

Telematyka jako przyszłościowa metoda poprawy bezpieczeństwa transportu kolejowego

Telematics as a future method for improving the safety of rail transport

Andrzej Lewiński

Prof. dr hab. inż.

Uniwersytet Technologiczno – Humanistyczny im K. Pułaskiego w Radomiu

a.lewinski@uthrad.pl

Tomasz Perzyński

Dr hab. inż.

Uniwersytet Technologiczno – Humanistyczny im K. Pułaskiego w Radomiu

t.perzynski@uthrad.p

Streszczenie: W pracy pokazano, jak rozwój systemów telematyki wpływa na dziedzinę zarządzania i sterowania ruchem kolejowym. Zaprezentowano obecne i przyszłościowe rozwiązania, które w istotny sposób mogą poprawić bezpieczeństwo. Do analizy zaproponowano aparat matematyczny w postaci procesów Markowa.

Słowa kluczowe: Systemy kolejowe; Bezpieczeństwo; Modelowanie systemów

Abstract: The paper shows how the development of telematics systems affects the field of railway traffic management and control. It presents current and future solutions that can significantly improve safety. A mathematical apparatus in the form of Markov processes was proposed for analysis.

Keywords: Rail systems; Safety; Models of the systems

Wstęp

Celem wprowadzenia nowych systemów, w tym ERTMS/ETCS, jest zwiększenie funkcjonalności transportu kolejowego, [7]. Pomimo stosowania nowych rozwiązań poziom bezpieczeństwa, w odniesieniu do urządzeń pokładowych czy systemów w centrum sterowania, nie może ulec obniżeniu w stosunku do wymagań RAMS (z ang. Realibility, Avalability, Maintainability and Safety) zawartych w normie PN-EN 50126, [3], [6]. Systemy zarządzania i sterowania ruchem kolejowym muszą być konstruowane zgodnie z wymaganiami i obowiązującymi normami, w których zdefiniowano takie wymagania jak akceptowalny poziom ryzyka (ang. Tolerable hazard Rate) czy sposób kodowania przesyłanej informacji. W pracy pokazano, że gotowość systemów można definiować jako prawdopodobieństwo niewystąpienia zdarzenia krytycznego. Przedstawiona metoda szacowania gotowości została oparta na procesach Markowa. Za-

prezentowane modele odpowiadają systemom już eksploatowanym oraz odniesiono się do propozycji implementacji systemów wykorzystujących otwarte standardy transmisji.

Podstawy analizy bezpieczeństwa systemów zarządzania i sterowania ruchem kolejowym

W nowo projektowanych systemach zarządzania i sterowania ruchem kolejowym jednym z podstawowych wskaźników charakteryzujących bezpieczeństwo jest tzw. tolerowalny poziom ryzyka - THR. Oszacowana wartość tego wskaźnika musi mieścić się w założonym dla danej grupy urządzeń przedziale. Wskaźnik ten jest określony jako, [11]:

$$THR = \prod_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{t_{d_i}^{-1}} \cdot \sum_{i=1}^n t_{d_i}^{-1} \quad (1)$$

gdzie: λ_i – intensywność uszkodzeń dla kanału i , $t_{d_i}^{-1}$ – czas reakcji systemu na błąd od czasu powstania dla kanału i .

Bezpieczne systemy komputerowe pracujące zazwyczaj w strukturze nadmiarowej (2z2, 2z3) przy niezależności kanałów przetwarzania danych są gwarantem małego prawdopodobieństwa wystąpienia usterki krytycznej. Należy dodać, że bezpieczeństwo zależy również od czasu wykrycia uszkodzeń pojedynczych i wielokrotnych. Przy jednym kanale przetwarzania analiza wzoru (1) sprowadza się do wyznaczenia współczynnika intensywności uszkodzeń.

Dla systemu dwukanałowego wzór (1) przyjmuje postać $2\lambda_d/t_{TF}$. W tym przypadku intensywność uszkodzeń krytycznych została zredukowana w stopniu $2t_d/t_{TF}$ (t_d - czas reakcji na uszkodzenie, t_{TF} - średni czas do wystąpienia uszkodzenia w kanale). Dla systemów zarządzania i sterowania ruchem kolejowym zaliczonych do najwyższego czwartego poziomu SIL (ang. Safety Integrity Level) wartości THR powinny zawierać się w przedziale $10^{-9} \leq THR < 10^{-8}$.

Poza wspomnianym wyżej wskaź-

nikiem *THR*, systemy zarządzania i sterowania ruchem kolejowym (sprzęt, oprogramowanie) mogą być poddane analizie za pomocą metod FMEA, FTA czy procesów Markowa, [8], [9], [14]. W przypadku tej ostatniej wykorzystuje się procesy z czasem ciągłym, które korelują z procesem Poissona. Jeżeli przejście z jednego stanu do drugiego wywołane pewnym strumieniem zdarzeń jest strumieniem poissonowskim, to proces losowy przebiegający w systemie jest procesem Markowa o charakterze skokowym i czasie ciągłym. Przejście systemu ze stanu S_i do stanu S_j oznacza się funkcją $\lambda_{ij}(t)$, gdzie λ jest intensywnością uszkodzeń bądź intensywnością przejść. Macierzy opisującej łańcuch odpowiada graf, który można zapisać w postaci układu równań różniczkowych. Równanie różniczkowe dla i -tego stanu przedstawia poniższe równanie:

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = -P_i(t) \sum_{j=1}^n \lambda_{ij}(t) + P_j(t) \sum_{j=1}^n P_j(t) \lambda_{ji}(t) \quad (2)$$

gdzie $i = 1, 2, 3, \dots, n$, $P_i(t)$ – są rozkładami prawdopodobieństw wystąpienia poszczególnych stanów.

Chcąc rozwiązać taki układ muszą być założone warunki początkowe:

$$P_i(0) = P_i \quad (3)$$

gdzie $i = 1, 2, 3, \dots, n$.

Metoda ta w warunkach stacjonarnych pozwala uzyskać układ liniowych równań algebraicznych. Możliwe to jest poprzez zastosowanie przekształcenia Laplace'a:

$$\tilde{f}(s) = L[f(t)] = \int_0^{\infty} e^{-st} f(t) dt \quad (4)$$

Korzystając z własności transformaty:

$$L[f'(t)] = s \tilde{f}(s) - f(0) \quad (5)$$

można układ równań różniczkowych przekształcić do postaci równania algebraicznego, dzięki czemu można wyznaczyć transformaty Laplace'a odpowiednich prawdopodobieństw P_i :

$$s \tilde{P}(s) - P_i(0) = -\tilde{P}_i(s) \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} + \sum_{i=1}^n \lambda_{ij} \tilde{P}_j(s) \quad (6)$$

Układ równań przedstawiony w postaci operatorowej rozwiązywany jest jak klasyczny układ równań liniowych. W przypadku obliczania granicznych wartości prawdopodobieństw korzystamy z twierdzenia granicznego:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} sP(s) = \lim_{t \rightarrow \infty} P(t) \quad (7)$$

Ze względu na sposób pracy i reakcji na zaistniałe uszkodzenie, zgodnie z teorią niezawodności, niektóre systemy sterowania ruchem kolejowym można charakteryzować jako systemy z naprawą (w modelowaniu systemów srk stosowany jest również system bez naprawy). Model systemu z naprawą zakłada cykliczny powrót ze stanu niesprawności (rys. 1).

Dla systemu z naprawą wprowadzone zostało pojęcie gotowości systemu – prawdopodobieństwo, że obiekt jest sprawny w chwili t od rozpoczęcia eksploatacji. Jest to suma prawdopodobieństw przebywania obiektu w stanach sprawności:

$$A(t) = \sum_{i=0}^n P_i(t) \quad (8)$$

gdzie n jest ostatnim stanem sprawności.

Współczynnik gotowości obiektu naprawialnego A wyraża się jako wartość graniczną, co oznacza, że obiekt

będzie sprawny po założonym wystarczająco długim okresie eksploatacji:

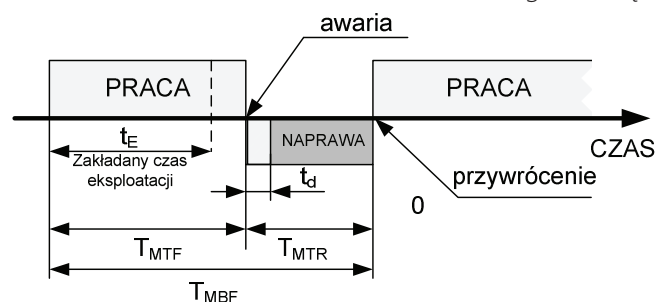
$$A = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) \quad (9)$$

Współczynnik gotowości obiektu naprawialnego można obliczyć na podstawie własności granicznej transformaty Laplace'a przy $s \rightarrow 0$.

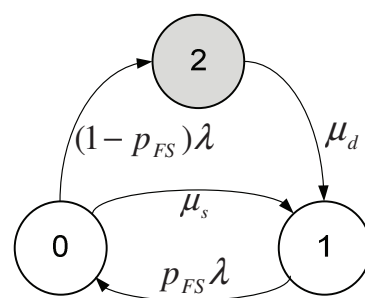
W systemach srk bezpieczeństwo jest intuicyjnie związane z nieprzebywaniem w stanie uszkodzeń wielokrotnych. Dlatego wprowadza się pojęcie tzw. uszkodzenia kontrolowanego. Wszystkie uszkodzenia pojedyncze powinny być kontrolowane (wykrywane w stosunkowo krótkim czasie), zaś uszkodzenia wielokrotne, związane z jednoczesnym wystąpieniem usterki w n kanałach przetwarzania, decydują o wystąpieniu sytuacji niebezpiecznej (przy założeniu odpowiednio krótkiego czasu reakcji wykrycia usterki wielokrotnej). Systemy nadmiarowe nie muszą być systemami bezpiecznymi, znacznie zwiększają się jedynie ich wskaźniki niezawodnościowe, zwłaszcza czas do wystąpienia uszkodzenia krytycznego (zawodność bezpieczeństwa). Z reguły są to systemy tolerujące uszkodzenia pojedynczych elementów, pracujących do uszkodzenia ostatniego elementu (ang. *fault-tolerant*).

W systemach bezpiecznych (ogólny model przedstawiono na rys. 2) wprowadza się dwie grupy stanów końcowych:

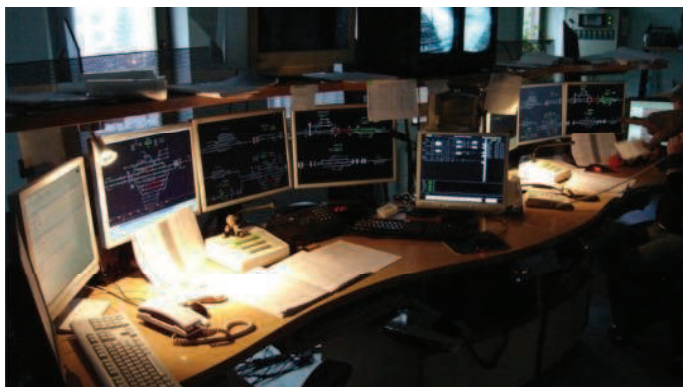
- stan uszkodzeń niebezpiecznych,
 - stan uszkodzeń kontrolowanych.
- System bezpieczny (ang. *fail-safe*) jest to system, w których znalezienie się w stanie uszkodzenia kontrolowanego prowadzi do reakcji bezpieczeństwa – sterowania awaryjnego. Jak można



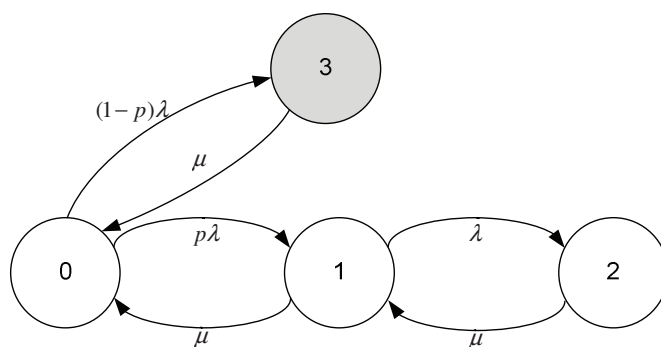
1. Charakterystyka systemu z naprawą



2. Ogólny model systemu bezpiecznego



3. Współczesne centrum sterowania ruchem kolejowym – ILTOR-2



4. Model systemu z naprawą – centrum sterowania

zobaczyć na rys. 2, stan 1 jest stanem uszkodzeń kontrolowanych, przejście do tego stanu zapewniają m.in. rozwiązania telematyczne.

Przedstawiony na rysunku 2 model stanowi stacjonarny i jednorodny proces Markowa. W modelu tym wyróżniono następujące stany:

- 0 – stan poprawnej pracy,
- 1 – stan uszkodzeń kontrolowanych,
- 2 – stan uszkodzeń niebezpiecznych (katastroficznych).

oraz wprowadzono oznaczenia:

- μ_s, μ_d – intensywność napraw w stanie uszkodzeń kontrolowanych oraz

w stanie uszkodzeń niebezpiecznych,

- λ – intensywność uszkodzeń,
- p_{FS} – prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzenia kontrolowanego (np. prawdopodobieństwo przełączenia w chwili wystąpienia uszkodzenia).

Rozwiązując układ równań stanu można obliczyć graniczną wartość prawdopodobieństwa P_2 , czyli prawdopodobieństwa przebywania w stanie uszkodzenia krytycznego

$$P_2 = \frac{\lambda \mu_s (1 - p_{FS})}{\mu_s \mu_d + \lambda (\mu_s - p_{FS} \mu_s + \mu_d)} = \frac{\lambda}{\mu_s} (1 - p_{FS}) \quad (10)$$

Współczynnik gotowości dla modelu z rys. 2 jest wtedy równy $A = 1 - P_2$.

Bezpieczeństwo systemu dyspozytorskiego

Współczesny system dyspozytorski jest przykładem systemu wielokomputerowego, w którym awaria jednego z komputerów powoduje

przełączenie na pracę innego z komputerów, rezerwowego, ale pracującego w trybie gorącej rezerwy (ang. *hot stand-by*). Przykładem takiego systemu może być znany w Polsce system ILTOR-2 przedstawiony na rys. 3, którego model, jako systemu z naprawą, został przedstawiony na rys. 4.

Za przełączenie na pracę komputera rezerwowego odpowiada przełącznik o prawdopodobieństwie poprawnego przełączenia p . W modelu tym wyróżniamy stany:

- 0 – komputer główny i rezerwowo sprawny,
- 1 – stan pracy rezerwowej,
- 2 – stan uszkodzeń kontrolowanych (wyłączenie komputera rezerwowego pracującego jako główny),
- 3 – stan uszkodzeń niebezpiecznych, w którym komputer główny został uszkodzony, a komputer rezerwowy w wyniku niepoprawnego przełączenia nie przejął funkcji sterowania.

Rozwiązując układ równań stanu obliczono prawdopodobieństwo P_3 :

$$P_3 = \frac{(\lambda - p \cdot \lambda) \cdot \mu^2}{\mu \cdot (p \cdot \lambda^2 + \mu \cdot (\lambda + \mu))} \approx \frac{\lambda}{(1 - p) \mu} \quad (11)$$

Zakładając $\lambda = 10^{-5} h^{-1}$, $\mu = 1 h^{-1}$ oraz $p = 1 - 10^{-6}$ graniczna wartość współczynnika gotowości dla $t \rightarrow \infty$ wynosi: $A = 1 - P_3 = 0,99999999$.

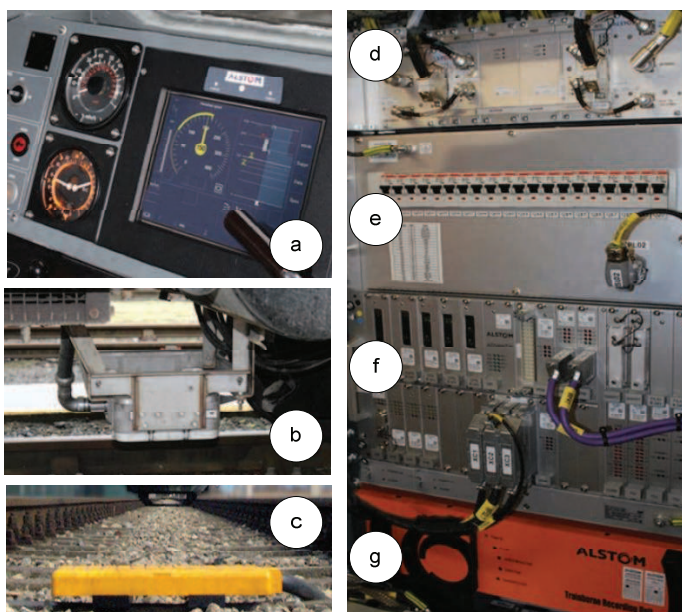
Bezpieczeństwo systemu ERTMS/ETCS

System ETCS (ang. European Train Control System) stanowi jeden z elementów składowych systemu ERTMS

(ang. European Rail Traffic Management System), [10]. Celem systemu ERTMS jest zapewnienie interoperacyjności transportu kolejowego w krajach członkowskich Unii Europejskiej. Jest to spowodowane tym, że zarządcy dróg kolejowych krajów członkowskich mają opracowane własne rozwiązania dotyczące specyfikacji technicznej dla systemów sterowania i zarządzania ruchem kolejowym. Unifikacja różnych systemów sterowania pozwoli na tzw. „kolej bez granic”. W odniesieniu do bezpieczeństwa, system ERTMS może przyczynić się do wyeliminowania zdarzeń mogących powodować zagrożenie w ruchu kolejowym, takich jak zignorowanie sygnału „stój” oraz przekroczenie dopuszczalnej prędkości na danym odcinku. Zastosowane w ERTMS rozwiązania pozwalają na większe prędkości taboru kolejowego oraz większą przepustowość przy zachowaniu wysokiego poziomu bezpieczeństwa, [4], [5], [13]. System ERTMS/ETCS może zostać skonfigurowany do pracy w jednym z poziomów, [1]:

- poziom 1 - rozwiązanie oparte na transmisji zezwoleń na jazdę za pomocą balis,
- poziom 2 - do transmisji zezwoleń na jazdę wykorzystuje się GSM-R, dodatkowo tor wyposażony jest w radiowe centra sterowania (ang. *Radio Block Centre*),
- poziom 3 – stanowi rozwinięcie poziomu drugiego i umożliwia jazdę zgodnie z ruchomym odstępem blokowym. W poziomie tym rezygnuje się z liczników osi oraz obwodów torowych.

Elementy systemu ETCS przedstawio-



5. System ETCS a) interfejs maszynisty, b) antena do komunikacji tor-pojazd c) eurobalisa d) podsystem GSM e) jednostka interfejsów f) komputer pokładowy g) moduł rejestracji danych, [oprac. na podstawie 2]

Tab. 1. Założenia do modelu z rys. 6

Parameter	λ	λ_1, λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	μ	μ_1	μ_2	μ_3
Wartość [h ⁻¹]	6	0.00001	1	0.001	10% λ_4	30	2 μ	0.083	1

no na rys. 5, [2].

Na rys. 6 przedstawiono model dla systemu ERTMS/ETCS.

W modelu możemy wyróżnić:

- Stan 0 – stan pracy normalnej.
- Stan 1 – stan odebrania danych. Realizacja poleceń przez system.
- Stan 2 – uszkodzenie kontrolowane (np. brak transmisji GSM-R). Automatyczne zatrzymanie pociągu.
- Stan 3 – awaryjne przemieszczenie pojazdu.
- Stan 4 – jazda pociągu zgodnie ze wskazaniami sygnalizacji przytorowej.
- Stan 5 – stan krytyczny, niekontrolowany.

Dla modelu z rys. 5 możemy napisać równania stanu: nr 12.

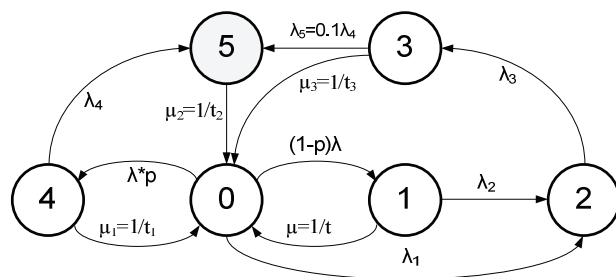
W modelu z rys. 6 założono, że naj-Równanie 12.

$$\begin{cases} \frac{dP_0(t)}{dt} = -[(1-p)\lambda + \lambda_1 + \lambda p]P_0(t) + \mu P_1(t) + \mu_1 P_4(t) + \mu_3 P_3(t) + \mu_2 P_5(t) \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = (1-p)\lambda P_0(t) - \mu P_1(t) - \lambda_2 P_1(t) \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_2 P_1(t) + \lambda_1 P_0(t) - \lambda_3 P_2(t) \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda_3 P_2(t) - \mu_3 P_3(t) - \lambda_5 P_3(t) \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = \lambda P_0(t) - \mu_1 P_4(t) - \lambda_4 P_4(t) \\ \frac{dP_5(t)}{dt} = \lambda_4 P_4(t) + \lambda_5 P_3(t) - \mu_2 P_5(t) \end{cases}$$

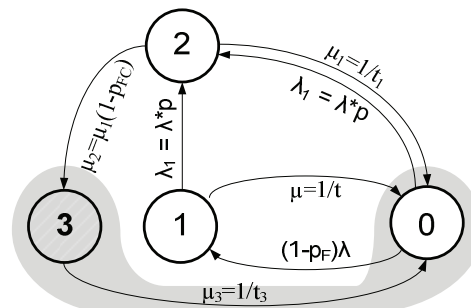
bardziej niepożądanym stanem jest stan 5. Graniczne prawdopodobieństwo znalezienia się w stanie P_5 wynosi:

$$P_5(t)_{t \rightarrow \infty} = [(\mu\lambda_1 + (\lambda + \lambda_1)\lambda_2)\lambda_3(\mu_1 + \lambda_4)\lambda_5 + p\lambda\lambda_3(\mu\lambda(\mu_3 + \lambda_5) + (\mu_3\lambda_4\mu_1\lambda_5))] / [p\mu_2\mu_3\lambda\lambda_2\lambda_3 + \mu_2\mu_3\lambda\lambda_2\lambda_4 - p\mu_2\mu_3\lambda\lambda_2\mu_2\mu_3\lambda_2\lambda_4 + \mu_2\mu_3\lambda_3\lambda_4\rho\mu_2\mu_3\lambda\lambda_3\lambda_4 + \mu_2\mu_3\lambda_2\lambda_3\lambda_4\lambda_2\lambda_3\lambda_4 - p\mu_2\lambda\lambda_2\lambda_3\lambda_4 + p\mu_3\lambda\lambda_2\lambda_3\lambda_4 + \mu_2\lambda_1\lambda_2\lambda_3\lambda_4 + ((\mu_2(\lambda + \lambda_1)\lambda_2 + (\lambda + \lambda_1)\lambda_3 + \mu_2(\lambda + \lambda_2)\lambda_3)\lambda_4 + p\mu_2\lambda(\lambda_2\lambda_3 - (\lambda_2 + \lambda_3)\lambda_4))\lambda_5 + \mu(p\lambda\lambda_3(\mu_2 + \lambda_4)(\mu_3 + \lambda_5) + \mu_1(\lambda_1\lambda_3\lambda_5 + \mu_2(\lambda_1\lambda_3 + \mu_3(\lambda_1 + \lambda_3) + (\lambda_1 + \lambda_3)\lambda_5)) + \lambda_4(\lambda_1\lambda_3\lambda_5 + \mu_2(\lambda_1\lambda_3 + \mu_3(\lambda_1 + \lambda_3) + (\lambda_1 + \lambda_3)\lambda_5))) + \mu_1((\lambda - p\lambda + \lambda_1)\lambda_2\lambda_3\lambda_5 + \mu_2(\lambda_1\lambda_2\lambda_3 + \mu_3(\lambda_2(\lambda_1 + \lambda_3) - (-1 + p)\lambda(\lambda_2 + \lambda_3)) + \lambda_2(\lambda_1 + \lambda_3)\lambda_5 - (-1 + p)\lambda(\lambda_2\lambda_3 + (\lambda_2 + \lambda_3)\lambda_5)))] \quad (13)$$

Zakładając parametry (tabela 1):



6. Model dla systemu ERTMS/ETCS



7. Model systemu ostrzegania o możliwości wystąpienia kolizji na szlaku

Tab. 2. Obliczenia dla modelu z rys. 6

Prawdopodobieństwo p	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
Wartość $A_{3-\infty}$	0.999898	0.999691	0.999476	0.999254	0.999024

obliczono graniczną wartość współczynnika gotowości w zależności od prawdopodobieństwa p nieużywania przez pojazd systemu ERTMS/ETCS, co przedstawiono w tabeli 2.

System wykluczania kolizji pociągów na szlaku – nowe rozwiązania

Proponowana koncepcja dodatkowego systemu informującego maszynistę o innym pociągu na szlaku zakłada: transmisję danych na odległość 10km, możliwość wykorzystania otwartego standardu transmisji danych, instalacja na linii jednotorowej, [12]. Rozwiązanie może funkcjonować w postaci dodatkowego panelu zainstalowanego w kabinie maszynisty. W przypadku wykrycia innego pociągu będącego w zasięgu modułu nadawczego system zaczyna informować o odległości od niego. System może mieć szczególne znaczenie w przypadku ruchu kolizyjnego na jednym torze. Wystarczy wspomnieć o dwóch tragediach, w których zginęło łącznie 35 osób – kolizja w Bari-Barletta (Włochy, 2016) oraz Bad Aibling (Niemcy, 2016). Na rysunku 7 zaproponowano model uwzględniający dodatkowy system

informowania maszyniście o innym pociągu na szlaku.

W modelu można wyróżnić:

- stan 0 - stan prawidłowej pracy,
- stan 1 – oczekiwanie na informację o pociągu będącego w zasięgu modułu radiowego,
- stan 2 - odbiór danych krytycznych,
- stan 3 - stan sytuacji niebezpiecznej.

gdzie:

- λ - intensywność wysyłanych komunikatów na szlaku,
- λ_1 - intensywność wysyłanych komunikatów krytycznych,
- p - prawdopodobieństwo wystąpienia sytuacji krytycznej,
- p_{FC} - prawdopodobieństwo prawidłowej reakcji,
- μ - czas obsługi,
- μ_1 - czas obsługi sytuacji krytycznej,
- μ_2 - intensywność przejścia do stanu niebezpiecznego,
- μ_3 - czas powrotu do pełnej sprawności.

Zakładając parametry: $\lambda=12/h$, $\lambda_1=\lambda p$, $p=0.1\%$, $\mu_1=30/h$, $\mu_2=\mu_1(1-p_{FC})$, $p_{FC}=0.999$, $\mu_3=4h$ oraz rozwiązując układ równań stanu dla modelu z rys. 7, graniczna wartość współczynnika gotowości wynosi:

$$A(t) \lim_{t \rightarrow \infty} = \frac{\lambda_1 \mu_2}{(\mu_1 + \mu_2) \cdot \mu_3 + \lambda_1 \cdot (\mu_2 + \mu_3)} = 0,999952 \quad (14)$$

W przypadku braku dodatkowego systemu model z rys. 7 ogranicza się do stanu 1 i 3 z intensywnością przejścia λ_1 do stanu 3. W takim przypadku graniczna wartość współczynnika gotowości przy tych samych założeniach λ_1 oraz μ_3 wynosi 0,954198.

Wnioski

Analiza matematyczna przeprowadzona w pracy pokazała, jak nowe technologie wywodzące się z obszaru telematyki podnoszą poziom bezpieczeństwa. Przedstawiony i poddany modelowaniu system ERTMS/ETCS stanowi obecnie jedyne rozwiązanie stanowiące interfejs pomiędzy różnymi systemami zarządzania i sterowa-

nia ruchem kolejowym. Jak wskazał Europejski Trybunał Obrachunkowy, koszt wyposażenia europejskiej sieci kolejowej (TEN-T) w system ERTMS może wynieść 188 mld euro, [15]. Nie ulega jednak wątpliwości, iż system jest niezbędny dla zapewnienia interoperacyjności. Autorzy zaprezentowali również koncepcję systemu, który wykorzystując publiczny standard transmisji bezprzewodowej może przyczynić się do poprawy bezpieczeństwa ruchu kolejowego. Przedstawiona koncepcja jest rozszerzeniem rozwiązań stosowanych w innych gałęziach transportu. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Białoń A., Gradowski P., Toruń A.: „Nowoczesne systemy zarządzania ruchem kolejowym (ERTMS)”. Problemy Kolejnictwa – Zeszyt 148, 2009
- [2] UNIFE – The European Rail Industry „International freight corridors equipped with ERTMS”. ERTMS Factsheet, no. 15, 2014
- [3] Norma PN-EN 50126:2002 (U) Zastosowania kolejowe. Specyfikowanie i wykazywanie Nieuszkodzalności, Gotowości, Obsługiwalności i Bezpieczeństwa (RAMS). Część 1: Wymagania podstawowe i procesy ogólnego przeznaczenia
- [4] Lewiński A., Toruń A., Gradowski P.: “Modeling of ETCS with respect to functionality and safety including Polish Railways conditions”, Communications In Computer And Information Science, Telematics – Support Of Transport (471), Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014
- [5] Lewiński A., Toruń A.: „The efficiency analysis of train monitoring system applying the Changeable Block Distance method”, Communications in Computer and Information Science (395), Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013
- [6] Lewiński A.: „Nowoczesne systemy telematyki kolejowej”, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom, 2012, ISBN 978- 83- 7351-506-2
- [7] Winter P. and other: Compendium

on ERTMS. ISBN 978-3-7771-0396-9, UIC, (1st edition), 2009

- [8] Qiu, S., Sallak, M., Schön, W., Cherfi, Z., “Modeling of ERTMS Level 2 as an SoS and Evaluation of its Dependability Parameters Using Statecharts”. IEEE Systems Journal. 8. 10.1109/JSYST.2013.2297751, 2014
- [9] Carnevali L., Flammini F., Paolieri M., Vicario E. (2015) Non-Markovian Performability Evaluation of ERTMS/ETCS Level 3. In: Beltrán M., Knottenbelt W., Bradley J. (eds) Computer Performance Engineering. EPEW 2015. Lecture Notes in Computer Science, vol 9272. Springer
- [10] Młyńczak J., Toruń A., Bester L., “European Rail Traffic Management System (ERTMS)”. In: Ślaskowski A., Pamuła W. (eds) Intelligent Transportation Systems – Problems and Perspectives. Studies in Systems, Decision and Control, vol 32. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016
- [11] Lewiński A., Perzyński T.: “The reliability and safety of railway control systems based on new information technologies”. Communications In Computer and Information Science. Transport Systems Telematics (104), Springer 2010
- [12] Perzyński T. “Wybrane systemy telematyki w bezpieczeństwie i zarządzaniu transportem lądowym I śródlądowym,” Seria Monografie (201), Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom, Radom 2016
- [13] Lewiński A., Toruń A.: “The Changeable Block Distance System Analysis”, Communications in Computer and Information Science (104), Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010
- [14] Leitner, Bohuš. (2017). A General Model for Railway Systems Risk Assessment with the Use of Railway Accident Scenarios Analysis. Procedia Engineering. 187. 150-159. 10.1016/j.proeng.2017.04.361
- [15] European Court of Auditors. Special report no 13/2017: A single European rail traffic management system: will the political choice ever become reality?. Luxembourg 2017