

# Zagadnienia modelowania niezawodności i bezpieczeństwa procesu przewozowego w systemie transportu szynowego

Franciszek J. RESTEL<sup>1</sup>

## Streszczenie

Największy poziom integracji procesów oraz ich harmonogramowania występuje w systemie transportu szynowego. W związku z tym pojawia się wiele problemów związanych z teoretycznym opisem rzeczywistego systemu. W artykule rozwinięto najbardziej istotne problemy powstające w badaniach niezawodności systemów kolejowych oraz motywację modelowania zdarzeń o małych skutkach. Wykazano, że zdarzenia o pozornie małym znaczeniu mają wpływ na powstanie poważnych wypadków kolejowych. Przeprowadzona inwentaryzacja źródeł informacji na temat zdarzeń niepożądanych w systemie transportu szynowego umożliwiła dokonanie podziału źródeł w zależności od rodzaju analizowanego problemu. Wskazano także na potencjał danych eksploatacyjnych zbieranych już w systemie wraz z przykładowymi modelami. W dalszych badaniach planowane jest opracowywanie modeli teoretycznych pozwalających na ocenę rozkładu jazdy, co z założenia umożliwi przeprowadzenie działań optymalizacyjnych podnoszących punktualność minimalizując jednocześnie niepotrzebne rezerwy czasowe. Artykuł jest syntezą dotychczasowych zrealizowanych badań niezawodności i bezpieczeństwa systemu transportu szynowego.

**Słowa kluczowe:** niezawodność, bezpieczeństwo, transport szynowy

## 1. Wstęp

System transportowy ma złożoną strukturę. Wynika to z realizowanych w nim zadań. Działania podejmowane w systemie można podzielić na dwie podstawowe grupy. Pierwszą grupę tworzą działania związane z transportem, drugą grupę – działania mające na celu utrzymanie zdatności systemu. Widoczne jest, że w systemie transportu szynowego zachodzą liczne procesy, które są ze sobą powiązane. Największy poziom integracji procesów oraz ich harmonogramowania występuje w przypadku systemu transportu szynowego.

Procesy przebiegające w systemie transportu szynowego są niezwykle złożone, podobnie jak sam system. Proces obsługi technicznej jest powiązany z procesem przewozowym, proces przewozowy z pracą węzłów przesiadkowych i punktów handlowych. Ruch pociągów wiąże się z potrzebą zabezpieczenia węzłów styku z pieszymi i samochodami.

W tym aspekcie niezawodnym procesem przewozowym jest ten, w którym są zachowane wymagania stawiane systemom logistycznym w postaci formuły 7R (*Right product, Right quantity, Right quality, Right place, Right time, Right customer, Right price*) [13].

Niezawodnie funkcjonujący system transportowy cechuje się zatem:

- dostępnością właściwych (zaplanowanych) produktów w ofercie przewozowej,
- właściwą wielkością realizowanych zadań przewozowych,
- właściwą jakością realizacji zadań przewozowych (bezpieczeństwo pasażerów i ładunków),
- właściwym miejscem dowozu, zgodnie z rozkładem jazdy (w tym także trasy przewozu),
- właściwym czasem realizacji (punktualność),
- właściwymi odbiorcami,
- właściwą ceną (zgodnie z taryfami przyjętymi przez przewoźników w planie przewozu).

W związku z tym pojawia się wiele problemów związanych z opisem rzeczywistego systemu. W dalszej części artykułu scharakteryzowano istotne problemy powstające w badaniach niezawodności systemów kolejowych oraz motywację modelowania zdarzeń o małych skutkach. Celem artykułu jest zatem identyfikacja najważniejszych aspektów systemowych i procesowych w modelowaniu niezawodności systemów transportu szynowego. Artykuł jest również

<sup>1</sup> Dr inż.; Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny; e-mail: franciszek.restel@pwr.edu.pl.

syntezą dotychczas przeprowadzonych badań nad zagadnieniami niezawodności i bezpieczeństwa systemu transportu szynowego.

## 2. Charakterystyka prac naukowych związanych z modelowaniem niezawodności systemów transportu szynowego

W [24] zinventaryzowano stan wiedzy na temat modelowania niezawodności i bezpieczeństwa systemu transportu szynowego. W literaturze są modele systemu, które uwzględniają charakterystyki niezawodnościowe. Są to wówczas modele funkcjonalne [4, 33]. Ze względu na dużą liczbę zależności do uwzględnienia są to modele symulacyjne [14]. Przeanalizowane modele systemów uwzględniały charakterystyki niezawodnościowe infrastruktury albo taboru. W takich modelach stosunkowo łatwo są uwzględniane zakłócenia ruchu.

W przypadku modeli systemów masowej obsługi zawodność podsystemów jest zawarta w losowości strumieni zgłoszeń i obsługi. Modele niezawodności systemu transportu szynowego uwzględniają zawodność taboru lub ogólną zawodność całego systemu.

Następnymi są modele niezawodności procesów przewozowych. Modele punktualności i przepustowości uwzględniają losowe zdarzenia niepożądane, z podziałem na podsystemy oraz ich elementy. Uwzględniają intensywność wykorzystania systemu oraz zakłócenia w procesie przewozowym (opóźnienia). Modele z losowymi czasami jazdy dotyczą również przepustowości oraz punktualności. Zawodność systemu jest uwzględniana w losowości czasów jazdy. W tych modelach brane są pod uwagę zakłócenia w procesie przewozowym tylko w postaci opóźnień [2, 30, 31].

Modele ryzyka służą do oceny możliwości wystąpienia oraz skutków zdarzeń niepożądanych. Celem analiz jest wskazanie najbardziej niekorzystnych scenariuszy zdarzeń w aspekcie zagrożeń i utraty bezpieczeństwa [1]. Modele stosowane w przypadku systemów transportowych uwzględniają intensywność wykorzystania systemu (natężenie ruchu), prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzenia systemu, niewłaściwe użytkowanie systemu (np. wbrew regulaminom technicznym) oraz czynnik ludzki. Struktura rozkładu jazdy uwzględniana jest pośrednio, w założeniu możliwości występowania kolizji pociągów.

Modele opisujące czynnik ludzki sprowadzają się do wyznaczania zawodności człowieka na różnych etapach pracy systemu [6]. Uwzględniane jest niewłaściwe użytkowanie systemu (świadome lub nieświadome błędy) oraz badany jest proces doprowadzający do utraty bezpieczeństwa. Analiza dotyczy zagrożeń i zawodności bezpieczeństwa.

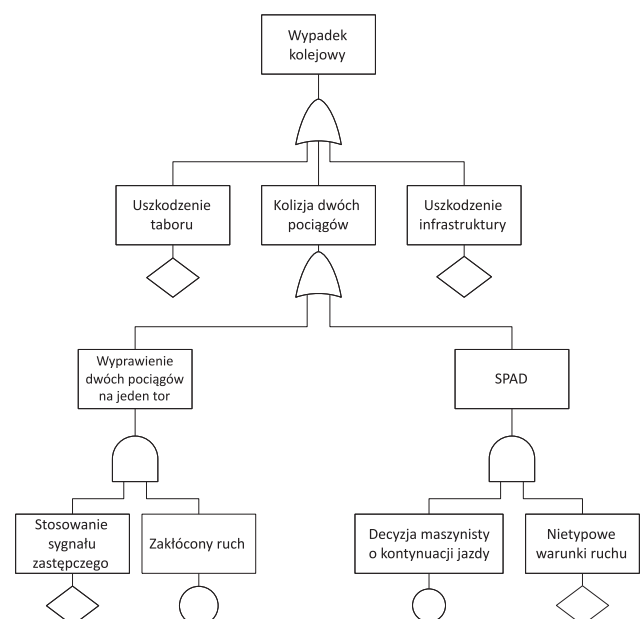
Modele wypadków i analizy barier są oparte na typowych analizach stosowanych w bezpieczeństwie (np. drzewa niezdatności). Uwzględniana jest zależność ruchowa pociągów, niewłaściwe użytkowanie systemu, czynnik ludzki oraz zagrożenia. Wyznaczany jest proces doprowadzający do zawodności bezpieczeństwa [28]. Zawodność części technicznej systemu uwzględniana jest najczęściej w sposób uogólniony.

Modele niezawodności i bezpieczeństwa uwzględniają niewłaściwą eksploatację systemu, utratę bezpieczeństwa, stany zagrożenia oraz uszkodzalność wybranych podsystemów, natomiast nie uwzględniają intensywności użytkowania, zależności ruchowej pociągów oraz zakłóconej realizacji procesu transportowego.

Ponadto jest niezbędne precyzyjne definiowanie niezawodności i bezpieczeństwa systemu. Ważnym aspektem jest również określenie, w jakich sytuacjach system przechodzi do stanu niezdatności.

## 3. Istotność zdarzeń o pozornie małym znaczeniu

Badając zdarzenia niepożądane okazuje się, że 78% zdarzeń stanowi niewykorzystany zasób wiedzy, są to tzw. zdarzenia bezpieczne, czyli zdarzenia skutkujące w opóźnieniach. Ważność zdarzeń o małych skutkach wykazano stosując analizę drzewa niezdatności. Rysunek 1 przedstawia fragment opracowanego drzewa niezdatności. Jako zdarzenie szczytowe przyjęto wypadek kolejowy, a przedstawiony fragment drzewa dotyczy poważnego wypadku, dlatego w tym fragmencie drzewa pominięto wypadki z pieszymi oraz wypadki z samochodami.



Rys. 1. Drzewo niezdatności dla zdarzenia szczytowego „wypadek kolejowy” [opracowanie własne]

W wyniku przeprowadzonej analizy drzewa niezdatności zidentyfikowano dwa obszary, w których zakłócenia ruchu pociągów wpływają na możliwość wystąpienia wypadku kolejowego. Pierwsza grupa wiąże się wprost z błędami ludzkimi. Zakłócenia w ruchu mogą prowokować zachowania pracowników, które w konsekwencji doprowadzą do wypadku.

Opracowany model wykazał, że kolizja dwóch pociągów stanowi największe ryzyko. Bezpośrednimi przyczynami może być niezauważony przez maszynistę błąd dyżurnego ruchu i odwrotnie. Natomiast tym błędem muszą towarzyszyć zakłócenia w realizacji rozkładu jazdy.

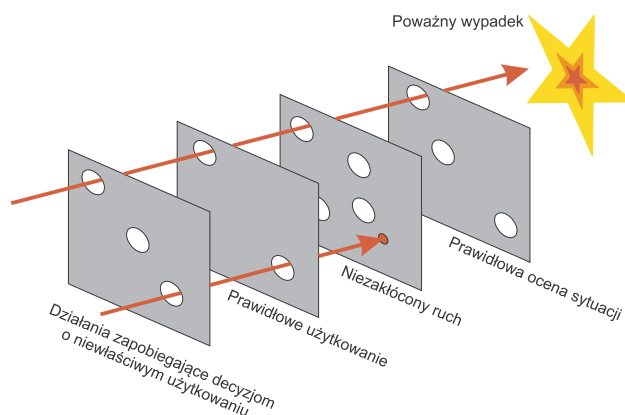
Rozkład jazdy teoretycznie powinien zapewniać bezkolizyjny ruch pociągów. Z tego wynika, że planowy ruch pociągów pozwala teoretycznie na bezpieczne przemieszczanie się pociągów w systemie, bez dodatkowych barier. W związku z tym, urządzenia sterowania ruchem są barierą przed zawodnością bezpieczeństwa, a wystąpienie zakłócenia wywołuje stan zagrożenia. Z analizy drzewa niezdatności zidentyfikowano jedno zdarzenie bezpośrednio zależne od zakłóceń – wyprawienie dwóch pociągów na jeden szlak.

Zmiana w procesie może także wpływać pośrednio na niebezpieczne minięcie semafora (SPAD). W tym przypadku zakłócenia zmieniają proces, do którego realizacji maszynista był przygotowany, sygnały zatrzymania pojawiają się wtedy niespodziewanie. W [Eur 2013] podano, że w 2011 roku ponad 45% wypadków powstało w wyniku minięcia semafora przez pociąg w sposób niebezpieczny (SPAD).

Wystąpienie poważnego wypadku jest możliwe, jeżeli wszystkie bariery zawiodą. Zidentyfikowano, że wystąpienie poważnego wypadku jest możliwe tylko wówczas, gdy wystąpią jednocześnie następujące czynniki:

- świadoma lub nieświadoma decyzja niewłaściwego użytkownika systemu,
- trwanie w stanach niewłaściwego użytkownika systemu,
- zakłócony ruch pociągów (dotyczy przede wszystkim poważnych wypadków z winy dyżurnego ruchu),
- błąd człowieka (maszynisty lub dyżurnego ruchu).

Na rysunku 2 pokazano zidentyfikowane bariery w postaci tzw. modelu sera szwajcarskiego, czyli modelu Reasona. W [29] zwrócono uwagę, że wzrost obciążenia behawioralnego ma wpływ na pogorszenie się bezpieczeństwa ruchu. W ponad 90% wypadków kolejowych przyczyną wystąpienia jest przejście odpowiedzialności przez człowieka [17]. Katastrofy w transporcie powstają w około 80% przypadków z bezpośredniej winy człowieka [7]. Czynniki ludzki oddziałuje na pracę systemu na każdym poziomie funkcjonowania [32].



Rys. 2. Model Reasona barier zapobiegających wystąpieniu poważnego wypadku; opracowano na podstawie [16]

## 4. Źródła wiedzy o systemie transportu szynowego

Informacje o procesie eksploatacji systemu transportu szynowego są gromadzone w kilku miejscach. Najbardziej istotne bazy wiedzy należą obecnie do państwowych komisji badań wypadków kolejowych, zarządców infrastruktury oraz przewoźników. Każde z tych źródeł wiedzy cechuje się innym profilem, zgodnie z prowadzoną działalnością.

### 4.1. Państwowa Komisja Badań Wypadków Kolejowych

Komisje wypadkowe dzielą się na komisję miejscową, komisję zakładową i Państwową Komisję Badań Wypadków Kolejowych [25]. Instytucje badające wypadki kolejowe dysponują największymi kompetencjami, stąd mogą opracowywać najbardziej dokładne i wnikliwe raporty. Badania prowadzone przez te jednostki mogą wносить bardzo wiele do całego systemu transportu szynowego. Struktura raportu z badania poważnego wypadku zawiera stałe elementy, którymi są [9], porównaj: [5, 8, 15].

- podsumowanie postępowania,
- fakty bezpośrednio związane z poważnym wypadkiem,
- opis zapisów badań i wysłuchań,
- analiza i wnioski,
- opis środków zapobiegawczych doraźnych,
- zalecane środki zapobiegawcze mające na celu uniknięcie takich wypadków lub incydentów w przyszłości lub ograniczenie ich skutków.

Raporty są syntezą wiedzy z baz danych przedsiębiorstw uczestniczących w wypadku, wiedzy świadków i poszkodowanych oraz dodatkowych badań (np. trzeźwości pracowników). W praktyce te badania za-

węzają się do niewielkiego fragmentu zbioru wszystkich zdarzeń w systemie. Dla wybranego regionu w Polsce w latach 2009-2011 mniej niż 0,1% zdarzeń kwalifikowało się (jako poważny wypadek, wypadek lub incydent) do zgłoszenia Państwowej Komisji Badań Wypadków Kolejowych [5, 10]. Bezpośrednio badane zdarzenia (poważne wypadki) stanowiły w tym regionie  $1,4 \cdot 10^{-3}\%$  zdarzeń, natomiast do Europejskiej Agencji Kolejowej (ERA) zgłoszono zaledwie  $1,8 \cdot 10^{-4}\%$  zdarzeń [10].

Narodowe komisje badań wypadków mają największe możliwości w zakresie wprowadzania zmian podnoszących bezpieczeństwo na kolei w kraju i na świecie. Jednak te państwowe organy ze względu na ograniczone zasoby nie mogą zajmować się badaniem tzw. bezpiecznych błędów (ang. *fail safe*).

#### 4.2. Zarządca infrastruktury

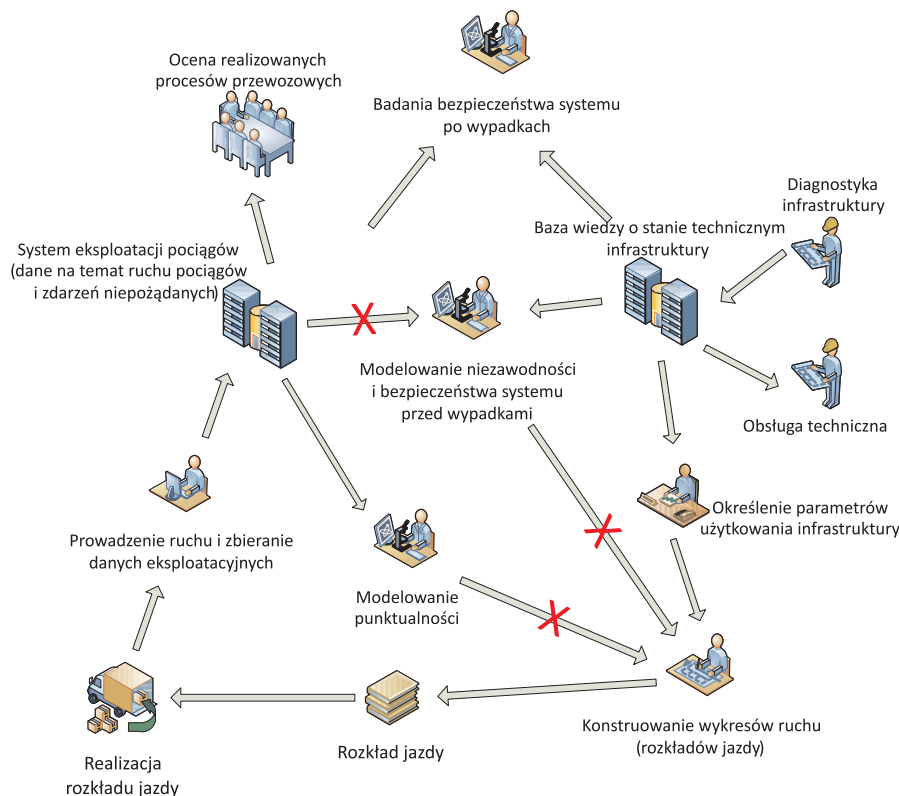
Przepływ informacji pomiędzy dwiema podstawowymi bazami danych zarządcy infrastruktury pokazano na rysunku 3. Zidentyfikowany proces przepływu informacji uzupełniono etapami wykorzystania danych do celów badawczych. W procesie naniesiono również nieuwzględnione obecnie ścieżki przepływu informacji, które znajdują wykorzystanie w prowadzonych badaniach.

Dane eksploatacyjne (dotyczące ruchu pociągów) są gromadzone przez posterunki ruchu. Mogą to być nastawnie znajdujące się wzdłuż linii lub scentralizowane centra lokalne (LCS). Informacje na temat położenia pociągu najczęściej są uzyskiwane ze wskazań urządzeń przytorowych. Zdarzenie losowe, które uniemożliwia lub utrudnia prowadzenie ruchu, rejestrowane jest w posterunku za pośrednictwem:

- przytorowych urządzeń sterowania ruchem kolejowym (srk),
- urządzeń energetycznych (sieć trakcyjna lub system zasilania urządzeń pomocniczych),
- drużyny pociągowej obserwującej zdarzenie,
- dyżurnego ruchu (jeżeli do zdarzenia doszło w obrębie posterunku).

Przekazując informacje o zdarzeniu, posterunek ruchu łączy się z dyspozyturą stanowiącą element centrum zarządzania ruchem (CZR). Równocześnie ma miejsce komunikacja pomiędzy pociągami i właściwymi dla nich dyspozytorami. Wskutek dynamicznej interakcji między dyspozytorami różnych spółek dotkniętych skutkami zdarzenia mogą powstać błędy w informacjach, które trafiają do bazy danych eksploatacyjnych (ruchowych).

Podstawowym zadaniem dyspozytury jest szybka reakcja na zdarzenie, która pozwala minimalizować



Rys. 3. Przepływ i wykorzystanie informacji eksploatacyjnych zarządcy infrastruktury, przekreśleniem koloru czerwonego oznaczono brak przepływu istotnych informacji [opracowanie własne]

wtórne skutki zdarzenia dla pasażera i przewoźników. W związku z takim zakresem obowiązków, dyspozytorzy przewoźników nie mają kompletnych danych na temat ogółu zdarzeń wpływających na niezawodność systemu. Dane są ostatecznie archiwizowane przez centrum zarządzania ruchem zarządcy infrastruktury w postaci księgi ruchu i księgi zdarzeń, zawartych zwykle w jednym systemie informatycznym.

Dla pociągu jadącego bez zakłóceń lub z niewielkimi zakłóceniami pobierane są tylko informacje o czasie przejazdu przez dany punkt kontrolny. Natomiast w chwili wystąpienia zakłócenia powodującego opóźnienie większe niż 5 minut (czasami ta granica ma inną wartość) lub odstępstwo od normalnej pracy systemu, nieskutkujące w opóźnieniu, następuje procedura zbierania dodatkowych informacji. Zbiór informacji zbieranych po wystąpieniu zdarzenia pokazano w [22].

Drugim obszarem działalności zarządcy infrastruktury jest obsługa techniczna infrastruktury. Modele obsługi, uzależnione od profilu danej jednostki organizacyjnej przedsiębiorstwa, zostały zebrane i opisane w innych publikacjach [11, 12]. W przypadku działu obsługi technicznej zarządcy infrastruktury, podstawowym zadaniem jest prowadzenie prac diagnostycznych pozwalających na monitorowanie bieżącego stanu technicznego. W konsekwencji działań zajmujący się prowadzeniem ruchu otrzymuje informację o aktualnych dopuszczalnych prędkościach, naciskach osi i pracach naprawczych wyłączających tory z eksploatacji lub obniżających przepustowość.

Prowadząc badania nad niezawodnością systemu transportu szynowego z wykorzystaniem informacji o stanie technicznym infrastruktury, należy przeanalizować czy istnieje potrzeba pozyskania szczegółowych informacji. Szczegółowe dane kryją problem w pozyskaniu (ze względu na tajemnicę przedsiębiorstwa) oraz w późniejszym przetworzeniu. Alternatywę stanowi korzystanie z miar opisujących stan techniczny. Z punktu widzenia funkcjonowania systemu taką najlepszą miarą jest dopuszczalna prędkość na tle prędkości konstrukcyjnej. Zalety takiej miary opisano w [20].

### 4.3. Przewoźnik

Przewoźnik dysponuje najbardziej wyspecjalizowaną bazą danych, która zawiera tylko informacje na temat jego działalności. Dane na temat ruchu pociągów są wtórne – pierwotnie pochodzą od zarządcy infrastruktury. Najważniejszymi informacjami, jakimi dysponuje przewoźnik na temat procesu przewozowego i pojazdów to:

- 1) rodzaj pociągu (pośpieszny, regionalny, aglomeracyjny),
- 2) liczba wymaganych miejsc siedzących (zależna od liczby pasażerów),

3) zużycie energii (zależne od taboru i linii),

4) rozkład jazdy:

- chwila rozpoczęcia realizacji zadania przewozowego,
- chwila zakończenia realizacji zadania przewozowego,
- miejsce rozpoczęcia kursu,
- miejsce zakończenia kursu,
- liczba uruchamianych pociągów,
- czas wymiany pasażerów;

5) praca przewozowa w pociągokilometrach,

6) rodzaj taboru,

7) wiek taboru,

8) całkowity przebieg pojazdów,

9) okresy międzyobsługowe (zgodnie z DTR i DSU),

10) pojemność (liczba miejsc),

11) droga hamowania,

12) moc zainstalowana,

13) przyspieszenie,

14) prędkość maksymalna,

15) rezerwy w taborze,

16) masa pociągu brutto,

17) naciski na osie,

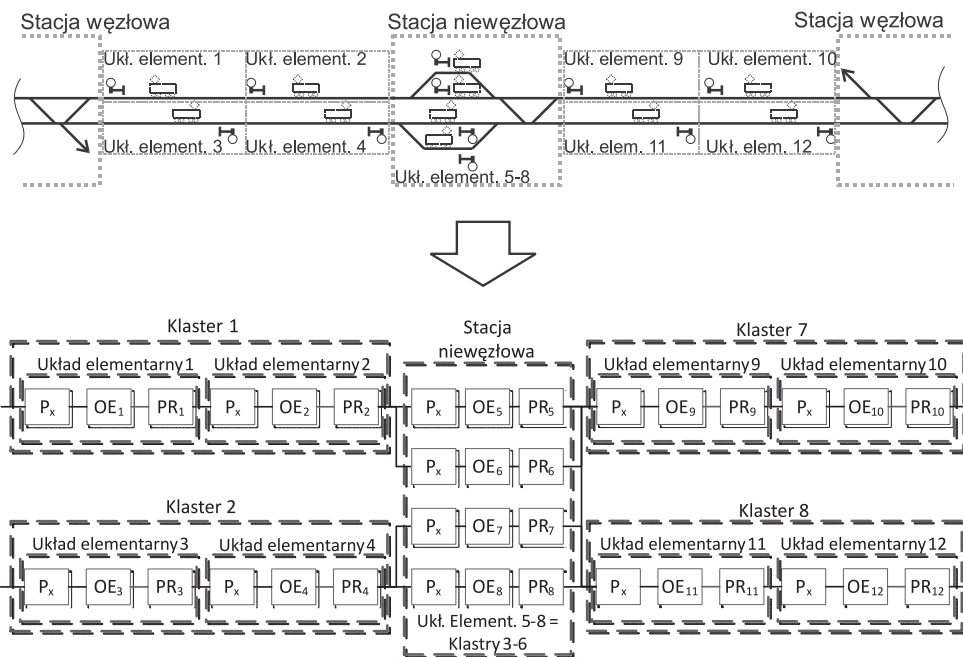
18) chwilowe położenie na sieci.

Informacje uzyskane od przewoźników są szczególnie ważne w przypadku badań niezawodności i bezpieczeństwa pojazdów oraz punktualności realizacji konkretnych przewozów.

## 5. Określanie zdolności systemu na potrzeby modeli niezawodnościowych

W procesie modelowania niezawodności i bezpieczeństwa systemu transportu szynowego ważną rolę odgrywa określenie zdolności systemu oraz stanów, w których system jest zdalny, jednak jego wydajność ulega zmniejszeniu i jest bardziej narażony na zawodność bezpieczeństwa. W [21] zaproponowano metodę modelowania systemu opartego na koncepcji klastrów, odcinków elementarnych, posterunków ruchu, pociągów i układów elementarnych. Takie podejście umożliwia przejście na strukturę niezawodności (*Reliability Block Diagram*). W efekcie jest możliwe jednoznaczne określanie zdolności, niezadatności i częściowej zdolności systemu. Na rysunku 4 pokazano przykładowy system.

Podstawowym elementem w przedstawionej koncepcji jest układ elementarny, który składa się z odcinka elementarnego  $OE_i$ , posterunku ruchu  $PR_i$  i pociągu  $P_x$ . Przyjmuje się, że pociąg przemieszcza się przez system i dlatego tylko w danej chwili współtworzy konkretny układ elementarny. W tym ujęciu pociąg jest rozumiany jako zespół pojazdów, operatorów oraz



Rys. 4. Przykładowy system wraz z jego strukturą niezawodnościową [opracowanie własne]

przewożonych pasażerów lub towaru. Posterunek ruchu składa się z urządzeń sterowania ruchem oraz ich operatora (jeżeli nie są to urządzenia samoczynne). W obrębie odstępu blokowego odcinek elementarny składa się z nawierzchni oraz ewentualnie sieci trakcyjnej. Wymienione elementy układu elementarnego są opisane charakterystykami niezawodnościowymi. Układy elementarne, położone szeregowo między posterunkami umożliwiającymi zmianę toru, tworzą klastry.

W opracowanym modelu opisu struktury przyjęto założenia związane z systemem, którego niezawodność i bezpieczeństwo mogą być modelowane. W obecnej formie model ten opracowano dla systemu transportu szynowego, którym jest linia kolejowa zawierająca się między dwiema stacjami węzłowymi, czyli taki fragment systemu, w którym możliwe jest przemieszczanie się pociągów tylko w dwu kierunkach. Nie ma więc możliwości aby pociągi poza początkiem i końcem linii pojawiały się lub znikwały. Ponadto przyjęto, że linie kolejowe zbiegające się na stacjach węzłowych położonych na styku systemu nie wpływają na siebie w aspekcie zakłóceń.

Proponowany podział pozwala na uwzględnienie cech systemu w modelach niezawodności. W artykule [20] opisano przykładowe wyniki z prowadzonych badań nad modelowaniem niezawodności systemu transportu szynowego w zakresie wzajemnego oddziaływania wybranych parametrów systemu infrastruktury.

Badając dane eksploatacyjne zebrane w systemie transportu szynowego wykazano powiązanie częstości występowania zdarzeń niepożądanych

(nawierzchni, urządzeń sterowania ruchem kolejowym, urządzeń elektroenergetycznych, a także taboru) z pracą eksploatacyjną na linii kolejowej. Wykazano, że na poziomie istotności 0,05 częstość uszkodzeń taboru nie zależy od linii kolejowej, ale od typu pojazdu, pracy eksploatacyjnej i pory roku. Wykazano również, że typ urządzeń sterowania ruchem kolejowym ma wpływ na częstość występowania zdarzeń niepożądanych, podobnie jak typ i wiek nawierzchni oraz typ i wiek urządzeń elektroenergetycznych.

Wynika z tego, że modele powinny uwzględniać m.in. możliwości występowania różnych typów taboru, różnych typów elementów infrastruktury, pracy eksploatacyjnej, pory roku i struktury ruchu. W przeciwnym razie budowane modele mogłyby być wyłącznie stosowane dla konkretnej linii, konkretnego rozkładu jazdy, wyłącznie w tym sezonie, dla którego zebrano dane eksploatacyjne potrzebne do parametryzacji.

## 6. Możliwości wykorzystania danych na potrzeby modeli niezawodnościowych

Dotychczasowe badania nad niezawodnością i bezpieczeństwem systemu transportu szynowego można podzielić na transportowe, niezawodnościowe, bezpieczeństwa i infrastruktury krytycznych.

Zależnie od grupy modeli, inny jest zakres informacji potrzebnych do parametryzacji. W badaniach

o charakterze transportowym analizowana jest infrastruktura w aspekcie minimalizacji kosztów eksploatacji, realizacja zadań dyspozytury oraz procesy powstawania uszkodzeń elementów systemu.

Badania niezawodnościowe obejmują pojazdy, obiekty i podsystemy infrastruktury, niezawodność realizacji procesu przewozowego oraz jego punktualność. Mimo zaawansowanego charakteru tych modeli, nie jest w nich wykorzystywana w sposób pełny wiedza o systemie. W przypadku punktualności i niezawodności procesu przyjmowane są mocne założenia. W aspekcie funkcjonowania rzeczywistego systemu, te założenia istotnie mogą pogarszać wyniki uzyskane z modeli. Również modele z grupy infrastruktur krytycznych nie uwzględniają osobliwych cech kolei, co także obniża dokładność uzyskanych wyników.

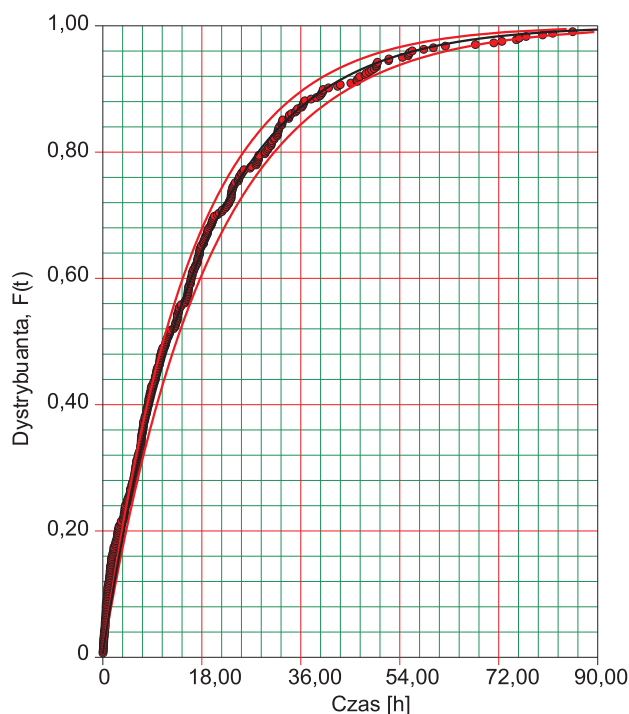
Przeanalizowane badania nad bezpieczeństwem są skupione na skutkach zdarzeń oraz minimalizacji negatywnego wpływu na pracę systemu. Dla dominującej liczby modeli niezawodności i bezpieczeństwa systemu transportu szynowego możliwości wynikające z dostępnych informacji na temat eksploatacji systemu są znacznie większe niż zapotrzebowanie wynikające z konstrukcji modeli.

Przykładem informacji nieznajdujących zastosowania w modelowaniu niezawodności i bezpieczeństwa są dane z bazy zdarzeń zarządcy infrastruktury [3]. Korzystając z tej bazy oraz uwzględniając intensywność użytkowania systemu wynikającą z rozkładu jazdy, jest możliwe określanie funkcji zawodności elementów systemu. Funkcja jest estymowana z wykorzystaniem czasów między uszkodzeniami przy zadanej intensywności użytkowania systemu.

Dla odcinków elementarnych wybranej linii kolejowej opracowano funkcję zawodności pokazaną na rysunku 5. Analogicznie jest możliwe określenie funkcji zawodności dla dowolnego innego elementu systemu. Przedstawiona dystrybuanta jest w funkcji czasu zamiast pracy eksploatacyjnej, co wynika z powiązania z konkretnym stanem, który jest opisany intensywnością użytkowania.

## 7. Przykłady modeli

Największą liczbę cech systemu mogą uwzględniać odpowiednio zbudowane modele symulacyjne. W [23] przedstawiono prosty model symulujący punktualność pociągów w zakresie jednej linii kolejowej. Zmienną losową w modelu jest dystans między uszkodzeniami, który w tym modelu nie podzielono na typy uszkodzeń. Warunkowo po wystąpieniu zdarzenia wprowadzana jest druga zmienna losowa w postaci wartości opóźnienia.



Rys. 5. Empiryczna dystrybuanta czasów między uszkodzeniami odcinków elementarnych przy niezakłóconym, niezależnym ruchu oraz dystrybuanta dopasowanego rozkładu wykładniczego (czarna linia) dla rzeczywistej linii (czerwoną linią oznaczono 95% przedział ufności dystrybuanty teoretycznej) [opracowanie własne]

Na początku danego eksperymentu są generowane chwile wystąpienia zdarzeń niepożądanych w funkcji skumulowanego dystansu przejechanego przez pociąg na danej linii. W tym celu są losowane z określonych funkcji zawodności dystanse między uszkodzeniami. Według kryterium skumulowanej pracy eksploatacyjnej na linii kolejowej, sprawdza się możliwość uszkodzenia dla każdego pociągu. Dopiero wówczas jest generowane opóźnienie z wykorzystaniem dobrane go rozkładu gęstości prawdopodobieństwa. Wartość opóźnienia dodawana jest do czasu jazdy pociągu.

W [26] rozwinięto ten model. Wprowadzono podział na różne typy zdarzeń niepożądanych, z których każde jest opisane innymi charakterystykami. Dwuparametryczne rozkłady gęstości prawdopodobieństwa (Weibulla) opisują pracę eksploatacyjną między uszkodzeniami pojazdów, urządzeń sterowania ruchem kolejowym i podsystemu elektroenergetycznego. Rozkład logarytmiczno-normalny opisuje dystanse między uszkodzeniami nawierzchni kolejowej. W funkcji czasu w tym modelu są definiowane okresy między zdarzeniami związanymi z otoczeniem.

Model funkcjonowania systemu transportu szynowego można przedstawić, także jako proces opisany zbiorem stanów  $S$  [25], który dzieli się na określoną liczbę podzbiorów. Studia literatury oraz badania danych eksploatacyjnych wskazują na potrzebę de-

finiowania stanów w kilku wymiarach [19]. W celu uwzględnienia zinwentaryzowanych istotnych cech modelu przyjęto opis stanów w pięciu wymiarach:

- 1) zdarzenia związane ze zdadnością systemu,
- 2) poprawność użytkowania,
- 3) zakłócenia procesu przewozowego,
- 4) zależność ruchowa pociągów,
- 5) rodzaj zdarzenia niepożądanego.

Stosując opracowany sposób definiowania stanów, opracowano 44-stanowy model niezawodności i bezpieczeństwa systemu transportu szynowego (rys. 6). Model przedstawiono w [25], natomiast w [18] zmodyfikowano model w aspekcie badania stanów zagrożenia systemu.

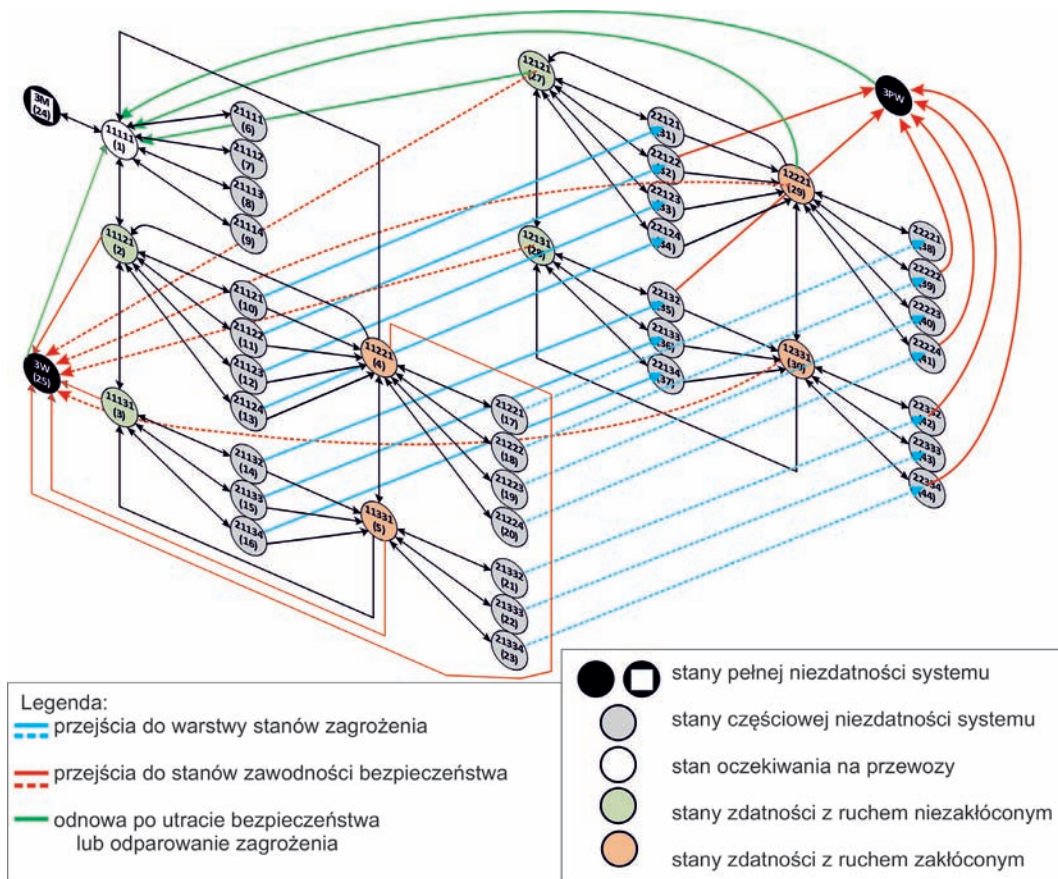
## 8. Podsumowanie

Niezawodność procesów transportowych realizowanych w systemie transportu szynowego jest ważnym zagadnieniem w badaniach systemów kolejowych. Opracowywanie modeli niezawodnościowych pozwalających na ocenę pracy systemu umożliwi podniesienie jakości usług. Istotnym zagadnieniem w najbliższej

perspektywie badawczej będzie modelowanie odporności rozkładu jazdy w aspekcie zebranej wiedzy. Ocena a priori umożliwi przeprowadzenie działań optymalizacyjnych podnoszących punktualność, minimalizując jednocześnie niepotrzebne rezerwy czasowe. W efekcie poprawia się atrakcyjność transportu szynowego.

Odporny rozkład jazdy tłumi skutki zdarzeń, czyli przede wszystkim opóźnienia, które mogą mieć wpływ na powstanie poważnych wypadków kolejowych. Zakłócenia ruchu powodują odstępstwo od założonego przebiegu procesu transportowego (w czasie lub przestrzeni), które w konsekwencji stanowi zagrożenie mogące przy niekorzystnych warunkach przerodzić się w zdarzenie szczytowe.

Przeprowadzona inwentaryzacja źródeł informacji na temat zdarzeń niepożądanych w systemie transportu szynowego pozwoliła na podział źródeł w zależności od rodzaju analizowanego problemu. Wskazano także na potencjał danych eksploatacyjnych zbieranych już w systemie, a nie wykorzystywanych obecnie do badań. Wskazane opracowania, w których modelowano niezawodność systemu transportu szynowego, poszerzają wiedzę na temat funkcjonowania systemu transportu szynowego. Najważniejszymi wnioskami w tym aspekcie są:



Rys. 6. Stanowy model niezawodności i bezpieczeństwa systemu transportu szynowego; opracowanie własne na podstawie [25]



- 1) modelowanie systemu transportu szynowego opartego na koncepcji odcinka elementarnego, układu elementarnego, klastra oraz pociągu pozwala dobrze odwzorowywać jego strukturę niezawodnościową,
- 2) w zagadnieniach niezawodności i bezpieczeństwa systemu transportu szynowego jest istotne rozróżnienie właściwego i niewłaściwego użytkownika systemu,
- 3) niewłaściwe użytkowanie musi wystąpić, aby doszło do stanu zawodności bezpieczeństwa,
- 4) zakłócenia w ruchu muszą wystąpić, aby doszło do stanu zawodności bezpieczeństwa z powodu błędu postępowania (człowieka lub urządzeń),
- 5) zależność ruchowa pociągów jest istotna w badaniu bezpieczeństwa ruchu oraz niezawodności przewozów,
- 6) pierwotne zdarzenia niepożądane spowodowane błędami pociągów nie zależą od linii oraz stanu jej nawierzchni, ale od intensywności ruchu pociągów,
- 7) rodzaj urządzeń sterowania ruchem ma wpływ na liczbę występujących zdarzeń niepożądanych oraz ich skutki,
- 8) obciążenie przewozami (praca przewozowa) ma wpływ na uszkodzalność infrastruktury (nawierzchnia i urządzenia zasilania w energię trakcyjną),
- 9) system transportu szynowego może przebywać w stanach częściowej zdadności (mimo uszkodzeń elementów system realizuje zadania z możliwym spadkiem wydajności),
- 10) proces gromadzenia danych eksploatacyjnych w systemie transportu szynowego jest podatny na przypadkowe lub systemowe błędy.

Podsumowując należy stwierdzić, że prowadzone badania są bardzo obiecujące i zmierzają obecnie do sformułowania ogólnego modelu teoretycznego oraz dalszej rozbudowy modeli symulacyjnych, np. o pociągi towarowe.

## Literatura

1. Albrechtsen E., Hokstad P.: *An analysis of barriers in train traffic using risk influencing factors*. Safety and Reliability, Swets & Zeitlinger, Lisse 2003.
2. Caimi G., Fuchsberger M., Laumanns M., Lüthi M.: *A model predictive control approach for discrete-time rescheduling in complex central railway station areas*, Computers & Operations Research, Vol 39, ELSEVIER 2012.
3. Dane na temat zdarzeń niepożądanych w wybranym regionie dla lat 2009-2011, PKP PLK S.A.: Warszawa 2012.
4. Dyduch J., Szczygielski M.: *Model funkcjonalno-niezawodnościowy systemu SKZR*, Materiały Konferencji „Zimowa Szkoła Niezawodności”, Szczyrk 2008.
5. Gniwek A., Olpiński W., Rodzik A., Sroka W.: *Państwowa Komisja Badania Wypadków Kolejowych – Raport Nr PKBWK/1/2013*, Ministerstwo Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej, Warszawa 2013.
6. Goossens L.H.J., Pietersen C.M., den Heijer-Aerts M.: *Comparative quantitative risk assessment of railway safety devices*. Safety and Reliability, Swets & Zeitlinger, Lisse 2003 [Eur 2013], European Railway Agency: Intermediate report on the development of railway safety in the European Union, France 2013.
7. Kadziński A.: *Wprowadzenie do zagadnień bezpieczeństwa systemów kolejowych pojazdów szynowych*, XII Konferencja Naukowa Pojazdy Szynowe, Poznań-Rydzyna 1996.
8. Kugielski B., Gniwek A., Leśniowski R.: *Państwowa Komisja Badania Wypadków Kolejowych – Raport Nr PKBWK/1/2012*, Ministerstwo Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej, Warszawa 2012.
9. Kugielski B., Kusior A., Młynarczyk A., Rodzik A.: *Państwowa Komisja Badania Wypadków Kolejowych – Raport Nr PKBWK/2/2011*, Ministerstwo Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej, Warszawa 2011.
10. Leśniowski R., Ryś T.: *Państwowa Komisja Badań Wypadków Kolejowych – Raport roczny 2011*, Ministerstwo Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej, Warszawa 2012.
11. Nowakowski T., Werbińska S.: *Maintenance modelling concepts – state of art*, International Journal of Materials and Structural Reliability 2008, vol. 6, no 2: 229-254.
12. Nowakowski T., Werbińska S.: *On problems of multicomponent system maintenance modelling*, International Journal of Automation and Computing, 2009, vol. 6, no 4: 364-378.
13. Nowakowski T.: *Niezawodność systemów logistycznych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2011.
14. Podofilini L., Zio E., Marella M.: *A multi-state Monte Carlo simulation model of a railway network system*, Advances in Safety and Reliability, Tylor & Francis Group, London 2005.
15. Railroad Accident Report NTSB/RAR-10/02, *National Transportation Safety Board*, Washington 2010.
16. Reason J.: *The Human Contribution – Unsafe Acts, Accidents and Heroic Recoveries*. ASHGATE 2008.
17. Renpenning E.: *Reliability Prediction in Railway Signalling*, Proceedings of the European Safety and Reliability Conference, ESREL 2004.
18. Restel F.J., Zajac M.: *Reliability model of the railway transportation system with respect to hazard states*, W: 2015 IEEE International Conference on Indus-

- trial Engineering and Engineering Management, IEEM 2015: 6–9 December 2015, Singapore, Danvers, MA: IEEE, cop. 2015.
19. Restel F.J.: *Defining states in reliability and safety modelling*, W: Theory and engineering of complex systems and dependability: proceedings of the Tenth International Conference on Dependability and Complex Systems DepCoS-RELCOMEX, June 29–July 3, 2015, Brunów, Poland / Wojciech Zamojski [i in.] (eds.). Springer, cop. 2015, (Advances in Intelligent Systems and Computing, ISSN 2194-5357; vol. 365).
  20. Restel F.J.: *Impact of infrastructure type on reliability of railway transportation system*, Journal of KONBIN 2013, no 1, pp. 21-36.
  21. Restel F.J.: *Koncepcja modelu systemu transportu szynowego w aspekcie niezawodności i bezpieczeństwa*, W: Problemy utrzymania systemów technicznych: [monografia]: praca zbiorowa / pod red. Mirosława Siegiejczyka, Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2014.
  22. Restel F.J.: *Measures of reliability and safety of rail transportation system*, Advances in Safety, Reliability and Risk Management – Proceedings of the European Safety and Reliability Conference, ESREL 2011, pp. 2714-2719.
  23. Restel F.J.: *Model zakłóceń w procesie transportowym na linii kolejowej*, XIX Konferencja Naukowa „Pojazdy Szynowe”, Targanice k. Andrychowa 2012.
  24. Restel F.J.: *Reliability and safety models of transportation systems – a literature review*, W: Probabilistic Safety Assessment and Management, PSAM 12 Honolulu, Hawaii, USA, 22–27 June 2014 / International Association for Probabilistic Safety Assessment and Management (IAPSAM).
  25. Restel F.J.: *The Markov reliability and safety model of the railway transportation system*, W: Safety and reliability: methodology and applications: proceedings of the European Safety and Reliability Conference, ESREL 2014, Wrocław, Poland, 14–18 September 2014 / eds. Tomasz Nowakowski [i in.], Leiden: CRC Press/Balkema, cop. 2015.
  26. Restel F.J.: *Train punctuality model for a selected part of railway transportation system*, proceedings of ESREL 2013.
  27. Rozporządzenie Ministra Transportu z dnia 30 kwietnia 2007 r. w sprawie poważnych wypadków, wypadków i incydentów na liniach kolejowych, Dz.U. nr 89 Poz. 593 (2007).
  28. Schwartz S.: *Identifikation von Sicherheitsbarrieren am Bahnübergang*, ZEV Rail 1-2/2010.
  29. Sobków T.: *Czynnik ludzki w bezpieczeństwie systemów kolejowych*, XIX Konferencja Naukowa Pojazdy Szynowe, Targanice k. Andrychowa 2010.
  30. Törnquist J., Persson J.A.: *N-tracked railway traffic re-scheduling during disturbances*, Transportation Research Part B, Vol. 41, ELSEVIER 2007.
  31. Törnquist Krasemann J.: *Design of an effective algorithm for fast response to the re-scheduling of railway traffic during disturbances*, Transportation Research Part C, Vol. 20, ELSEVIER 2012.
  32. Wilson J.R., Norris B.J.: *Human factors in support of a successful railway: a review*, Cognition, Technology & Work, Volume 8/no. 1, Springer 2005.
  33. Zamojski W. (red.): *Systemy transportu dyskretnego – modele, niezawodność*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2007.

## Issues of Reliability and Safety Modeling of the Railway Transportation Process

### Summary

The highest process integration and scheduling level applies to the railway transportation system. At this moment the research is focused on the transportation process in relation to the railway system reliability. Accordingly, there are a number of problems related to the theoretical description of the real system. The paper shows the most important problems arising during reliability research of railway systems. It also shows motivation for modeling of events with small effects. The paper shows events are seemingly insignificant, but have influence on occurrence of serious rail accidents. A review of information sources on unwanted events occurring in the railway transportation system was made. It has allowed to make a distribution of sources depending on the nature of analyzed problem. It was also pointed the research potential of operational data collected already in the system, but currently not widely used. The overall conclusion is that the carried out investigation is very promising and is now moving to the formulation of a general theoretical model and further development of simulation models, to-wards the freight trains. The development of theoretical models for timetable assessment will allow a priori optimization activities which increase punctuality while minimizing unnecessary temporary reserves. As a result, the attractiveness of railway transportation should be improved. The paper is a synthesis of carried out research on the issues of reliability and safety of railway transportation system.

**Keywords:** reliability, safety, railway system

## Вопросы по моделированию надежности и безопасности процесса перевозок в системе рельсового транспорта

### Резюме

Самый высокий уровень интеграции процессов и их планировки выступает в случае системы рельсового транспорта. В связи с этим возникает ряд вопросов касающихся теоретического описания действительной системы. В статье развернуты самые важные проблемы возникающие во время исследований надежности железнодорожных систем и мотивации моделирования происшествий с небольшими последствиями. Было указано, что происшествия с небольшим – на вид – значением влияют на возникновение серьезных происшествий на железной дороге. Проведенная инвентаризация источников информации на тему нежелательных происшествий позволила разделить источники в зависимости от типа анализируемой проблемы. В дальнейших исследованиях планируется разработка теоретических моделей позволяющих оценить расписание движения априори позволит провести действия по оптимизации поднимающие пунктуальность, одновременно минимизируя ненужные резервы времени. Статья является синтезом прежних исследований над вопросами надежности и безопасности системы рельсового транспорта.

**Ключевые слова:** надежность, безопасность, рельсовый транспорт