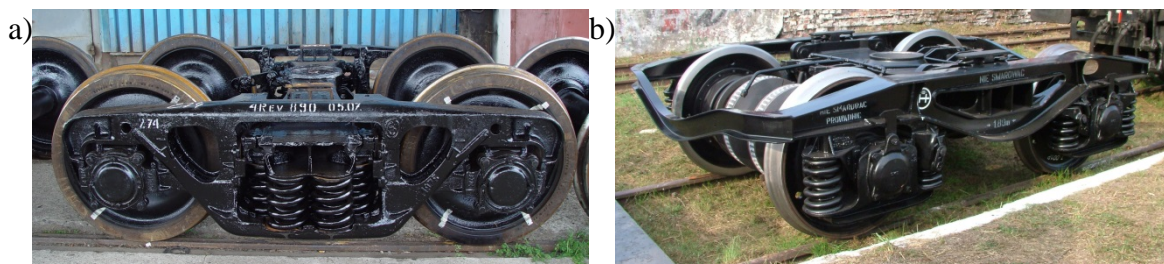


Rys. 2. a) Stanowisko wymiany wózków wagonowych, b) Suwnice bramowe do obsługi stanowisk przestawczych (Zdj.: M. Szkoda)



Rys. 3. Torowe stanowisko przestawcze systemu SUW 2000 [28]

Odnośnie taboru kolejowego najistotniejsze różnice w zakresie oceny niezawodności dotyczą wózków wagonowych bezpośrednio odpowiedzialnych za bezpieczeństwo przewozów. W systemie 1 do realizacji przewozów po różnej szerokości torów wymagane są dwa komplety wózków przypisane do jednego wagonu: wózek typ 2XTa na tor 1435 mm (rys. 4a) i wózek typ 18-100 na tor 1520 mm, które wymieniane są w punkcie granicznym. W systemie 2 natomiast, stosowany jest jeden rodzaj wózków typu 4RS/N (rys. 4b) wyposażony w zestawy kołowe o zmiennym rozstawie kół, umożliwiające kursowanie wagonu po sieci kolejowej 1435 i 1520 mm.



Rys. 4. a) Wózek wagonowy typu 2XTa na tor 1435 mm, b) Wózek wagonowy typu 4RS/N na tor 1435/1520 mm (Zdj.: M. Szkoda)

W celu zapewnienia użytecznego charakteru pracy, przy formułowaniu założeń niezbędnych do przeprowadzenia oceny niezawodności, gotowości i podatności utrzymaniowej, nawiązano do stanu aktualnego w Punkcie Komunikacji Przystankowej PKP Cargo S.A., zlokalizowanym na największym kolejowym polsko-ukraińskim przejściu granicznym Medyka/Mostiska. Założenia do analizy zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Założenia do analizy niezawodnościowej

L.p.	ELEMENT	ZAŁOŻENIA
1	Rodzaj przewożonego ładunku	Materiały niebezpieczne w wagonach cysternach
2	Ilość wagonów przestawianych w punkcie granicznym	5.483,0 [wag./rok]
3	Ładowność przestawianego wagonu	48,0 [ton]
4	Obrót wagonu: - system 1 - system 2	10,6 [dni] 8,0 [dni]
5	Odległość przewozu (w jedną stronę, połowa po torze 1435 mm i połowa po 1520 mm)	1.100,0 km

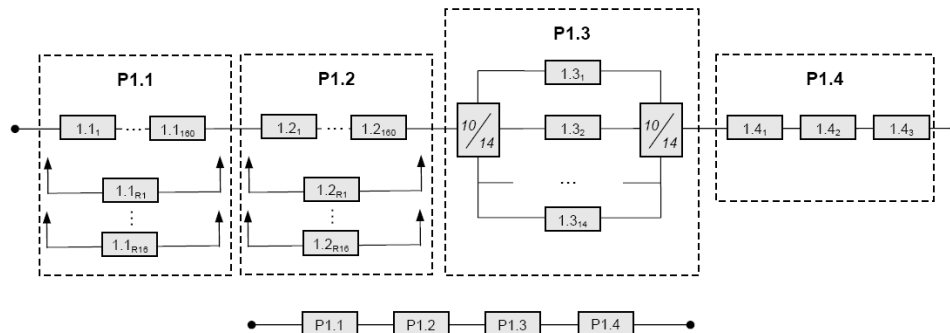
W tabeli 2, dla przyjętej odległości transportowej, obliczono zapotrzebowanie na środki transportowe, w tym wózki wagonowe zaangażowane do realizacji przewozów w jednym i drugim systemie. Mniejsze zapotrzebowanie w systemie 2 wynika ze znacznie krótszego procesu obsługi w punkcie granicznym.

Tabela 2. Wymagana ilość wózków wagonowych

System \ Parametr	Obrót wagonu [dni]	Zapotrzebowanie na wagony [szt.]	Wymagana ilość wózków wagonowych [szt.]	Roczny przebieg wagonu [km/rok]
System 1	10,6	80	160 (na tor 1435) 160 (na tor 1520)	75.456,0 km
System 2	8,0	60	120	100.521,0 km

Powyższe założenia, w połączeniu z analizą stanu rzeczywistego, umożliwiają określenie struktur niezawodnościowych analizowanych systemów. Do opisu niezawodnościowego wykorzystano różne struktury: szeregową, z rezerwą przesuwającą się oraz progową typu k z n . Metodyczne podstawy oceny niezawodności układów z rezerwą przesuwającą się i typu k z n przedstawiono między innymi w pracy [34].

Struktura niezawodnościowa systemu 1 (rys. 5) została odwzorowana poprzez szeregowo połączenie czterech podsystemów P1.1, P1.2, P1.3 i P1.4:



Rys. 5. Struktura niezawodnościowa systemu 1

Oznaczenia z rysunku 5:

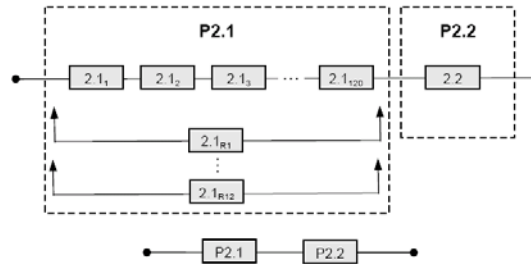
P1.1, P1.2, P1.3, P1.4 – podsystemy systemu 1,

1.1_i, 1.2_i, 1.3_i, 1.4_i – elementy wchodzące w skład systemu 1 (1.1 – wózki wagonowe typu 2XTa, 1.2 – wózki wagonowe typu 18-100, 1.3 – stanowiska wymiany wózków, 1.4 – suwnice bramowe).

- Podsystem P1.1 składa się łącznie ze 176 wózków typu 2XTa na tor 1435 mm (element 1.1), które tworzą strukturę niezawodnościową z rezerwą przesuwającą się o krotności rezerwowania $k = 10$. Oznacza to, że dla 160 wózków podstawowych założono rezerwę eksploatacyjną 16 elementów, z których każdy może zastąpić dowolny wózek podstawowy w przypadku jego uszkodzenia;
- Podsystem P1.2 składa się łącznie ze 176 wózków typu 18-100 na tor 1520 mm (element 1.2), które analogicznie jak podsystem P1.1, odwzorowano strukturą niezawodnościową z rezerwą przesuwającą się o krotności rezerwowania $k = 10$. W analizie podsystemów P1.1 i P1.2 zakłada się, że wózki rezerwowe nie mogą ulec uszkodzeniom, gdy nie pracują i że przebywanie wózka w stanie, w którym nie pracuje nie wpływa na jego niezawodność. Poza tym zakłada się, że czas w przeciągu, którego wózek uszkodzony zostaje zamienionym elementem rezerwowym, jest praktycznie równy zeru;
- Podsystem P1.3 składa się z 14 stanowisk wymiany wózków (element 1.3), które odwzorowano jako strukturę progową typu 10 z 14. Do uzyskania założonej rocznej ilości przestawianych wagonów w punkcie granicznym, niezbędnych jest co najmniej 10 stanowisk. Struktura progowa 10 z 14 oznacza, że podsystem P1.3 znajduje się w stanie poprawnej pracy, kiedy co najmniej 10 z 14 stanowisk wymiany wózków prawidłowo wykonuje przypisane im funkcje;
- Podsystem P1.4 składa się z 3 suwnic bramowych (element 1.4), które odwzorowano za pomocą struktury niezawodnościowej szeregowej.

Struktura niezawodnościowa systemu 2 (rys. 6) została odwzorowana poprzez szeregowo połączenie dwóch podsystemów P2.1 i P2.2:

- Podsystem P2.1 składa się łącznie ze 132 wózków typu 4RS/N na tor 1435 i 1520 mm (element 2.1), które tworzą strukturę niezawodnościową z rezerwą przesuwającą się o krotności rezerwowania $k = 10$. Oznacza to, że dla 120 wózków 4RS/N założono rezerwę eksploatacyjną 12 elementów, z których każdy może zastąpić dowolny wózek podstawowy w przypadku jego uszkodzenia. Podobnie jak dla podsystemów P1.1 i P1.2 w systemie 1 zakłada się, że czas w przeciągu, którego uszkodzony wózek zostaje zamienionym elementem rezerwowym jest równy zeru;
- Podsystem P2.2 składa się z jednego torowego stanowiska przestawczego (element 2.2).



Rys. 6. Struktura niezawodnościowa systemu 2

Oznaczenia z rysunku 6:

- P2.1, P2.2 – podsystemy systemu 2,
- 2.1_i, 2.2 – elementy wchodzące w skład systemu 2 (2.1 – wózki wagonowe typu 4RS/N z zestawami przestawnymi, 2.2 – torowe stanowisko przestawcze).

3.4 Wskaźniki niezawodnościowe zastosowane w analizie

Kolejowe systemy przestawcze można analizować na różnych poziomach złożoności. W odniesieniu do elementu, podsystemu i systemu przypisano odpowiednie wskaźniki niezawodnościowe związane z nieuszkodzalnością, gotowością i podatnością utrzymaniową, w tym między innymi:

- Dystrybucję czasu pracy do pierwszego uszkodzenia $F(t)$,
- Intensywność strumienia uszkodzeń $z(t)$,
- Funkcję odnowy w cyklu utrzymania $H(t)$,
- Oczekiwany czas pracy do pierwszego uszkodzenia $MTTF$,
- Oczekiwany czas pracy między uszkodzeniami $MTBF_k$,
- Wskaźnik gotowości operacyjnej A_o ,
- Wskaźnik gotowości technicznej A ,
- Średni skumulowany czas przestoju systemu $MADT$,
- Dystrybucję czasu usuwania uszkodzenia $G(t)$,
- Oczekiwany czas usuwania uszkodzenia $MTTR_B$,
- Oczekiwany czas przeglądu okresowego $MTTM_P$,
- Oczekiwany czas naprawy rewizyjnej $MTTM_N$.

Definicje i oznaczenia zastosowanych wskaźników przyjęto zgodnie z normą PN-EN 50126 oraz PN-EN 61703 [19, 20], a w obliczeniach wykorzystano możliwości pakietów: Statistica, MiniTab i BlockSim. Ze względu na szeroki zakres przeprowadzonych analiz, w punktach 3.4.1 ÷ 3.4.3 przedstawiono wyłącznie obliczenia wybranych wskaźników zastosowanych do porównania analizowanych systemów.

3.4.1 Wskaźniki nieuszkodzalności

Do porównania nieuszkodzalności systemów zastosowano wskaźnik średniej liczby uszkodzeń w roku eksploatacji (MNF), który w odniesieniu do pojedynczego elementu zdefiniowano następująco:

$$MNF_i = \left(\frac{H_i(t)}{T_i} \right) \cdot 8.760,0 \left[\text{uszk./rok} \right] \quad (1)$$

gdzie:

MNF_i – średnia liczba uszkodzeń elementu „i” w roku eksploatacji,
 $H_i(t)$ – funkcja odnowy elementu „i” w cyklu utrzymania,
 T_i – czas eksploatacji elementu „i” w cyklu utrzymania (w godz.).

W powyższym wzorze zastosowano funkcję odnowy $H(t)$, która przy założeniu, że czas trwania odnowy jest pomijalnie mały w stosunku do czasu poprawnej pracy obiektu wyraża oczekiwaną liczbę odnow równoważną z liczbą uszkodzeń do chwili t i definiowana jest następująco [8]:

$$H(t) = \sum_{n=1}^{\infty} F_n(t) \quad (2)$$

gdzie:

$F_n(t)$ – dystrybuanta czasu pracy obiektu do wystąpienia n-tego uszkodzenia (odnowy)

Dla systemu 1, średnia liczba uszkodzeń w roku eksploatacji (MNF_1) jest sumą uszkodzeń czterech podsystemów:

$$\begin{aligned} MNF_1 &= MNF_{P1.1} + MNF_{P1.2} + MNF_{P1.3} + MNF_{P1.4} = \\ &= \left(\frac{H_{P1.1}(t)}{T_{1.1}} + \frac{H_{P1.2}(t)}{T_{1.2}} + \frac{H_{P1.3}(t)}{T_{1.3}} + \frac{H_{P1.4}(t)}{T_{1.4}} \right) \cdot 8.760,0 \left[\text{uszk./rok} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

gdzie:

$H_{P1.1}(t) \div H_{P1.4}(t)$ – funkcje odnowy podsystemów P1.1 ÷ P1.4,
 $T_{1.1} \div T_{1.4}$ – czas eksploatacji podsystemów P1.1 ÷ P1.4 w cyklu utrzymania (w godz.).

Uwzględniając licznosc wozków typu 2XTa i 18-100 wraz z elementami rezerwowymi funkcja odnowy podsystemu P1.1 i P1.2 wynosi:

$$H_{P1.1}(t) = H_{P1.2}(t) = \sum_{i=1}^{176} H_{1.1}(t) = \sum_{i=1}^{176} H_{1.2}(t), \quad \text{dla } 0 < t \leq 34.960 \text{ [godz.]} \quad (4)$$

gdzie:

$H_{1.1}(t)$, $H_{1.2}(t)$ – funkcja odnowy elementu 1.1 i 1.2 (wozek typu 2XTa i 18-100) w cyklu utrzymania:

$$\begin{aligned} H_{1.1}(t) = H_{1.2}(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} F_n(t) = F_1(t) + F_2(t) = \\ &= \left[0,5 \left(1 + \Phi \left(\frac{t - 18104}{6887\sqrt{2}} \right) \right) \right] + \left[0,5 \left(1 + \Phi \left(\frac{\ln(t) - 11,269}{0,7822\sqrt{2}} \right) \right) \right] \quad \text{dla } 0 \leq t \leq 34.894 \text{ [godz.]} \end{aligned} \quad (5)$$

gdzie:

$$\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-t^2) dt - \text{funkcja rozkładu Gaussa}$$

Uwzględniając licznosc stanowisk wymiany wozkow (element 1.3) funkcja odnowy podsystemu P1.3 wynosi:

$$H_{P1.3}(t) = \sum_{i=1}^{14} H_{1.3}(t), \quad \text{dla } 0 \leq t \leq 4.218 [\text{godz.}] \quad (6)$$

gdzie:

$H_{1.3}(t)$ – funkcja odnowy elementu 1.3 w cyklu utrzymania:

$$\begin{aligned} H_{1.3}(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} F_n(t) = F_1(t) + F_2(t) + F_3(t) + F_4(t) = \left[1 - 1090,06 \times 10^{-3} \cdot \Gamma\left(1,203; \frac{t}{1441}\right) \right] + \\ &+ \left[1 - \exp(-4,0973 \times 10^{-7} \cdot t^{1,7056}) \right] + \left[\frac{1}{1 + \exp(-0,00122 \cdot (t - 5462,92))} \right] + \\ &+ \left[0,5 \left(1 + \Phi\left(\frac{t - 7382,96}{2102,68\sqrt{2}}\right) \right) \right] \quad \text{dla } 0 \leq t \leq 4.218 [\text{godz.}] \end{aligned} \quad (7)$$

gdzie:

$$\Gamma\left(1,203; \frac{t}{1441}\right) = \int_{\frac{t}{1441}}^{+\infty} t^{0,203} \cdot e^{-t} dt - \text{niepełna funkcja gamma}$$

$$\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-t^2) dt - \text{funkcja rozkładu Gaussa}$$

Uwzględniając licznosc suwnic bramowych (element 1.4) funkcja odnowy podsystemu P1.4 wynosi:

$$H_{P1.4}(t) = \sum_{i=1}^3 H_{1.4}(t), \quad \text{dla } 0 \leq t \leq 8.504 [\text{godz.}] \quad (8)$$

gdzie:

$H_{1.4}(t)$ – funkcja odnowy elementu 1.4 w cyklu utrzymania:

$$\begin{aligned} H_{1.4}(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} F_n(t) = F_1(t) + F_2(t) + F_3(t) + F_4(t) + F_5(t) + F_6(t) + F_7(t) = \\ &= \left[1 - \exp(-2,878 \times 10^{-4} \cdot t^{1,104}) \right] + \left[1 - 9242,48 \times 10^{-4} \cdot \Gamma\left(2,166; \frac{t}{1465}\right) \right] + \\ &+ \left[0,5 \left(1 + \Phi\left(\frac{\ln(t) - 8,231}{0,5238\sqrt{2}}\right) \right) \right] + \left[1 - \exp(-1,866 \times 10^{-10} \cdot t^{2,5681}) \right] + \left[0,5 \left(1 + \Phi\left(\frac{t - 6991,75}{2079,25\sqrt{2}}\right) \right) \right] + \\ &+ \left[0,5 \left(1 + \Phi\left(\frac{\ln(t) - 9,0647}{0,4212\sqrt{2}}\right) \right) \right] + \left[1 - \exp(-1,393 \times 10^{-18} \cdot t^{4,4912}) \right] \quad \text{dla } 0 \leq t \leq 8.504 [\text{godz.}] \end{aligned} \quad (9)$$

Podstawiając (5), (7) i (9) do zależności (3) średnia liczba uszkodzeń w roku eksploatacji systemu 1 wynosi:

$$MNF_1 = \left(\frac{201,2}{35.040,0} + \frac{201,2}{35.040,0} + \frac{22,9}{8.760,0} + \frac{16,6}{17.520,0} \right) \cdot 8.760,0 = 131,8 \quad \left[\frac{uszk.}{rok} \right] \quad (10)$$

Dla systemu 2, średnia liczba uszkodzeń w roku eksploatacji (MNF_2), jest związana wyłącznie z uszkodzeniami wózków typu 4RS/N i wynosi:

$$MNF_2 = MNF_{P2.1} = \frac{H_{P2.1}(t)}{T_{2.1}} \cdot 8.760,0 \quad \left[\frac{uszk.}{rok} \right] \quad (11)$$

gdzie:

$H_{P2.1}(t)$ – funkcja odnowy podsystemu P2.1,

$T_{2.1}$ – czas eksploatacji podsystemu P2.1 w cyklu utrzymania (w godz.).

Uwzględniając licznosc wózków 4RS/N (element 2.1) wraz z wózkami rezerwowymi, funkcja odnowy podsystemu P2.1:

$$H_{P2.1}(t) = \sum_{i=1}^{132} H_{2.1}(t) \quad \text{dla } 0 \leq t \leq 8.140 \text{ [godz.]} \quad (12)$$

gdzie:

$H_{2.1}(t)$ – funkcja odnowy elementu 2.1 (wózek 4RS/N) w cyklu utrzymania:

$$H_{2.1}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} F_n(t) = F_1(t) + F_2(t) + F_3(t) = \left[1 - \exp(-10,9 \times 10^{-4} \cdot t) \right] + \\ + \left[1 - \exp(16,16 \times 10^{-5} \cdot t) \right] + \left[0,5 \left(1 + \Phi \left(\frac{t - 21520,9}{10734,2\sqrt{2}} \right) \right) \right], \quad \text{dla } 0 \leq t \leq 31.191 \text{ [godz.]} \quad (13)$$

gdzie:

$$\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-t^2) dt \quad \text{– funkcja rozkładu Gaussa}$$

Stąd, średnia liczba uszkodzeń w roku eksploatacji systemu 2 wynosi:

$$MNF_2 = \frac{H_{P2.1}(t)}{T_{2.1}} = \left(\frac{370,9}{8760} \right) \cdot 8.760,0 = 370,9 \quad \left[\frac{uszk.}{rok} \right] \quad (14)$$

3.4.2 Ocena gotowości technicznej

Zakładając, że wszystkie elementy pracujące w systemie są opisane identycznymi funkcjami rozkładu prawdopodobieństwa czasu pracy oraz czasu naprawy, gotowość systemu $A(t)$ można opisać następującą funkcją [8]:

$$A(t) = 1 - F(t) + \int_0^t [1 - F(t - \tau)] h(\tau) d\tau \quad (15)$$

gdzie:

$$h(t) - \text{funkcja gęstości odnowy: } h(t) = \frac{H(t)}{dt}$$

Powyższy wzór praktycznie rzadko jest wykorzystywany w praktyce ze względu na znaczny stopień komplikacji obliczeń. Zwykle stosuje się tzw. wskaźnik gotowości technicznej, definiowany jako średni udział czasu, w którym badany system przebywa w stanie zdatności [12]:

$$A(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) \quad (16)$$

Do porównania gotowości technicznej analizowanych systemów zastosowano wskaźniki gotowości technicznej A i wskaźnik skumulowanego czasu przestoju systemu w roku eksploatacji $MADT$ (*Mean Accumulated Down Time*). Wskaźnik A przedstawia wartość średnią gotowości technicznej w cyklu utrzymania, pomiędzy kolejnymi naprawami rewizyjnymi, analizowanych obiektów. W odniesieniu do pojedynczego obiektu wskaźnik gotowości zdefiniowano następująco:

$$A_i = \frac{TZ_i}{TZ_i + TN_i + TO_i} \quad (17)$$

gdzie:

TZ_i – średni czas przebywania obiektu „i” w stanie zdatności (w godz.),

TN_i – średni czas przebywania obiektu „i” w stanie niezdatności z powodu napraw bieżących (w godz.),

TO_i – średni czas przebywania obiektu „i” w stanie niezdatności z powodu obsługi profilaktycznych (w godz.).

Natomiast wskaźnik skumulowanego czasu przestoju obiektu w roku eksploatacji $MADT$:

$$MADT_i = 8.760,0 \cdot (1 - A_i) \quad [\text{godz./rok}] \quad (18)$$

Dla systemu 1, wskaźnik gotowości jest iloczynem gotowości czterech podsystemów P1.1, P1.2, P1.3 i P1.4:

$$A_I = A_{P1.1} \cdot A_{P1.2} \cdot A_{P1.3} \cdot A_{P1.4} \quad (19)$$

Dla podsystemów P1.1 i P1.2, uwzględniając licznosc wozków oraz struktura niezawodnościową z rezerwą przesuwającą się [18]:

$$A_{P1.1} = A_{P1.2} = \prod_{i=1}^n (1 - (1 - A_{I,1})^{k+i}) = \prod_{i=1}^{160} (1 - (1 - 0,9991)^{16+i}) \approx 1,0 \quad (20)$$

gdzie:

n – liczba wozków podstawowych w strukturze podsystemu P1.1 (P1.2),

k – liczba wozków rezerwowych w strukturze podsystemu P1.1 (P1.2),

$A_{1,1}$ – wskaźnik gotowości technicznej wozka 2XTa (18-100).

Dla podsystemu P1.3, uwzględniając licznosc stanowisk oraz strukture niezawodnosciaową progowa typy 10 z 14 [37]:

$$A_{P1.3} = \sum_{i=k}^n \binom{n}{i} A_{1.3}^i (1 - A_{1.3})^{n-i} = \sum_{i=10}^{14} \binom{14}{i} 0,9710^i (1 - 0,9710)^{14-i} = 0,9999 \quad (21)$$

gdzie:

n – liczba wszystkich stanowisk wymiany wozków w strukturze podsystemu P1.3,
k – wymagana liczba stanowisk niezbedna do poprawnej pracy podsystemu P1.3,
 $A_{1.3}$ – wskaźnik gotowosci technicznej stanowiska wymiany wozków.

Dla podsystemu P1.4, uwzględniając licznosc suwnic oraz szeregową strukture niezawodnosciaową:

$$A_{P1.4} = \prod_{i=1}^n A_{1.4i} = (0,9615)^3 = 0,8889 \quad (22)$$

gdzie:

n – liczba suwnic bramowych w strukturze podsystemu P1.4,
 $A_{1.4}$ – wskaźnik gotowosci technicznej suwnicy.

Podstawiając (20), (21) i (22) do zaleznosci (19), wskaźnik gotowosci technicznej systemu 1 wynosi:

$$A_1 = A_{P1.1} \cdot A_{P1.2} \cdot A_{P1.3} \cdot A_{P1.4} = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,9999 \cdot 0,8889 = 0,8888 \quad (23)$$

Natomiast skumulowany czas przestoju w roku eksploatacji systemu 1:

$$MADT_1 = 8.760,0 \cdot (1 - A_1) = 8.760,0 \cdot (1 - 0,8888) = 973,8 \text{ [godz./rok]} \quad (24)$$

Dla systemu 2, wskaźnik gotowosci technicznej jest iloczynem gotowosci dwuch podsystemow P2.1 i P2.2:

$$A_2 = A_{P2.1} \cdot A_{P2.2} \quad (25)$$

Dla podsystemu P2.1, uwzględniając licznosc wozków 4RS/N oraz strukture niezawodnosciaową z rezerwa przesuwajaca się, wskaźnik wynosi:

$$A_{P2.1} = \prod_{i=1}^n (1 - (1 - A_{2.1})^{k+i}) = \prod_{i=1}^{120} (1 - (1 - 0,9954)^{12+i}) \approx 1,0 \quad (26)$$

gdzie:

n – liczba wozków podstawowych w strukturze podsystemu 2.1,
k – liczba wozków rezerwowych w strukturze podsystemu 2.1,
 $A_{2.1}$ – wskaźnik gotowosci technicznej wozka 4RS/N.

Dla podsystemu P2.2, który składa się z jednego torowego stanowiska przestawczego, wskaźnik gotowości technicznej równy jest gotowości elementu 2.2:

$$A_{P2.2} = A_{2.2} = 0,9977 \quad (27)$$

Podstawiając (26) i (27) do zależności (25), wskaźnik gotowości systemu 2 wynosi:

$$A_2 = A_{2.1} \cdot A_{2.2} = 1,0 \cdot 0,9977 = 0,9977 \quad (28)$$

Skumulowany czas przestoju systemu 2 wynosi:

$$MADT_2 = 8.760,0 \cdot (1 - A_2) = 8.760,0 \cdot (1 - 0,9977) = 20,2 \text{ [godz./rok]} \quad (29)$$

3.4.3 Wskaźniki podatności utrzymaniowej

Do porównania podatności utrzymaniowej systemów zastosowano wskaźnik średniego czasu obsługi technicznych w roku eksploatacji (MMT), który uwzględnia całkowity czas poświęcony na utrzymanie bieżące i utrzymanie profilaktyczne systemu. W odniesieniu do pojedynczego elementu wskaźnik ten zdefiniowano następująco:

$$MMT_i = \left(\frac{(H_i(t) \cdot MTTR_{Bi}) + (NPMA_{Pi} \cdot MTTM_{Pi}) + (NPMA_{Ni} \cdot MTTM_{Ni})}{T_i} \right) \cdot 8.760,0 \text{ [godz./rok]} \quad (30)$$

gdzie:

$H_i(t)$ – funkcja odnowy elementu „i” w cyklu utrzymania,
 $MTTR_{Bi}$ – oczekiwany czas usuwania uszkodzenia elementu „i” (w godz.),
 $NPMA_{Pi}$ – ilość przeglądów okresowych elementu „i” w cyklu utrzymania,
 $MTTM_{Pi}$ – oczekiwany czas przeglądu okresowego elementu „i” (w godz.),
 $NPMA_{Ni}$ – ilość napraw rewizyjnych elementu „i” w cyklu utrzymania,
 $MTTM_{Ni}$ – oczekiwany czas naprawy rewizyjnej elementu „i” (w godz.),
 T_i – czas eksploatacji elementu „i” w cyklu utrzymania (w godz.).

Dla systemu 1, średni czas obsługi technicznych w roku eksploatacji (MMT_1) jest sumą czasów obsługi technicznych czterech podsystemów i wynosi:

$$MMT_1 = MMT_{P1.1} + MMT_{P1.2} + MMT_{P1.3} + MMT_{P1.4} \text{ [godz./rok]} \quad (31)$$

Uwzględniając licznosc wozków typu 2XTa i 18-100, czas obsługi technicznych w roku eksploatacji dla podsystemu P1.1 i P1.2 wynosi:

$$MMT_{P1.1} = MMT_{P1.2} = \left[176 \cdot \left(\frac{(1,1431 \cdot 5,9) + (1 \cdot 6,0) + (1 \cdot 19,5)}{35.040,0} \right) \right] \cdot 8.760 = 1.418,9 \text{ [godz./rok]} \quad (32)$$

Uwzględniając licznosc stanowisk wymiany wozków, czas obsługi technicznych w roku eksploatacji dla podsystemu P1.3 wynosi:

$$MMT_{P1.3} = \left[14 \cdot \left(\frac{(1,634 \cdot 11,2) + (12 \cdot 6,5) + (1 \cdot 29,6)}{8.760,0} \right) \right] \cdot 8.760,0 = 1.762,6 \left[\frac{\text{godz.}}{\text{rok}} \right] \quad (33)$$

Uwzględniając licznosc suwnic bramowych, czas obslug technicznych w roku eksploatacji dla podsystemu P1.4 wynosi:

$$MMT_{P1.4} = \left[3 \cdot \left(\frac{(5,5263 \cdot 9,3) + (23 \cdot 11,0) + (1 \cdot 36,0)}{17.520,0} \right) \right] \cdot 8.760,0 = 573,1 \left[\frac{\text{godz.}}{\text{rok}} \right] \quad (34)$$

Podstawiając (32), (33) i (34) do zależności (31) otrzymujemy:

$$MMT_1 = MMT_{P1.1} + MMT_{P1.2} + MMT_{P1.3} + MMT_{P1.4} = 5.137,2 \left[\frac{\text{godz.}}{\text{rok}} \right] \quad (35)$$

Dla systemu 2, średni czas obslug technicznych w roku eksploatacji (MMT_2) jest sumą czasów obslug dwóch podsystemów i wynosi:

$$MMT_2 = MMT_{P2.1} + MMT_{P2.2} \left[\frac{\text{godz.}}{\text{rok}} \right] \quad (36)$$

Uwzględniając licznosc wózków typu 4RS/N, średni czas obslug technicznych w roku eksploatacji dla podsystemu P2.1 wynosi:

$$MMT_{P2.1} = \left[132 \cdot \left(\frac{(8,4291 \cdot 7,9) + (3 \cdot 7,0) + (1 \cdot 25,2)}{35.040,0} \right) \right] \cdot 8.760,0 = 3.722,1 \left[\frac{\text{godz.}}{\text{rok}} \right] \quad (37)$$

Dla podsystemu P2.2 natomiast:

$$MMT_{P2.2} = \left[1 \cdot \left(\frac{(2 \cdot 5,0)}{4.380,0} \right) \right] \cdot 8.760,0 = 20,0 \left[\frac{\text{godz.}}{\text{rok}} \right] \quad (38)$$

Podstawiając (37) i (38) do zależności (36), średni czas obslug technicznych w roku eksploatacji dla systemu 2 wynosi:

$$MMT_2 = MMT_{P2.1} + MMT_{P2.2} = 3.742,1 \left[\frac{\text{godz.}}{\text{rok}} \right] \quad (39)$$

4. Podsumowanie

Tematem pracy była ocena porównawcza nieuszkodzalności, gotowości i podatności utrzymaniowej dwóch kolejowych systemów przestawczych: systemu wymiany wózków wagonowych i systemu samoczynnie rozsuwanych zestawów kołowych SUW 2000. Analizując wyniki przeprowadzonych obliczeń, należy mieć na uwadze fakt, że eksploatacja nadzorowana systemu SUW 2000 dotyczyła rozwiązania prototypowego. Podczas badań tego rozwiązania występowało wiele uszkodzeń wywołanych błędami konstrukcyjnymi, które będą wyeliminowane w nowej, ulepszonej wersji zestawu przestawnego. Na podstawie przeprowadzonej analizy nasuwają się następujące spostrzeżenia:

- System SUW 2000 charakteryzuje wyższą uszkodzalnością w stosunku do systemu wymiany wózków wagonowych. Średnia liczba uszkodzeń tego systemu w ciągu roku

eksploatacji (*MNF*) jest ponad dwukrotnie większa. Wpływ na to mają uszkodzenia wózków typu 4RS/N, zwłaszcza płaskie miejsca na powierzchni tocznej kół, które najczęściej występowały podczas eksploatacji nadzorowanej;

- System SUW 2000 charakteryzuje się wyższym wskaźnikiem gotowości technicznej (*A*) i ponad 40-krotnie krótszym skumulowanym czasem przestojów technicznych (*MADT*) w porównaniu do systemu wymiany wózków. Przeprowadzone obliczenia wykazują jednak, że w celu zapewnienia wysokiej gotowości tego systemu w rzeczywistej eksploatacji, zachodzi konieczność posiadania co najmniej 10% rezerwy eksploatacyjnej wózków z zestawami przestawnymi;
- W zakresie podatności utrzymaniowej, dzięki zastąpieniu rozbudowanego i kosztownego w utrzymaniu wyposażenia technicznego punktu wymiany wózków (stanowiska Kutruffa, suwnice bramowe i inne) przez niezawodne o wysokiej gotowości torowe stanowisko przestawcze, średni czas obsługi technicznych systemu SUW 2000 w roku eksploatacji (*MMT*) jest blisko o 30% krótszy w porównaniu do systemu wymiany wózków.

Przeprowadzona analiza, oparta na rzetelnych danych z eksploatacji nadzorowanej wykazała, że w przyszłości system SUW 2000 może stanowić alternatywną metodę pokonania bariery różnej szerokości toru w przewozie materiałów niebezpiecznych w stosunku do aktualnie stosowanej wymiany wózków wagonowych. Kolejnym etapem prac związanych z oceną możliwości zastosowania systemu SUW 2000 powinna być ocena efektywności z wykorzystaniem analizy kosztów cyklu życia LCC (Life Cycle Costs).

Literatura

1. Adamkiewicz W, Hempel L, Podsiadło A, Śliwiński R. Badania i ocena niezawodności maszyny w systemie transportowym. WKiŁ, Warszawa 1983.
2. Analiza organizacyjno-ekonomiczna wariantów przewozów produktów naftowych na kolejach o różnej szerokości torów. Projekt badawczy nr 186ZS. Politechnika Krakowska, Instytut Pojazdów Szynowych, Kraków 1995.
3. Automatic Gauge Changeover Systems. Projekt International Union of Railways UIC 2006-2013 (dostępny z: <http://www.uic.org/spip.php?article2927>).
4. Basiewicz T, Gołaszewski A, Towpik K. Nowa technologia na kolejach o różnej szerokości torów. Problemy Kolejnictwa 2007; 144: 5-19.
5. Diomin J, Romanowska K. Techniczne problemy przewozów kolejowych Wschód – Zachód. Przegląd Komunikacyjny 2008; 6: 3-7.
6. DoD Guide for Achieving Reliability, Availability and Maintainability, Department of Defense. United States of America, Washington DC, 2005.
7. Economic study into investment in an automatic rail gauge change system within Pan-corridor 1. Projekt Europejskiej Inicjatywy Eureka: E!2353 RAIL GAUGE CHANGE, Centrum Naukowo-Techniczne Kolejnictwa, Warszawa 2003.
8. Gniedenko B W, Bielajew J K, Sołowiew A D. Metody matematyczne w teorii niezawodności. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1968.
9. Herder P M, van Luijk J A, Bruijnooge J. Industrial application of RAM modeling development and implementation of a RAM simulation model for the Lexan plant at GE Industrial, Plastics. Reliability Engineering & System Safety 2008; 93: 501-508.

10. Interoperability, security and safety of goods movement with 1435 and 1520 (1524) mm track gauge railways: new technology in freight transport including hazardous products. Projekt 6 Programu Ramowego INTERGAUGE nr TST4-2005-516205, 2006-2008.
11. Jackson Y, Tabbagh P, Gibson P, Seglie E. The new Department of Defense (DoD) guide for achieving and assessing RAM. Reliability and Maintainability Symposium. Proceedings Annual IEEE 2005: 1-7.
12. Kopociński B. Zarys teorii odnowy i niezawodności. PWN, Warszawa, 1973.
13. Kwang-Woo Ch, Chul-Su K, Seung-Ho J. Technical Evaluation of Railway Transportation System with the Change of Gauge. Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society 2012; 13(5): 1954-1962.
14. Manzini R, Regattieri A, Pham H, Ferrari E. Maintenance for Industrial Systems. Springer, 2010.
15. Martorella S, Villanueva J F, Carlosa S, Nebota Y, Sanchezb A, Pitarcha J L, Serradell V. RAMS+C informed decision-making with application to multi-objective optimization of technical specifications and maintenance using genetic algorithms. Reliability Engineering & System Safety 2005; 87: 65-75.
16. Młynarski S, Oprzędkiewicz J. Systemowe rozwiązania zapewnienia bezpieczeństwa i niezawodności obiektów technicznych. Problemy Eksploatacji 2012; 3: 39-54.
17. O'Connor P. Practical Reliability Engineering, 4th Edition. John Wiley & Sons Ltd., 2010.
18. Oprzędkiewicz J. Podstawowe zagadnienia niezawodności narzędzi zmechanizowanych. Zeszyty Naukowe AGH, Kraków, 1972; 48(72).
19. PN-EN 50126 Zastosowania kolejowe – Specyfikacja niezawodności, dostępności, podatności utrzymaniowej i bezpieczeństwa.
20. PN-EN 61703 Wyrażenia matematyczne dotyczące nieuszkodzalności, gotowości, obsługiwalności i zapewnienia środków obsługi.
21. Projekt ujednoczonych wymagań dla kolejowych środków transportowych do przewozu materiałów płynnych po torach o szerokości 1435/1520 mm. Projekt badawczy nr 187ZS. Politechnika Krakowska, Instytut Pojazdów Szynowych, Kraków 1995.
22. Regmi M B, Hanaoka S. Assessment of intermodal transport corridors: Cases from North-East and Central Asia. Research in Transportation Business & Management 2012; 5: 27–37.
23. Review of developments in transport in Asia and the Pacific 2011. Raport The United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific (ESCAP) (dostępny z: <http://www.unescap.org/>).
24. Sharma R K, Kumar D, Kumar P. Performance modeling in critical engineering systems using RAM analysis. Reliability Engineering & System Safety 2008; 93: 891-897.
25. Sharma S P, Kumar D. RAM analysis of repairable industrial systems utilizing uncertain data. Applied Soft Computing 2010; 10(4): 1208-1221.

26. Smith D J. Reliability, Maintainability and Risk: Practical Methods for Engineers, 8th Edition. Butterworth-Heinemann, 2011.
27. Stukalina O, Dzhaleva-Chonkova A. Problems of rail connections between Ukraine and its neighbouring countries. Mechanics Transport Communications 2012; 10(3/2): 3.4-3.8.
28. Suwalski R M. System samoczynnej zmiany rozstawu kół pojazdów szynowych. Rozprawy Monografie. Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Techniczne AGH 2006; 154.
29. Szkoda M, Tulecki A. Decision models in effectiveness evaluation of Europe-Asia transportation systems. The 8-th World Congress on Railway Research WCRR 2008, Seoul, Korea, Article number G.3.3.4.2.
30. Szkoda M. Analiza organizacyjno-ekonomiczna możliwości zastosowania systemu automatycznej zmiany rozstawu kół w przewozach towarowych Wschód-Zachód. Problemy Eksploatacji 2003; 2: 275-289.
31. Szkoda M. Analiza organizacyjno-ekonomiczna wariantów przewozów Wschód-Zachód ze zmianą szerokości torów. Praca dyplomowa nr DTT 135/02-SM. Politechnika Krakowska, Instytut Pojazdów Szynowych, Kraków 2002.
32. Szkoda M. Analysis of the 1435/1520 mm track gauge change systems in the aspects of reliability and efficiency. Problems of Maintenance of Sustainable Technological Systems. Committee on Machine Building, Maintenance Fundamentals Section, Polish Academy of Sciences 2010; 1: 190-202.
33. Szkoda M. Metoda oceny trwałości i niezawodności kolejowych systemów przestawczych. Rozprawa doktorska. Politechnika Krakowska, Kraków 2008.
34. Szybka J. Methodology for reliability estimation of systems with sliding reserve. Scientific Problems of Machines Operation and Maintenance 2010; 3(163): 65-73.
35. ten Wolde M, Ghobbar A A. Optimizing inspection intervals - Reliability and availability in terms of a cost model: A case study on railway carriers. Reliability Engineering & System Safety 2013; 114: 137-147.
36. Trans-Asian railway and the issue of break-of-gauge. Raport The United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific (ESCAP) (dostępny z: http://www.unescap.org/ttdw/common/TIS/TAR/break_of_gauge.asp).
37. Ważyńska-Fiok K, Jaźwiński J. Niezawodność systemów technicznych. PWN, Warszawa, 1990.
38. Zespoły ciągnowo-zderzne kolejowych środków transportowych dla relacji przewozowych Wschód-Zachód. Projekt celowy KBN nr 9T12C 031 96C/2980. Politechnika Krakowska, Instytut Pojazdów Szynowych, Kraków 2000.
39. Zio E. Reliability engineering: Old problems and new challenges. Reliability Engineering & System Safety 2009; 94(2): 125-141.
40. Демин, Ю В, Терещак Ю В. Подвижной состав для международных перевозок пассажиров и грузов по направлениям Восток-Запад. Вісник СЧУ ім. В. Даля 2010; 5(147): 167-171.