

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

## Modele niezawodnościowe w transporcie

### WSTĘP

Początkowo badania niezawodnościowe w kolejnictwie skupiały się na pojazdach. Już w 1979 roku wskazywane było zapotrzebowanie na badanie uszkodzeń silników trakcyjnych pojazdów elektrycznych [32].

Obok badań nad modelami matematycznymi prowadzono analizy danych eksploatacyjnych na temat uszkodzeń. Te prace zaważyły się do analizy statystycznej i wnioskowania na jej podstawie [1], [22, 33, 38].

Pojazdy szynowe składają się z układów, zespołów, podzespołów itd., które mogą ulec uszkodzeniu, powodując przejście całego pojazdu do stanu niezdatności. Analizując ich niezawodność przeprowadza się zatem dekompozycję w celu dokładniejszego opracowania modeli [19, 20, 36, 39]. Podobne podejście spotyka się również dla pojazdów innych gałęzi transportu, np. dla pojazdów samochodowych [12].

Badania eksploatacyjnie uszkodzalności pojazdów wykorzystywane są między innymi do określania optymalnych okresów międzyprzeładowych i międzynaprawczych [23, 48]. W [46] wykorzystywano tzw. współczynnik dotrwania, który można utożsamić z funkcją niezawodności, do wyznaczenia najlepszych okresów do kolejnych napraw rewizyjnych i głównych. W innych opracowaniach zwracano uwagę na zróżnicowanie okresów do uszkodzeń dla różnych elementów pojazdów szynowych oraz konsekwencje eksploatacyjne i ekonomiczne [21].

### 1 NIEZAWODNOŚĆ SYSTEMU

W modelowaniu niezawodności systemów technicznych ważną rolę odgrywają modele oparte na grafach stanów-przejęć. Podstawowymi narzędziami matematycznymi stosowanymi do opisanie takich modeli są [17]:

- procesy Markowa,
- procesy semi-Markowa.

Markowski model uwzględniający koszty wykorzystano w badaniach problematyki obsługi profilaktycznych mostów w Holandii [13]. Autorzy definiują stany niezawodnościowe stopniem uszkodzeń oraz oceną struktury.

Autorzy w opracowaniu korzystali z bazy danych na temat przeglądów mostów w Holandii, która w wersji elektronicznej prowadzona jest od 1985 roku.

W celu badania kosztów wprowadzono dwa modele. W pierwszym przyjęto, że uszkodzenie wykrywane jest niezwłocznie po wystąpieniu, bez przeprowadzenia inspekcji. W drugim założono, że uszkodzenia wykrywane są podczas następnej inspekcji.

Autorzy w [3] rozpatrują analizę niezawodności elementów urządzeń sterowania ruchem kolejowym w aspekcie bezpiecznych błędów. Praca koncentruje się na analizie niezawodnościowej (i nieznacznie bezpieczeństwa) węzła ze specjalnymi mikrokomputerami obliczeniowymi, zwanymi transputerami. Do tego celu opracowano dziewięciostanowy model Markowa. Pierwszy stan reprezentuje zdatność wszystkich czterech transputerów. Stan siódmy wystąpi wówczas, gdy głównym transputerze wystąpi pierwszy błąd. W stanie drugim u jednego z trzech podrzędnych transputerów wystąpił błąd.

W trzecim stanie co najmniej dwa transputery wykazują błąd i prowadzą na wyjściu do tej samej decyzji, co potencjalnie generuje sytuację niebezpieczną. Stan dziewiąty dotyczy sytuacji, w której

<sup>1</sup>Politechnika Wroclawska, Katedra Logistyki i Systemów Transportowych

występuje wiele błędów, mogących w efekcie doprowadzić do utraty bezpieczeństwa. Usunięcie tego stanu wymaga interwencji z zewnątrz.

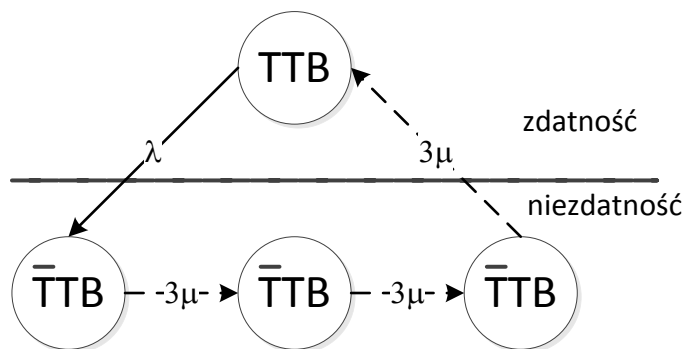
W stanie czwartym wykryty został podrzędny transputer z błędami (jest izolowany), mimo to system pracuje prawidłowo z wykorzystaniem trzech transputerów. W przypadku kolejnych błędów w podrzędnych transporterach system przechodzi do stanu piątego, natomiast gdy wystąpi błąd w głównym transputerze, system przechodzi do stanu ósmego. Stan szósty reprezentuje błędy we wszystkich podrzędnych transputerach.

W modelu nie uwzględniono stanu zawodności bezpieczeństwa. Stany z niewykrytymi błędami, lub błędami prowadzącymi do uzyskiwania podobnych sygnałów wyjściowych (potencjalnie błędnych) są stanami zagrożenia bezpieczeństwa.

Autorzy [5] przedstawili markowski model niezawodności systemów tramwajowych. Dla pojazdów przyjęto sześć możliwych stanów niezawodności:

- TTB – stan zdatności,
- $\bar{T}TB$  – stan częściowej zdatności ze względu na uszkodzenie jednego z dwóch modułów napędowych,
- $T\bar{T}B$  – stan niezdatności ze względu na uszkodzenie modułu hamulcowego,
- $\bar{T}\bar{T}B$  – stan niezdatności ze względu na uszkodzenie dwóch modułów napędowych,
- $T\bar{T}\bar{B}$  – stan niezdatności ze względu na uszkodzenie jednego modułu napędowego i modułu hamulcowego,
- $\bar{T}\bar{T}\bar{B}$  – stan niezdatności ze względu na niezdatność dwóch modułów napędowych i modułu hamulcowego.

Autorzy określili, że czas naprawy tramwaju ma rozkład niewykładniczy i przyjęli rozkład Erlanga trzeciego rzędu. Ze względu na powiązania z rozkładem wykładniczym, możliwe jest odwzorowanie rozkładu Erlanga w modelu markowskim. Jeden stan naprawy z rozkładem Erlanga-3 czasu trwania zastępuje się trzema stanami o jednakowych rozkładach wykładniczych (rysunek 1).



Rys. 1. Rozkład Erlanga-3 czasu naprawy opisany trzema stanami rozkładu wykładniczego. Opracowano na podstawie [5]

Pojazdy kursują cyklicznie po liniach między 6:00 a 22:00. Dla realizacji zadań przewozowych wymaganych jest co najmniej 20 zdatnych tramwajów. Naprawy częściowo niezdatnych pojazdów możliwe są do zrealizowania na szlaku z wykorzystaniem części zamiennych. Zasoby magazynu części zamiennych są Nielimitowane. Obsługa techniczna jednego tramwaju wykonywana jest przez jedną ekipę w danej chwili. Wprowadzając po trzy stany naprawy, w celu uzyskania rozkładu Erlanga-3 uzyskano model Markowa z 256 stanami. Wektorowe równanie różniczkowe opisujące prawdopodobieństwa stanów przyjmuje postać:

$$\pi'_i(t) = \sum_i q_{ij} \pi_j(t) \tag{1}$$

gdzie:

- $\pi_i(t)$  - prawdopodobieństwo przebywania w i-tym stanie,  
 $q_{ij}$  - intensywność przejść z i-tego stanu do j-tego.

Ze względu na charakterystyki rzeczywistego systemu przyjęto, że w danej chwili mogą być maksymalnie trzy pojazdy uszkodzone w pełni lub częściowo. Oczekiwaną liczbę uszkodzeń, dla stałej intensywności ruchu, określano na podstawie:

$$M(t, t + \tau\Delta t) = \sum_{k=0}^{\tau} \left[ \sum_{i \in W} \sum_{j \in \bar{W}} \pi_i(t + k\Delta t) \cdot q_{ij} \cdot \Delta t \right] \quad (2)$$

gdzie:

- $\tau\Delta t$  - czas trwania realizacji zadań transportowych,  
 $W$  - zbiór stanów zdatności,  
 $\bar{W}$  - zbiór stanów niezdatności.

W pracy wykazano, że dla rozpatrywanego systemu transportu tramwajowego stosowanie rozkładów wykładniczych do opisu czasów naprawy, powoduje uzyskiwanie wyższej gotowości systemu, niż w rzeczywistości. Stosowane przybliżenie rozkładu Erlanga-3 pozwoliło na dokładniejsze zamodelowanie tego systemu, bardziej zbliżone z rzeczywistymi wynikami.

W [25] przedstawiono trójfazowy markowski model niezawodności systemu transportu intermodalnego. Struktury faz w modelu są identyczne. Wprowadzenie faz wynika ze zmiany gałęzi transportu występującej w przypadku transportu intermodalnego. Zastosowano trzy fazy, reprezentujące transport samochodowy, kolejowy i samochodowy. Autor wykorzystał model do wyznaczenia funkcji gotowości dla systemu transportu intermodalnego w zależności od udziału czasowego poszczególnych faz.

Analogicznie do systemu intermodalnego zastosowano procesy Markowa dla przypadku systemu transportu łamanego [15]. Autorzy w referacie wprowadzają pojęcie niezawodności funkcjonalnej, definiowanej jako prawdopodobieństwo dostarczenia właściwej ilości ładunku w czasie nieprzekraczającym rozkładowego czasu.

Odmienne przedstawiono analizę zakłóceń w transporcie łamanym wodno-kolejowym w [42]. Analizę niezawodności oparto na modelu Markowa z dziewięcioma stanami:

- 0 – stan zdatności całego systemu,
- 1 – stan niezdatności systemu – podsystem kolejowy jest niezdatny ze względu na planową obsługę techniczną, podsystem śródlądowy jest zdalny,
- 2 – stan niezdatności systemu – podsystem kolejowy jest niezdatny ze względu na zdarzenia niepożądane, podsystem śródlądowy jest zdalny,
- 3 - stan zdatności systemu – podsystem śródlądowy jest niezdatny ze względu na planową obsługę techniczną, podsystem kolejowy jest zdalny,
- 4 - stan zdatności systemu – podsystem śródlądowy jest niezdatny ze względu na zdarzenia niepożądane, podsystem kolejowy jest zdalny,
- 13 - stan niezdatności systemu – podsystem kolejowy jest niezdatny ze względu na planową obsługę techniczną, podsystem śródlądowy jest niezdatny ze względu na planową obsługę techniczną,
- 14 - stan niezdatności systemu – podsystem kolejowy jest niezdatny ze względu na planową obsługę techniczną, podsystem śródlądowy jest niezdatny ze względu na zdarzenia niepożądane,
- 23 - stan niezdatności systemu – podsystem kolejowy jest niezdatny ze względu na zdarzenia niepożądane, podsystem śródlądowy jest niezdatny ze względu na planową obsługę techniczną,
- 24 - stan niezdatności systemu – podsystem kolejowy jest niezdatny ze względu na zdarzenia niepożądane, podsystem śródlądowy jest niezdatny ze względu na zdarzenia niepożądane.

W modelu przyjęto założenie, że aby system był zdalny, musi być zdalny system transportu szynowego. System transportu szynowego ma zwykle transy alternatywne, co pozwala na uzyskanie

wysokich wartości współczynnika gotowości. A zatem tak zbudowany model wydaje się być niedokładny.

Częstym przedmiotem badań jest wydzielony element systemu transportu szynowego. Przykładem mogą być analizy obiektów technicznych wchodzących w skład infrastruktury. W [14] opracowano 40 stanowy model niezawodności i bezpieczeństwa urządzeń zabezpieczenia przejazdu kolejowo-drogowego.

Urządzenia przejazdowe, podobnie do urządzeń sterowania ruchem kolejowym pracują okresowo podczas przejazdu pociągu, a w pozostałym czasie są w stanie tzw. czuwania. Autorzy dostrzegli problem określenia czasu między zdarzeniami oraz powiązania go z czasem rzeczywistym. Stąd wyznaczono dobową liczbę godzin pracy oraz podzielono przez 24 godziny uzyskując współczynnik wykorzystywany podczas określenia np. intensywności uszkodzeń. Stosując taki współczynnik możliwe jest przejście do bezwzględnej osi czasu [14] Następnie określono czas między zdarzeniami dla rzeczywistego czasu użytkowania urządzeń.

Obok intensywności uszkodzeń i napraw uwzględniono w modelu intensywność wykrywania uszkodzeń, będącą odwrotnością czasu między inspekcjami. Pierwszy model uproszczono do 21 stanów.

Grafy stanów i procesy Markowa znajdują także zastosowanie w analizach utrzymania w ruchu urządzeń należących do systemów transportowych (np. urządzeń telematycznych[41]).

W [6] wykorzystano łańcuchy Markowa w modelowaniu toru kolejowego z uwzględnieniem uszkodzeń nagłych oraz uszkodzeń wynikających ze stanu technicznego toru.

Uszkodzenia toru podzielono na wynikające ze stanu technicznego (degradacji)  $F_1$ , oraz nagłe  $F_2$ . Stan  $2b_u$  odpowiada sytuacji wystąpienia uszkodzenia bezpiecznego, jednak niewykrytego. Stan  $2b_d$  odpowiada wykryciu bezpiecznego uszkodzenia. Przejście pomiędzy tymi stanami wiąże się zatem z prawdopodobieństwem wykrycia błędu. W stanie  $D_u$  uszkodzenie pozostaje niewykryte, natomiast w  $D_d$  jest ono wykryte, jednak świadomie nie podejmuje się działań naprawczych.

Powyższy model dotyczy jednego krótkiego odcinka toru. Autorzy przyjęli długość odcinka na poziomie jednego kilometra. W związku z tym zaproponowano dwie miary niezawodności dla toru kolejowego:

- prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzenia niewykrytego w jednym kilometrze toru,
- prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzenia wykrytego w jednym kilometrze toru.

## 2 NIEZAWODNOŚĆ PROCESÓW PRZEWOZOWYCH

Vromans[44] zawężył pojęcie niezawodności systemu transportu szynowego do niezawodności przewozów. Rozpatrywane są wyłącznie opóźnienia. Autor identyfikuje potencjalne przyczyny zakłóceń, jednak przyjmuje założenie, iż zakłócenia czasowe mają jedno wspólne źródło. W pracy skupiono się na wykorzystywanej do oceny rozkładów jazdy algebrze max-plus (por. [10, 11]), w kontekście rezerw czasowych. Analiza przeglądu literaturowego omawianej pozycji potwierdza skupienie autora na aspektach opóźnień. Modele niezawodności systemu transportu szynowego przytoczone w [44] dotyczą:

- oceny rozkładów jazdy bez uwzględniania losowości zdarzeń w systemie,
- badań stabilności ruchu i przepustowości w obrębie stacji kolejowej,
- badań przepustowości z wykorzystaniem modeli probabilistycznych,
- propagacji zakłóceń w sieci,
- modeli kolejkowych w ocenie opóźnień,
- modeli do oceny przywracania normalnego ruchu.

Praca [47] wiąże zagadnienia modelowania systemów masowej obsługi z aspektami rezerw czasowych potrzebnych w rozkładzie jazdy. Autor wychodzi od pojęcia względnego zapasu czasu  $b=z/zsr$ , który jest zmienną losową o rozkładzie:

$$h(b) = e^{-b} \quad (3)$$

Dystrybuantę sumy zapasów  $B_n$ , czyli splot  $n$  funkcji wykładniczych wyrażono następująco:

$$H(B_n) = \int_0^{B_n} \frac{|(B_n)^{n-1}}{(n-1)!} e^{-B_n} dB_n \quad (4)$$

Znając względną wartość opóźnienia pierwotnego  $p_l/z_{sr}$  możliwe jest określenie liczby zapasów czasowych, potrzebnych do zlikwidowania skutków ruchowych opóźnienia pierwotnego.

Podobnym zagadnieniem jest przepustowość węzłów torowych, w ramach którego autor rozpatruje zajętość krytycznych punktów infrastruktury w kontekście przebiegów konfliktowych.

Bardziej szczegółową jest analiza skutków zdarzeń jako uszkodzenia pierwotne i powiązane z nimi uszkodzenia wtórne (z pominięciem wpływu ruchowego) [40].

Chen w [4] przedstawił modele niezawodności usług kolejowych i punktualności. Model niezawodności usług kolejowych składa się z trzech członów:

- niezawodności obiektów technicznych tworzących system (założono niezależność zdarzeń powstających w podsystemach),
- interakcji pomiędzy podsystemem taboru a pozostałymi podsystemami,
- intensywności przywrócenia ruchu po przerwie spowodowanej zdarzeniem niepożądanym.

Niezawodność usług kolejowych zapisano w modelu następująco:

$$R_{tr} = R_{rs} \cdot R_{nrs} \cdot R_{stat} \cdot R_{track} \cdot R_{civil} \cdot R_{depot} + b(R_{rs}, R_{nrs}) + c(R_{rs}, R_{stat}) + d(R_{rs}, R_{track}) + e(R_{rs}, R_{civil}) + f(R_{rs}, R_{depot}) + R_t^n \cdot (1 - R_{nrs} \cdot R_{stat} \cdot R_{track} \cdot R_{civil} \cdot R_{depot}) \cdot \left(1 - \frac{rt}{OT}\right) \cdot PT \quad (5)$$

gdzie:

- $R_{rs}$  - niezawodność pojazdów szynowych,
- $R_{nrs}$  - niezawodność infrastruktury (sygnalizacji, komunikacji, zasilania elektrycznego),
- $R_{stat}$  - niezawodność funkcji stacyjnych,
- $R_{track}$  - niezawodność nawierzchni torowej,
- $R_{civil}$  - niezawodność obiektów inżynieryjnych,
- $R_{depot}$  - niezawodność zaplecza obsługi technicznej,
- $R_t$  - niezawodność pojedynczego pociągu, który zakończył realizację dziennych zadań,
- $n$  - dzienna liczba pociągów,
- $rt$  - suma czasu, w którym system był niezdalny do realizowania przewozów,
- $OT$  - suma dziennego czasu prowadzenia ruchu pociągów,
- $PT$  - prawdopodobieństwo przywrócenia ruchu w wyniku naprawy realizowanej z wykorzystaniem standardowych ekip remontowych,
- $b()$ ,  $c()$ ,  $d()$ ,  $e()$ ,  $f()$  – relacje pomiędzy taborem a pozostałymi podsystemami.

Autor nie wyjaśnia jednak sposobu określania wartości współczynników zależności. Następnie zaprezentowano model punktualności:

$$punctuality = \left[ \prod_{i=1}^{TP} R_i^{N_{ij}} + \sum_{k=1}^{FT} g(k, j) \right] \cdot R_{nrs} \cdot R_{stat} \cdot R_{track} \cdot R_{civil} \cdot R_{depot} + h(R_{rs}, R_{nrs}) + l(R_{rs}, R_{stat}) + p(R_{rs}, R_{track}) + s(R_{rs}, R_{civil}) + t(R_{rs}, R_{depot}) + \left[ \prod_{i=1}^{TP} R_i^{N_{ij}} \right] \cdot (1 - R_{nrs} \cdot R_{stat} \cdot R_{track} \cdot R_{civil} \cdot R_{depot}) \cdot \left(1 - \frac{rt}{OT}\right) \cdot PQ \quad (6)$$

gdzie:

- $R_i$  - niezawodność pociągu realizującego zadanie  $i$ -tej relacji,
- $TP$  - liczba kursów wzorcowych w jednym dniu,
- $N_{ij}$  - liczba kursów w  $j$ -tym dniu dla  $i$ -tej relacji,
- $FT$  - dzienna liczba błędów pociągów,

- $g(k,j)$  - definiuje liczbę opóźnień, które wystąpiły dla różnych relacji (założono, że dla  $k$  większego lub równego trzech relacji  $g(k,j)$  dąży do zera),  
 $PQ$  - prawdopodobieństwo wytłumienia opóźnień ze względu na rezerwy czasowe,  
 $h()$ ,  $l()$ ,  $p()$ ,  $s()$ ,  $t()$  – współczynniki reprezentujące punktualne przybycie pociągów mimo wystąpienia uszkodzeń danego typu.

Vansteenwegen w [43] określa punktualność w kontekście przybycia pociągu do stacji końcowej kursu. Jednocześnie stwierdza, iż opóźnienia do 5 minut są dobrym rezultatem pracy systemu, zastrzegając iż mogą być takie sytuacje, w których będą one za duże (np. w związku ze skomunikowaniem).

Granice punktualności zależą przede wszystkim od kategorii pociągu, stąd pociąg regionalny dowożący do pracy i szkoły będzie punktualny przy spóźnieniach do 5 minut, a pociąg dalekobieżny do 15 minut opóźnienia.

Autorzy w [2] rozpatrują pewne przedziały opóźnień w analizach punktualności. Jako granicę podali dwie minuty. Pokazując jednak wyniki uzyskane z badań rzeczywistego systemu uwzględniono granicę punktualnego przyjazdu na poziomie pięciu minut. W opracowaniach naukowych pojawiają się także propozycje, określania granicy na poziomie 2,5 minut opóźnienia [27]. Dotyczy to jednak systemów transportu szynowego w bardzo rozwiniętych społeczeństwach (np. Norwegii). Takie systemy kolejowe stały się bardziej efektywne. Jednak wraz z rozwojem społeczeństwa powstają nowe wymuszenia na systemach antropotechnicznych. Przykładem mogą być koleje skandynawskie, w których obowiązują wysokie standardy punktualności, a badania zdarzeń niepożądanych koncentrują się na zjawisku samobójstw [34, 35].

Czynniki wpływające na punktualność pociągów w systemie zidentyfikowano w [28] oraz [37]:

- liczba pasażerów,
- stopień zajętości pojazdów w pociągu,
- wykorzystanie przepustowości,
- odwołane kursy,
- czasowe ograniczenia prędkości,
- obsługa techniczna infrastruktury,
- organizacja ruchu pociągów.

Prawdopodobieństwo tłumienia opóźnień wiąże się wprost z zagadnieniem tzw. odpornych rozkładów jazdy (*resistant timetable* – ang.[16]) oraz zdolnością systemu do odzyskania funkcjonalności po wystąpieniu zdarzenia (*resilience* – ang. [9]).

### 3 NIEZAWODNOŚĆ ZDOLNOŚCI PRZEPUSTOWEJ

Poprzednie grupy cechuje zawężenie tematyczne do konkretnego obszaru działania podsystemów. Następną grupą zagadnień stanowi przeciwieństwo do wymienionych. Są to prace badawcze, w których rozpatrywany jest wpływ zdarzeń katastroficznych na funkcjonowanie systemu. Badane są:

- podatność systemu na uszkodzenia (*vulnerability* – ang.),
- zdolność do zachowania lub odzyskania funkcjonalności systemu po wystąpieniu zdarzenia (*resilience* – ang.),
- prawdopodobieństwo tego, że dwa węzły pozostają sieciowo połączone,
- prawdopodobieństwo dotarcia na czas,
- prawdopodobieństwo zachowania przepustowości,
- słabe ogniwa – krytyczne gałęzie,
- węzły podatne na uszkodzenia.

W takim ujęciu kolej rozpatrywana jest jako system infrastruktury krytycznej (SIK), natomiast analizy dotyczą poważnych zdarzeń z dużymi skutkami. W opisie SIK stosowane są modele grafowe, których najprostsze modelują istniejące relacje między węzłami. Bardziej zaawansowane uwzględniają przepustowość krawędzi, czas jazdy, sposób sterowania ruchem w węzłach, a także

sposób zasilnia energetycznego [7, 8]. W tym aspekcie wprowadzane jest pojęcie niezawodności zdolności przepustowej (*capacityreliability* – ang.) sieci kolejowej [49].

Węzły modelują istotne stacje, przy czym w zaawansowanych modelach wprowadzane są różne rodzaje węzłów w zależności od rodzaju stacji (węzłowa, niewęzłowa, z możliwością zmiany kierunku itd.).

Odcinki międzywęzłowe przedstawiane są jako pojedyncze gałęzie, niezależnie od liczby torów szlakowych. W ujęciu zdarzeń katastroficznych rzeczywiście można przypuszczać, że skutki zdarzenia dotkną wszystkich torów szlakowych (dwu lub czterech dla linii wielotorowych), natomiast najczęściej występujące zdarzenia powodują zakłócenia na jednym z torów, a drugi pozostaje niezależny. W scenariuszach badanych zdarzeń wyłączane są całe krawędzie, nie stosuje się np. obniżenia przepustowości, co byłoby bardziej zbliżone do rzeczywistości.

Parametrem wskazującym na liczbę torów modelowanych daną gałęzią jest maksymalna przepustowość. Takie ujęcie zagadnienia linii dwu i wielotorowych jest powiązane z kolejnym istotnym uproszczeniem (obok kwestii liczby wyłączonych torów). W sytuacji modelowanego objazdu wyobrażalne jest awaryjne dociążenie czynnej krawędzi tylko w jednym kierunku. Zakładając, że rozpatrywany odcinek jest eksploatowany dwukierunkowo, wiąże się to z istotnym błędem w wynikach.

Jednym z narzędzi oceny niezawodności infrastruktury krytycznych jest algorytm faktoryzacji [31]. Dla grafu niezorientowanego modelującego sieć elektroenergetyczną formuła niezawodności warunkowej przyjmuje postać:

$$R_S = R(G_K) = R_{e_i} \cdot R(G_{K'} * e_i) + (1 - R_{e_i}) \cdot R(G_K - e_i) \quad (7)$$

gdzie:

$R_S = R(G_K)$  - niezawodność sieci (niezawodność grafu  $G$  wyróżnionym podzbiorem węzłów  $K$ ),

$R_{e_i}$  - prawdopodobieństwo, że połączenie  $e_i$  jest zdatne,

$R(G_{K'} * e_i)$  - niezawodność pozostałej części sieci, gdy połączenie  $e_i$  jest zdatne,

$R(G_K - e_i)$  - niezawodność pozostałej części sieci, gdy połączenie  $e_i$  nie jest zdatne.

Autorzy w [29] przedstawili zastosowanie algorytmu faktoryzacji do oceny niezawodności komunikacyjnej dla przypadku drogowej sieci transportowej. Przyjęto, że niezawodność gałęzi grafu reprezentującego sieć transportową jest równa 1, natomiast elementami uszkodzalnymi są węzły. Węzły w modelu reprezentują skrzyżowania. Jeżeli stan techniczny i komunikacyjny na skrzyżowaniu pozwala na przejazd samochodu w trakcie jednego cyklu sygnalizacji świetlnej to przyjmuje się, że jest zdatne. Jeżeli liczba cykli jest większa, to skrzyżowanie jest traktowane jako uszkodzone [30].

## PODSUMOWANIE

Studia literaturowe pozwoliły na identyfikację modeli niezawodności systemu, niezawodności procesów przewozowych oraz niezawodności zdolności przepustowej.

Modele niezawodności systemu transportu szynowego uwzględniają zawodność taboru lub ogólną zawodność całego systemu. 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 uwzględniana jest w losowości czasów jazdy. W owych modelach brane są pod uwagę zakłócenia w procesie przewozowym tylko w postaci opóźnień.

W publikacjach wprowadzane jest pojęcie niezawodności czasu jazdy, czyli punktualności powiązanej ze skomunikowaniem na węzłach przesiadkowych. Pojęcie niezawodności czasu jazdy pojawia się przede wszystkim w analizach odniesionych do pasażerów [18]. W [24] niezawodność czasu jazdy definiowana jest jako prawdopodobieństwo przebycia danej drogi w czasie mniejszym lub równym założonemu czasowi jazdy (bez warunku przesiadek).

Najczęściej pod pojęciem niezawodności rozumiana jest punktualność, czyli cecha mówiąca o realizacji procesów zgodnie z założonymi harmonogramami.

Punktualność oceniana jest jako jedna z ważniejszych miar niezawodności realizowanych procesów w systemach transportowych [11, 26, 28, 45]. W praktyce punktualności nie mierzy się dla każdego przyjazdu i odjazdu pociągu do każdej stacji, jednak tylko na stacji końcowej danego kursu [28].

W kontekście realizacji rozkładu jazdy wprowadzane jest również pojęcie zawodności, rozumianej jako odchylenie rzeczywistego czasu przemieszczania się pociągu od rozkładowego [28].

Dostrzegalny jest brak modeli, uwzględniających jednocześnie niezawodność obiektów technicznych systemu, niezawodność procesów oraz niezawodność zdolności przepustowej.

### Streszczenie

*Artykuł stanowi przegląd stanu wiedzy na temat modelowania niezawodności systemów transportowych zszczególnym uwzględnieniem systemu transportu szynowego. W przypadku owego systemu występuje duża niejednoznaczność w nazewnictwie. Termin niezawodność rozumiany jest w zależności od publikacji jako: właściwość systemu wyrażająca się poprawnym wykonywaniem zadań, nieuszkodzalność, punktualność, itd.*

*Zagadnienie podzielono na trzy części. Zastosowane podejście wynika z potrzeb badań prowadzonych nad modelowaniem niezawodności i bezpieczeństwa systemu transportu szynowego. Pierwszą wyszczególnioną grupą są modele niezawodności systemu transportowego. Drugą grupę stanowią modele niezawodności procesów przewozowych. Ostatnią grupą są modele niezawodności zdolności przepustowej części infrastrukturalnej.*

*Artykuł zakończony jest podsumowaniem oraz perspektywami dalszych badań.*

## Reliability models on transportation

### Abstract

*The paper is an overview of the state of art on reliability modeling of transportation systems, with particular attention on the railway transportation system. In the case of the system, there is a large ambiguity in the naming. The term reliability is understood depending on the publication as: system property that expresses the correct execution of the tasks, punctuality, etc.*

*The issue is divided into three parts. The approach stems from the needs of the research on modeling the reliability and safety of railway transportation. The first group are reliability models of the transportation system. The second group are reliability models of the transportation processes. The last group of models are traffic capacity reliability models, especially related to the infrastructure subsystem. The last group is mainly related to critical infrastructure issue.*

*Article ends with a summary and outlook for further research.*

### BIBLIOGRAFIA

1. Banek A., Roman Z., Kaniewski M., Określenie trwałości i niezawodności sieci trakcyjnej. Prace Centralnego Ośrodka Badań i Rozwoju Techniki Kolejnictwa – zeszyt 71, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1978
2. Bates J., Polak J., Jones P., Cook A., The valuation of reliability for personal travel. Transportation Research Part E, Vol 37, PERGAMON 2001
3. Chandra V., Kumar V., Reliability and safety analysis of fault tolerant and fail safe node for use in a railway signalling system. Reliability Engineering and System Safety, Vol. 57, ELSEVIER 1997
4. Chen H.-K., New models for measuring the reliability performance of train service. Safety and Reliability, Swets&Zeitlinger, Lisse 2003
5. Colini A., Erto P., Giorgio M., Testa A., A practical Markovian model of the availability and reliability of mass transport service with non-exponential repair times. Reliability, Risk and Safety: Theory and Applications, Taylor & Francis, London 2010
6. Dolven O.F., Lindqvist B.H., Hokstad P.R., Statistical Modelling and Analysis of Failure and Inspection Data for a Railway Line. Proceedings of the European Safety and Reliability Conference, ESREL 2004
7. Dorbritz R., Methodology for assessing the structural and operational robustness of railway networks. Pracadoktorska, ETH Zurich 2012



8. Dorbritz R., Weidmann U., Auswirkungen schwerer Störungen auf Bahnnetze. ZEV Rail 6-7/2012
9. Enjalbert S., Vanderhaegen F., Pichon M., Ouedraogo K.A., Millot P., Assessment of Transportation System Resilience. Human Modelling in Assisted Transportation, Springer 2011
10. Goverde R., Railway timetable stability analysis using max-plus system theory. Transportation Research Part B, Vol. 41, ELSEVIER 2007
11. Goverde R., A delay propagation algorithm for large scale railway traffic networks. Transportation Research Part C, Vol. 18, ELSEVIER 2010
12. Hebda M., Janicki D., Trwałość i niezawodność samochodów w eksploatacji. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1977
13. Kallen M.J., van Noortwijk J.M., a study towards the application of Markovian deterioration processes for bridge maintenance modelling in the Netherlands. Advances in Safety and Reliability, Tylor & Francis Group, London 2005
14. Krenželok T., Briš R., Klátil P., Stýskala V., Reliability and safety of railway signalling and interlocking devices. Reliability, Risk and Safety: Theory and Applications, Tylor & Francis Group, London 2010
15. Kulczyk J., Nowakowski T., Restel F.J., Application of phased-mission model to analyze reliability of combined rail-water transport system. PSAM 11 & ESREL 2012, Helsinki 2012
16. Liebchen C. et al., Computing delay resistant railway timetables, Computers & Operations Research, Vol. 37, ELSEVIER 2010
17. Lisnianski A., Frenkel I., Ding Y., Multi-state System Reliability Analysis and Optimization for Engineers and Industrial Managers. Springer-Verlag 2010
18. van Loon R., Rietveld P., Brons M., Travel time reliability impacts on railway passenger demand: a revealed preference analysis. Journal of Transport Geography, Vol. 19, ELSEVIER 2011
19. Magiera J., Niezawodność i jakość w pojazdach szynowych. Materiały Konferencji Zimowa Szkoła Niezawodności, Szczyrk 1998
20. Magiera J., Uszkodzenia lokomotyw elektrycznych a opóźnienia pociągów pasażerskich. Materiały Konferencji Zimowa Szkoła Niezawodności, Szczyrk 2005
21. Marciniak J., Wybrane problemy utrzymania zdadności pojazdów szynowych PKP. Konferencja Naukowa Pojazdy Szynowe – 50 lat trakcji elektrycznej PKP, Wrocław 1986
22. Marciniak J., Zawodność eksploatacyjna elektrycznych maszyn trakcyjnych i badania przyczyn zawodności. VII Konferencja Naukowa Pojazdy Szynowe, Rydzyna 1988
23. Matuszak Z., Sas M., Analiza ekonomiczna i techniczna możliwości wydłużenia przebiegów międzynaprawczych lokomotyw elektrycznych serii EU07 i ET22. IX Konferencja Naukowa Pojazdy Szynowe, Kraków i Muszyna 1992
24. Murray T., Grubestic T. H., Critical Infrastructure – Reliability and Vulnerability. Springer 2007
25. Nowakowski T., Reliability Model of Combined Transportation System. Proceedings of the European Safety and Reliability Conference, ESREL 2004
26. Nowakowski T., Problemy oceny niezawodności systemów logistycznych. Materiały Konferencji Zimowa Szkoła Niezawodności, Szczyrk 2007
27. Nyström B., Söderholm P., Improved railway punctuality by effective maintenance – a case study. Advances in Safety and Reliability, Tylor & Francis Group, London 2005
28. Olsson N., Haugland H., Influencing factors on train punctuality – results from some Norwegian studies, Transport Policy, Vol. 11, ELSEVIER 2004
29. Pilch R., Szybka J., Koncepcja zastosowania algorytmu faktoryzacji do oceny niezawodności ciągów komunikacyjnych. Problemy Eksploatacji, 2/2007
30. Pilch R., Szybka J., Koncepcja wyznaczania współczynnika gotowości skrzyżowań komunikacji samochodowej. Materiały Konferencji Zimowa Szkoła Niezawodności, Szczyrk 2008
31. Pilch R., Szybka J., Zastosowanie algorytmu faktoryzacji do oceny niezawodności sieci elektroenergetycznych. Materiały Konferencji Zimowa Szkoła Niezawodności, Szczyrk 2009
32. Plewako S., Wpływ konserwacji silników trakcyjnych na trwałość i niezawodność pojazdów szynowych. III Konferencja Naukowa Pojazdy Szynowe, Poznań 1979

33. Pustelnik I., Świdorski Z., Analiza statystyczna uszkodzeń szyn w torach PKP za lata 1963 – 1965. Prace Centralnego Ośrodka Badań i Rozwoju Techniki Kolejnictwa – zeszyt 29, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1968
34. Radbo H., Renck B., Andersson R., Feasibility of railway suicide prevention strategies: a focus group study. *Advances in safety, reliability and risk management*, CRC Press/Balkema 2012
35. Radbo H., Svedung I., Andersson R., Suicide and the potential for suicide prevention on the Swedish rail network: a qualitative multiple case study. *Advances in safety, reliability and risk management*, CRC Press/Balkema 2012
36. Rakowski J., Marczak M., Lokomotywa spalinowa jako złożony obiekt diagnostyki. Materiały Konferencji Zimowa Szkoła Niezawodności, Szczyrk 1988
37. Rietveld P., Bruinsma F.R., van Vuuren D.J., Coping with unreliability in public transport chains: a case study for Netherlands. *Transportation Research Part A*, Vol. 35, PERGAMON 2001
38. Roman Z., Analiza uszkodzeń sieci trakcyjnej 3 kV PKP. Prace Centralnego Ośrodka Badań i Rozwoju Techniki Kolejnictwa – zeszyt 45, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1972
39. Saat M., Barkan C., Generalized railway tank car safety design optimization for hazardous materials transport. *Journal of Hazardous Materials*, Volume 189, ELSEVIER 2011
40. Schöbel A., Maly T., Operational fault states in railways. *European Transportation Research Review*, Springer published online 18.01.2012
41. Siergiejczyk M., Rosiński A., Koncepcja wspomaganie utrzymania urządzeń telematyki transportu. Materiały Konferencji Zimowa Szkoła Niezawodności, Szczyrk 2014
42. Skupień E., Zakłócenia w systemie transportu łamanego. *Logistyka*, 3/2012
43. Vansteenwegen P., Van Oudheusden D., Decreasing the passenger waiting time for an intercity rail network. *Transportation Research Part B* no. 41, ELSEVIER 2007
44. Vromans M., Reliability of Railway Systems. TRAIL Thesis series T2005/7, The Netherlands TRAIL Research School 2005
45. Vromans M., Dekker R., Kroon L., Reliability and heterogeneity of railway services. *European Journal of Operational Research* no. 172, ELSEVIER 2006
46. Węclewski S., Optymalizacja utrzymania pojazdów trakcyjnych. III Konferencja Naukowa Pojazdy Szynowe, Poznań 1979
47. Węgierski J., Metody probabilistyczne w projektowaniu transportu szynowego. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1971
48. Wójcicki W., Winikajtyś M., Kryszkiewicz J., Określenie trwałości i niezawodności lokomotyw elektrycznych serii EU07 i ET22 oraz lokomotyw spalinowych serii ST44, ST43, SM42 w celu ustalenia optymalnej wielkości cyklu naprawczego – wdrożenie. Prace Centralnego Ośrodka Badań i Rozwoju Techniki Kolejnictwa – zeszyt 78/79, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1980
49. Zheng Y. et al., Carrying Capacity Reliability of Railway Networks. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, Vol. 11, ELSEVIER 2011