

Andrzej Lewiński  
Politechnika Radomska  
Wydział Transportu i Elektrotechniki

Lucyna Bester  
Politechnika Radomska  
Wydział Transportu i Elektrotechniki

## **ZASTOSOWANIE BEZPRZEWODOWYCH SYSTEMÓW TRANSMISJI DO POPRAWY BEZPIECZEŃSTWA NA PRZEJAZDACH KOLEJOWYCH**

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono model niestrzeżonego przejazdu kolejowego wyposażonego w dodatkowy system ostrzegania kierowców. Zaproponowano publiczne standardy WSN, Wi-Fi i WiMax do przekazywania informacji użytkownikom ruchu drogowego o zbliżającym się pociągu. W pracy pokazano jak bezprzewodowa transmisja danych oparta na sieciach publicznych może istotnie podnieść poziom bezpieczeństwa przyszłych systemów sterowania ruchem kolejowym.

**Słowa kluczowe:** bezpieczeństwo przejazdów kolejowych, modele i procesy Markowa, bezprzewodowe technologie informacyjne

### **1. OBECNY STAN BEZPIECZEŃSTWA NA PRZEJAZDACH KOLEJOWYCH**

Jednym z najważniejszych i zarazem najtrudniejszych zadań w ruchu kolejowym jest zapewnienie bezpieczeństwa na przejazdach kolejowych. Liczba wypadków kolejowych jest oczywiście związana z wielkością wykonywanych przewozów, intensywnością ruchu kolejowego i drogowego oraz sprawnością systemu przekazywania informacji. W długoterminowej eksploatacji systemów sygnalizacji przejazdowej ssp możliwe jest wystąpieniem uszkodzenia systemu, dlatego w takiej sytuacji dąży się to tego, aby doszło jedynie do zawodności systemu a nie zawodności bezpieczeństwa.

W Unii Europejskiej każdego roku co najmniej 600 osób ginie w wypadkach na przejazdach kolejowych. 95 % tych wypadków jest spowodowane przez użytkowników dróg, w Polsce aż 98 % [4].

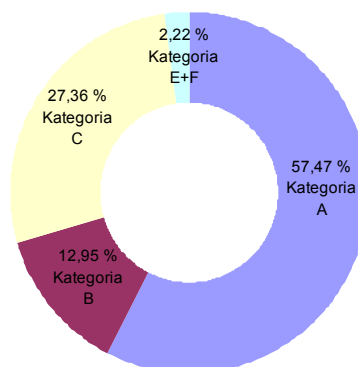
Stan bezpieczeństwa ruchu na liniach kolejowych w ostatnich latach obrazuje poniższa tabela 1. Z punktu postrzegania bezpieczeństwa na kolei, zwrócono szczególną uwagę na wypadki kolejowe w grupie na przejazdach kolejowych – kolizje z pojazdami drogowymi.

Tabela 1.

**Zestawienie wypadków na przejazdach kategorii A, B, C i D w latach 2007 – 2009**

	2007 r.	2008 r.	2009 r.
Ilość wypadków ogółem	410	426	401
Zabici	48	38	51
Ranni	106	91	68
Kierujący pojazdami drogowymi	269	233	256
Kategoria przejazdu A	17	15	11
Kat. B	13	11	16
Kat. C	64	55	64
Kat. D	168	145	168

(źródło[4], dostęp w dniu 20.03.2010)



Rys. 1. Zabezpieczenia ruchu na przejazdach kolejowych poszczególnych kategorii

Transmisja danych pomiędzy urządzeniami w eksploatowanych systemach sygnalizacji przejazdowej jest rozwiązana w oparciu o takie standardy jak Ethernet, łącze RS232/485, łącza światłowodowe oraz transmisja radiowa. Zapewnienie dużego stopnia niezawodności i spełnienia odpowiednich wymogów bezpieczeństwa, w systemie osiągnięto m.in. poprzez:

- wykorzystanie specjalistycznych urządzeń sieciowych dedykowanych dla sieci przemysłowych,
- bezpieczny protokół transmisji cyfrowej,
- dwuprocessorowe układy nastawnika i sterowników (zamykanie napędów zgodnie z funkcją OR, otwieranie napędów zgodnie z funkcją AND),
- kontrolę poprawności pracy newralgicznych elementów z informacją o ich uszkodzeniu,

- samoczynne uruchomienie systemu w przypadku zaniku transmisji.

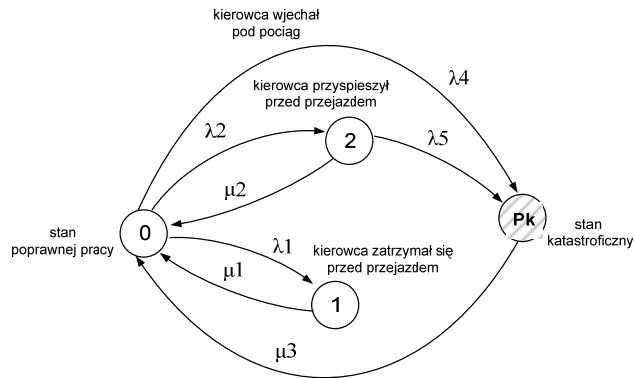
Rozwój technologii teleinformatycznych oraz szeroki zakres możliwości ich zastosowania w systemach kolejowych wprowadził wiele nowych systemów automatyki kolejowej i urządzeń sterownia systemem przejazdowym opartych na zaawansowanej technice mikroprocesorowej. Aktualnie komputerowe systemy srk zainstalowane są w 68 okręgach nastawczych sterując sygnalizatorami i zwrotnicami, urządzenia zdalnego sterowania obejmują 642,1 km linii kolejowych i 55 stacji oraz 859 przejazdów kolejowych wyposażonych w nowoczesne systemy komputerowe w tym 354 przejazdy kolejowe wyposażone w systemy przejazdowe najnowszej generacji sterowane mikroprocesorami.

Ważnym czynnikiem oprócz sprawnej sygnalizacji, mogącym poprawić bezpieczeństwo na przejazdach kolejowych jest niezawodna komunikacja zwłaszcza, gdy chodzi o bezprzewodowe systemy transmisji danych. Jako dodatkowy element ostrzegania na przejeździe kolejowym zaproponowano publiczne standardy takie jak bezprzewodowa sieć sensorowa WSN (Wireless Sensor Network), Wi – Fi oraz technologia WiMax. Umożliwią one jako system dodatkowego ostrzegania, wysyłanie informacji do użytkowników samochodów o stanie przejazdu kolejowego oraz przekazywanie komunikatów do centrum sterowania o niesprawnym systemie sygnalizacji na przejeździe kolejowym.

## **2. KONCEPCJA OSTRZEGANIA KIEROWCÓW NA PRZEJEŹDZIE KOLEJOWYM**

W celu podniesienia bezpieczeństwa przyszłych kolejowych systemów sygnalizacji przejazdowej zaproponowano model systemu dodatkowego ostrzegania kierowców na przejazdach kolejowych kategorii D wyposażonych w sygnalizację przejazdową świetlną i dźwiękową (rys. 3). System ten jest dodatkowym modułem w istniejącym już systemie sygnalizacji przejazdowej, który może współdziałać z system ssp Zaproponowany dodatkowy bezprzewodowy system ostrzegania kierowców może ostrzegać uczestników ruchu drogowego znajdujących się w obrębie przejazdu kolejowego przed zbliżającym się pociągiem [3]. Może też przekazywać komunikaty o niesprawnym lub uszkodzonym systemie sygnalizacji gdzie bezpieczeństwo zależy bezpośrednio od właściwej reakcji kierowcy. Przedstawiono też prosty model zachowania się uczestników ruchu na przejeździe kolejowym wyposażonym tylko w system sygnalizacji świetlnej i dźwiękowej (rys. 2). Przyjęto proces Poisson'a opisujący zgłaszanie się pojazdów, co prowadzi do wykładniczego rozkładu czasu występowania zdarzeń. Poniżej zdefiniowane zostały stany występujące w modelach.

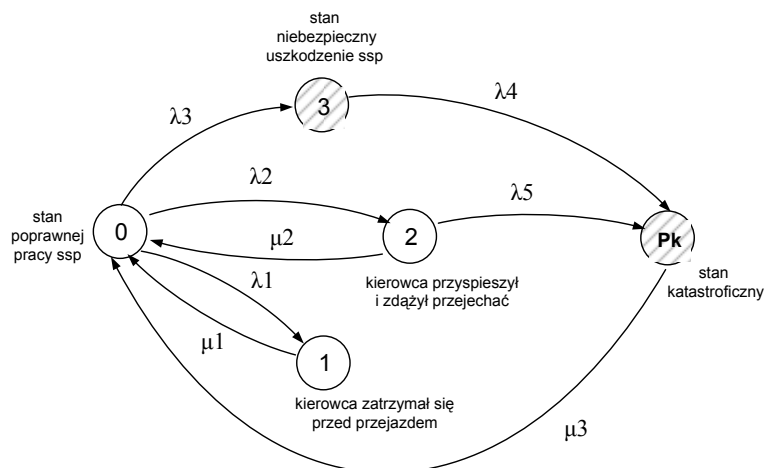
- 0 - stan poprawnej pracy, samochody przejeżdżają przez przejazd kolejowy, brak obecności pociągu
- 1 - kierowca zatrzymał się przed przejazdem,
- 2 - kierowca przyspieszył przed przejazdem,
- Pk - stan katastroficzny w którym kierowca wjeżdża na tory kolejowe pod nadjeżdżający pociąg.



Rys. 2. Prosty model zachowania się uczestników ruchu na przejeździe kolejowym niestrzeżonym kat. D

W modelu uwzględniającym dodatkowe ostrzeżenie o pociągu został wprowadzony dodatkowy stan P3 [3]:

- 0 - stan poprawnej pracy, stan jednorodnej jazdy kolumny pojazdów przez tory kolejowe,
- 1 - kierowca otrzymuje komunikat o pociągu i zatrzymuje się przed przejazdem kolejowym,
- 2 - kierowca odebrał komunikat ostrzegający o pociągu a mimo to przyspieszył,
- 3 - stan niebezpieczny, uszkodzenie systemu SSP,
- Pk - stan katastroficzny w którym kierowca wjeżdża na tory kolejowe pod nadjeżdżający pociąg.



Rys. 3. Model zachowania się uczestników ruchu na przejeździe kolejowym kat. D z dodatkowym systemem ostrzeżenia kierowców

## 2.1. Analiza wystąpienia sytuacji niebezpiecznych

Modele przedstawione na rysunkach 2 i 3 przedstawiają typowe zachowania uczestników ruchu zbliżających się do przejazdu kolejowego. Analiza modeli umożliwia

wyznaczenie granicznych prawdopodobieństw przebywania w stanach niebezpiecznych. Do wyznaczenia tych stanów w modelach wykorzystano stochastyczne procesy Markowa.

Dla modelu na rys. 2 przejazdu kolejowego kategorii D prawdopodobieństwo (przy  $t \rightarrow \infty$ ) stanu niebezpiecznego Pk wynosi:

$$Pk = Pk(t)_{t \rightarrow \infty} \frac{\mu_1(\lambda_2\lambda_5 + \lambda_4(\lambda_5 + \mu_2))}{\lambda_2\mu_1(\lambda_5 + \mu_3) + (\lambda_5 + \mu_2)(\lambda_4\mu_1 + (\lambda_1 + \mu_1)\mu_3)} \quad (1)$$

Parametry związane z zachowaniem i czasem reakcji kierowcy są to intensywność przejścia do stanu  $\lambda$  [ $h^{-1}$ ], oraz odwrotność czasu powrotu do stanu 0 - stanu poprawnej pracy systemu  $\mu$  [ $h^{-1}$ ].

Ponieważ uwzględniono zbliżone warunki dla ruchu drogowego i kolejowego, dlatego suma intensywności przejść  $\lambda$  w ruchu drogowym musi być równa sumie intensywności przejść  $\lambda$  dla ruchu kolejowego.

Zakładając typowe parametry  $\mu$  i  $\lambda$  dla średniego czasu 10 i 40 minut pomiędzy pojawieniem się pociągów, otrzymano następujące wartości prawdopodobieństwa przebywania w stanie katastroficznym Pk.

10 min. pomiędzy pociągami	40 min. pomiędzy pociągami
$\lambda_1 = 0.001666666$	$\lambda_1 = 0.000416666$
$\lambda_2 = 0.000183333$	$\lambda_2 = 0.000045833$
$\lambda_4 = 1.833333333^{-10}$	$\lambda_4 = 4.583333333^{-11}$
$\lambda_5 = 0.000001833$	$\lambda_5 = 0.000000458$
$\mu_1 = 0.125$	$\mu_1 = 0.125$
$\mu_2 = 0.005555556$	$\mu_2 = 0.005555556$
$\mu_3 = 0.00009644$	$\mu_3 = 0.00009644$

Obliczona wartość stanu niebezpiecznego Pk

$$Pk = 0.00104231933481$$

$$Pk = 0.00006803908645$$

Parametr  $\lambda$  jest intensywnością pojawiania się pojazdów odpowiednio pomiędzy zdarzeniami (odwrotność średniego czasu pomiędzy pojazdami),  $\mu$  jest szybkością powrotu systemu do stanu poprawnej pracy. Na podstawie tego modelu można wykazać, że dla modelu bezpiecznego systemu przejazdowego wyposażonego w dodatkowy system ostrzegania kierowców, najważniejszym pod względem bezpieczeństwa stanem jest stan Pk. Wyznaczając graniczne prawdopodobieństwo przy  $t \rightarrow \infty$  przebywania w tym stanie, otrzymano [3]:

$$Pk = Pk(t)_{t \rightarrow \infty} \frac{\mu_1\lambda_4(\lambda_2\lambda_5 + \lambda_3(\lambda_5 + \mu_2))}{\lambda_2\lambda_4\mu_1(\lambda_5 + \mu_3) + (\lambda_5 + \mu_2)(\lambda_4(\lambda_1 + \mu_1)\mu_3 + \lambda_3\mu_1(\lambda_4 + \mu_3))} \quad (2)$$

W modelu z dodatkowym systemem ostrzegania kierowców (rys. 3), dla założonych parametrów  $\mu$  i  $\lambda$  oraz dla średniego czasu 10 i 40 minut pomiędzy pociągami, otrzymano następujące wartości prawdopodobieństwa Pk.

10 min. pomiędzy pociągami	40 min. pomiędzy pociągami
$\lambda_1 = 0.001666667$	$\lambda_1 = 0.000416667$
$\lambda_2 = 0.000166667$	$\lambda_2 = 4.16667^{-5}$
$\lambda_3 = 1.66667^{-6}$	$\lambda_3 = 4.16667^{-7}$
$\lambda_4 = 1.66667^{-10}$	$\lambda_4 = 4.16667^{-11}$
$\lambda_5 = 1.66667^{-9}$	$\lambda_5 = 4.16667^{-10}$
$\mu_1 = 0.005555556$	$\mu_1 = 0.005555556$
$\mu_2 = 0.125$	$\mu_2 = 0.125$
$\mu_3 = 0.1$	$\mu_3 = 0.1$

Obliczona wartość stanu niebezpiecznego Pk

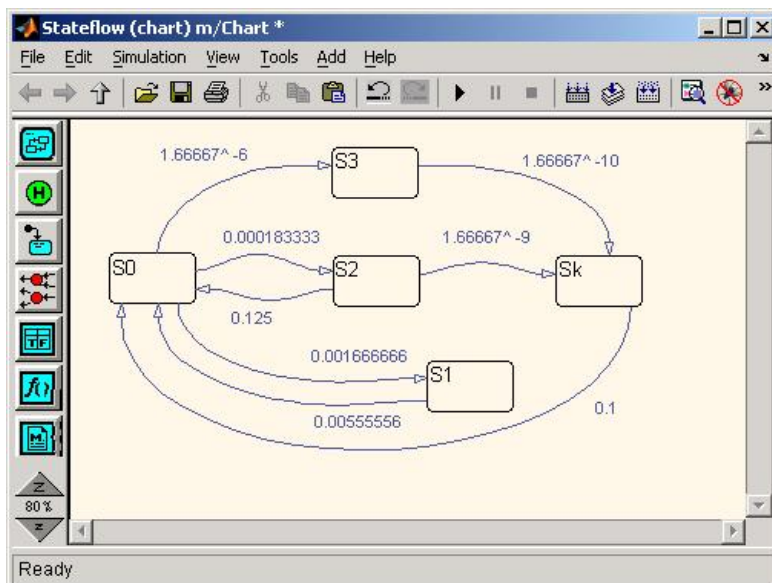
$$P_k = 0.0000027202$$

$$P_k = 0.0000007289$$

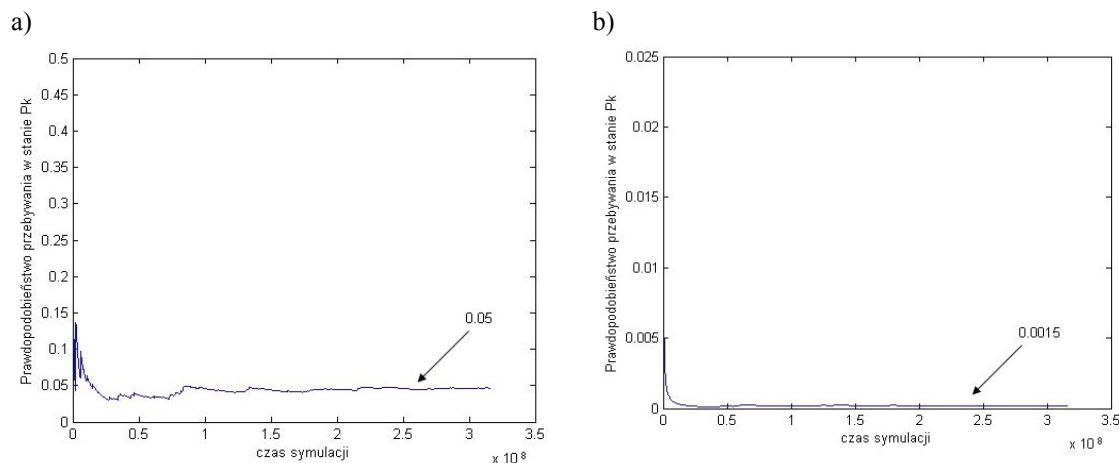
Analizując modele pokazane na rysunkach 2 i 3 oszacowano prawdopodobieństwo wystąpienia stanu katastroficznego Pk. Uzyskane wartości dla modelu systemu z dodatkowym ostrzeganiem kierowców są rzędu  $10^{-7}$  podczas gdy dla modelu bez dodatkowego ostrzegania jest na poziomie  $10^{-5}$ . Wyniki te pokazują, że wprowadzenie dodatkowego systemu ostrzegania kierowców na przejeździe wpływa znacząco na poprawę bezpieczeństwa. Dodatkowe komunikaty o zbliżaniu się pociągu prowokują właściwe zachowanie kierowcy, co może zredukować wypadki na przejazdach kolejowych (mniejsze prawdopodobieństwo wystąpienia stanu Pk).

## 2.2. Badania symulacyjne

Komputerowe symulacje matematycznych modeli zostały przeprowadzone w programie Matlab/Simulink w module StateFlow (SF), przeznaczonym do modelowania i symulacji układów o skończonej liczbie stanów oraz procesów ze zdarzeniami (układy reaktywne). W układzie takim następuje przejście (tranzycja) pomiędzy stanami po wystąpieniu zdarzenia i spełnieniu warunku definiującego takie przejście. Model symulacyjny struktury przejazdu kolejowego (rys. 3) wyposażonego w dodatkowy system ostrzegania został przedstawiony na rysunku 4.



Rys. 4. Symulacyjny modelu przejazdu kolejowego kat D, wyposażonego w dodatkowy system ostrzegania kierowców



Rys. 5. Wyniki symulacji modelu przejazdu kat. D bez ostrzegania a) i z dodatkowym ostrzeganiem b) przedstawiające wartości prawdopodobieństwa przebywania w stanie katastroficznym Pk w funkcji czasu symulacji

Rysunek 5 przedstawia graficzne wyniki symulacji dla analizowanych modeli. Przeprowadzone badania symulacyjne umożliwiły porównanie wyznaczonych analitycznie granicznych prawdopodobieństw przebywania w stanach niebezpiecznych, które zostały przeprowadzone dla czasu pracy modeli 87600 godzin.

### 3. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono przykład systemu ssp wyposażonego w dodatkowy system ostrzegania kierowców na przejeździe kolejowym oparty na nowych technologii informacyjnych. Zaproponowane modele systemów przedstawiają metodę poprawy bezpieczeństwa oraz redukcji wypadków na przejazdach kolejowych spowodowanych przez kierowców. Uzyskane wartości prawdopodobieństw stanów niebezpiecznych są związane z ilością przejeżdżających samochodów, jazdą pociągów, intensywnością zdarzeń i systemem ostrzegania o kolizji. Parametry te opisują sprawność bezpiecznego systemu. Sprawny system transmisji komunikatów ostrzegających może znacznie ograniczyć liczbę wypadków zwłaszcza na przejazdach gdzie bezpieczeństwo zależy bezpośrednio od właściwej reakcji kierowcy.

### Bibliografia

1. BEIBEI WANG, INDRANIL SEN, D. W. MATOLAK, „Performance evaluation of 802.16e in vehicle-to-vehicle channels“, 66th IEEE Vehicle Technology Conference, VTC Fall 2007, Baltimore, MD, USA. IEEE 2007.
2. JAŻWIŃSKI J., WAŻYŃSKA-FIOK K. „Bezpieczeństwo systemów”, PWN Warszawa 1993.
3. LEWIŃSKI A., ROGOWSKI A., BESTER L. The modeling of collision with train - car respect to integrated transport safety system. Advanced in Transport Systems Telematics, Ed. J. Mikulski, Publisher Faculty of Transport Silesian University of Technology, Katowice 2009.
4. [www.bezpieczny-przejazd.pl/bezpieczenstwo-w-europie](http://www.bezpieczny-przejazd.pl/bezpieczenstwo-w-europie) (dostęp w dniu 20.03.2010).

## **APPLICATION OF WIRELESS TRANSMISSION SYSTEMS FOR IMPROVING SAFETY AT RAILWAY CROSSINGS**

**Abstract:** The article presents the model of unguarded railway crossing equipped with an additional system warning drivers. Proposed public standards, WSN Wi-Fi and WiMax provide additional information to users about train. The aim of the study is to show how wireless data transmission in public networks can significantly improve the safety of future railway traffic control systems.

**Keywords:** Safety of railway crossings, Markov models and processes, wireless information technology