



Lucyna BESTER, Andrzej LEWIŃSKI

## **WPLYW WARUNKÓW POGODOWYCH NA BEZPIECZEŃSTWO KIEROWCÓW NA NIESTRZEŻONYCH PRZEJAZDACH KOLEJOWYCH**

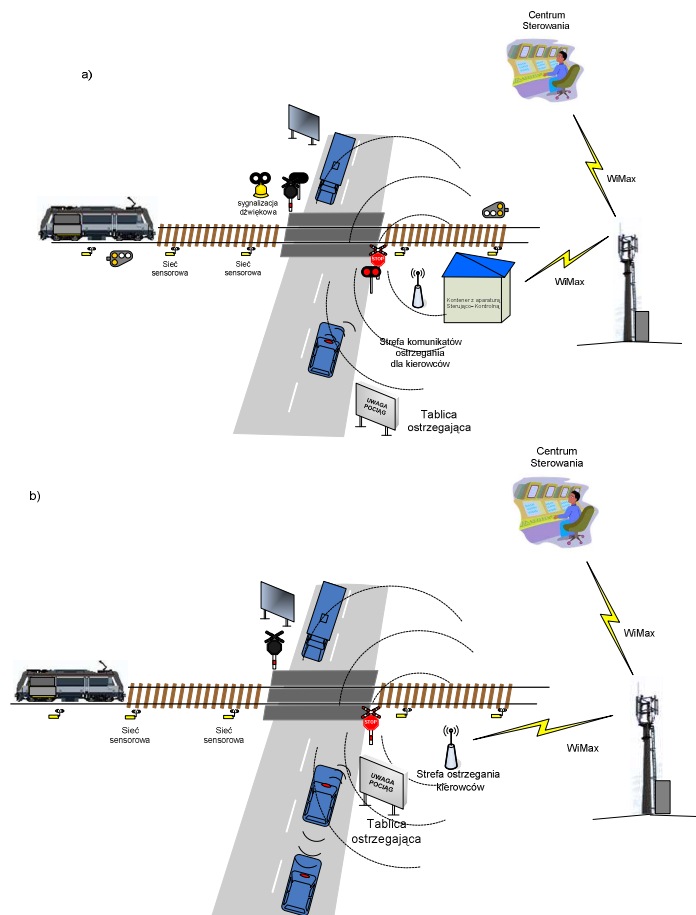
### *Streszczenie*

*W artykule przedstawiono system ostrzegania na niestrzeżonych przejazdach kolejowych oparty na bezprzewodowych standardach transmisji WiFi, WiMax i WSN. Praca systemu opiera na otwartej transmisji radiowej i umożliwia informowanie kierowców o pociągu w obrębie skrzyżowania, a opracowany na teorii procesów Markowa model, zastosowany do analizy matematycznej oraz do symulacji, pokazuje, że można zmniejszyć prawdopodobieństwo kolizji z pociągiem o rząd  $10^2$ . Zakładając typowe parametry dla niesprzyjających warunków pogodowych (duży deszcz, śnieg, mgła) proponowany system zapewnia jeszcze lepsze parametry bezpieczeństwa – znacznie mniejsze prawdopodobieństwo kolizji samochodu z pociągiem.*

### **WSTĘP**

We wcześniejszych pracach zaproponowany został system dodatkowego ostrzegania kierowców o pociągu znajdującym się w obrębie niestrzeżonego skrzyżowania (lub skrzyżowania bez zapór wyposażonego jedynie w sygnalizatory drogowe). Strukturę takiego systemu przedstawia rys.1, pociąg zbliżający się do niestrzeżonego przejazdu kolejowego informuje samochody znajdujące się w obrębie przejazdu poprzez sieć sensorową WSN (ang. *Wireless Sensor Network*), oraz publiczne standardy bezprzewodowe WiFi i WiMax (ang. *World Interoperability for Microwave Access*) [1,2].

Wymienione powyżej standardy transmisji bezprzewodowej mogą być wykorzystane, jako podstawowe medium transmisji komunikatów ostrzegawczych. Architektura transmisyjna przewiduje transmisje informacji w konfiguracji punkt-punkt i punkt-wielopunkt, co w odniesieniu do rozproszonych systemów przejazdów kolejowych może w istotny sposób wpłynąć na poprawę komunikacji pomiędzy pojazdami a istniejącą już infrastrukturą przytorową. WiMAX jest komplementarną technologią do świadczenia usług drogą radiową na terenach ze słabo rozwiniętą infrastrukturą telekomunikacyjną umożliwiając dostęp do zdalnego sterowania urządzeniami na przejeździe lub też do monitorowania zdarzeń na przejeździe. Standardy te umożliwią, jako system dodatkowego ostrzegania, wysyłanie informacji do użytkowników samochodów o stanie przejazdu kolejowego o zbliżającym się pociągu do przejazdu oraz przekazywanie komunikatów do centrum sterowania o usterkach lub nieprawidłowym działaniu systemu sygnalizacji na przejeździe kolejowym [4,5].



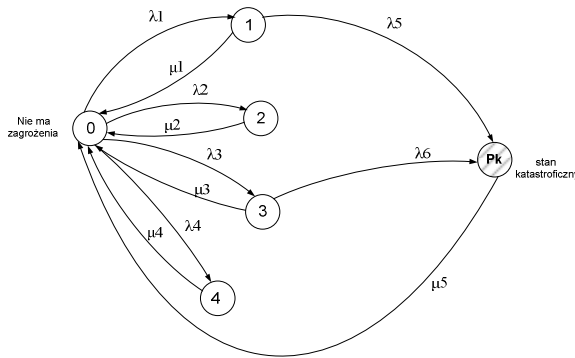
**Rys.1** Przejazd z realizacją dodatkowego systemu ostrzegania kierowców na przejazdach, a) kat. C, b) kat. D [4]

Na przejazdach kat. D (i C) jednym z czynników decydujących o bezpieczeństwie użytkowników drogi na przejazdach kolejowo-drogowych jest dobra widoczność nadjeżdżającego pociągu.

## 1. BEZPIECZEŃSTWO NA PRZEJAZDACH KOLEJOWYCH WYPOSAŻONYCH W DODATKOWY SYSTEM OSTRZEGANIA KIEROWCÓW

Aby pokazać istotny poziom zagrożeń na niestrzeżonych przejazdach kolejowych został opracowany model przejazdu. Opisując typowe sytuacje, jakie mogą wystąpić na przejeździe wyposażonym w dodatkowy system ostrzegania zastosowano procesy stochastyczne w postaci jednorodnego, stacjonarnego i ergodycznego procesu Markowa [1,3,4].

Ponieważ przejazdy kat. C i kat. D są przejazdami bez zapór przy zastosowaniu dodatkowego systemu ostrzegania modele te można połączyć i przedstawiać w postaci jednego pokazanego na rys. 2. Celem opracowania takiego modelu jest przede wszystkim analiza wystąpienia sytuacji katastroficznej, które pozwolą na zapewnienie maksymalnego czasu pracy systemu bez wystąpienia stanu katastroficznego (zderzenia samochodu z pociągiem).



**Rys. 2.** Model systemu z dodatkowym ostrzeganiem kierowców na przejazdach kat. C lub D

Zastosowano następujący opis poszczególnych stanów w modelu:

Stan 0 – stan, w którym nie ma zagrożenia,

- pojawił się pociąg i nie pojawił się samochód,
- pojawił się samochód i nie pojawił się pociąg,

Stan 1 – kierowca nie otrzymał komunikatu i nie zatrzymał się przed przejazdem,

Stan 2 - kierowca nie otrzymał komunikatu i zatrzymał się przed przejazdem,

Stan 3 - kierowca otrzymał komunikat i nie zatrzymał się przed przejazdem,

Stan 4 - kierowca otrzymał komunikat i zatrzymał się przed przejazdem,

Stan Pk – Stan katastroficzny, kierowca wjechał pod pociąg pod nadjeżdżający pociąg.

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

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$  – intensywność zdarzenia (pojawił się pociąg i samochód),

$\lambda_5, \lambda_6$  – intensywność zdarzenia katastroficznego (kierowca wjechał pod pociąg),

$\mu_1, \mu_3$  – intensywność powrotu do stanu 0 (kierowca przejechał, nie ma zagrożenia).

Do przeprowadzenia analizy probabilistycznej najważniejszym pod względem bezpieczeństwa stanem jest stan Pk. Prawdopodobieństwo graniczne przy  $t \rightarrow \infty$  wystąpienia stanu katastroficznego przedstawia wzór (1).

$$Pk = Pk(t)_{t \rightarrow \infty} = \frac{\mu_2(\lambda_3\lambda_6(\lambda_5 + \mu_1) + \lambda_1\lambda_5(\lambda_6 + \mu_3)\mu_4)}{\lambda_1\mu_2(\lambda_6 + \mu_3)\mu_4(\lambda_5 + \mu_5) + (\lambda_5 + \mu_1)((\lambda_6 + \mu_3)(\lambda_4\mu_2 + (\lambda_2 + \mu_2)\mu_4)\mu_5 + \lambda_3\mu_2\mu_4(\lambda_6 + \mu_5))} \quad (1)$$

Ponieważ uwzględniono zbliżone warunki dla ruchu drogowego i kolejowego, dlatego w badanych modelach przyjęto założenie, że suma intensywności przejść  $\lambda$  dla modeli na rysunku 2 jest równa intensywności przejść  $\lambda$  w modelu na rysunku 3.

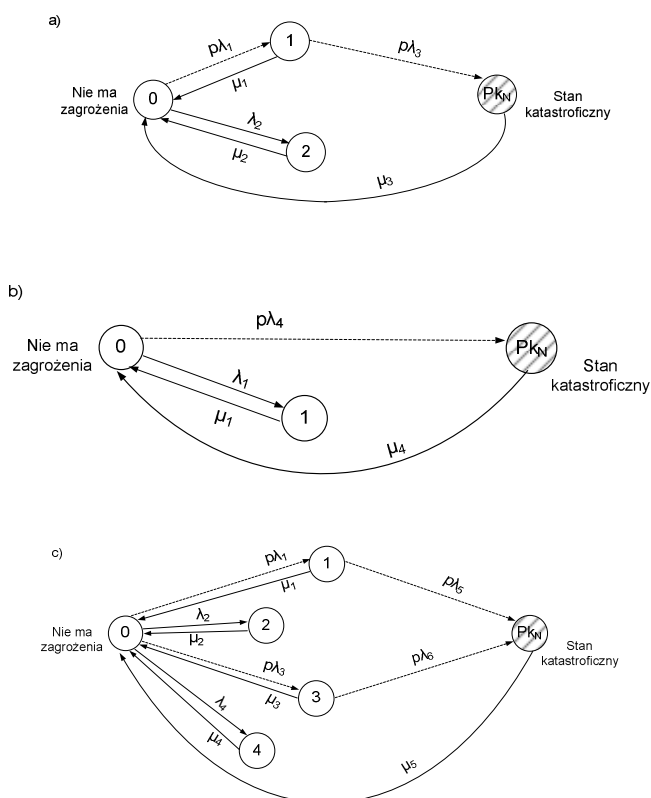
Analiza została przeprowadzona dla średniego iloczynu ruchu (14400 pojazdów/dobę) natężenia ruchu pojazdów  $\lambda$ . Z wyniku analizy wynika, że prawdopodobieństwo wystąpienia stanu Pk jest równe  $Pk = 9.031 \cdot 10^{-7}$ . Natomiast wyznaczony średni czas  $T_{MTF}$  do wystąpienia stanu Pk jest na poziomie  $T_{MTF} = 6.9198 \cdot 10^6$  h.

Dla potwierdzenia celowości wprowadzania nowego systemu do eksploatacji musi on zapewniać przynajmniej ten sam poziom bezpieczeństwa, co dotychczas wykorzystywane systemy. Na bazie przeprowadzonych obliczeń można stwierdzić, że wprowadzenie dodatkowego ostrzegania kierowców zbliżających się do przejazdu kolejowego może istotnie wpłynąć na poprawę bezpieczeństwa [2].

## 2. WPŁYW WARUNKÓW POGODOWYCH NA BEZPIECZEŃSTWO NA PRZEJEŹDZIE KOLEJOWYM

W analizowanych modelach przejazdów kategorii C i D oraz modelu z dodatkowym ostrzeganiem, założono parametr „p”, który określa prawdopodobieństwo zderzenia samochodu z pociągiem w złych warunków pogodowych. Warunki pogodowe mają wpływ na podjęcie przez kierującego decyzji o wjeździe na tory kolejowe nawet, gdy kierowca został ostrzeżony o zbliżającym się pociągu (sygnalizacja przejazdowa). Dalej zdarzenie takie będzie nazywane „nietypowym zachowaniem kierowcy”.

Na rysunku 3 przedstawiono badane w pracy modele z zaznaczonymi przejściami pomiędzy stanami, na których pojawia się parametr „p”, który oznacza wystąpienie takiej sytuacji.



**Rys. 3** Modele analizy systemów przejazdowych z parametrem złych warunków pogodowych a) model przejazdu kategorii D, b) model przejazdu kategorii C, c) model systemu przejazdowego z dodatkowym ostrzeganiem kierowców (kat. C/kat. D)

Założono dwa przypadki określające nietypowe zachowanie kierowców z prawdopodobieństwem o wartości  $p=0.3$  i  $p=0.01$ . Prawdopodobieństwo 0.3 (najgorszy przypadek) oznacza, że co trzeci kierowca w złych warunków pogodowych nie dostrzegł nadjeżdżającego pociągu i wjechał na tory. Natomiast dla  $p=0.01$  oznacza, że co setny kierujący wjechał na tory (dla  $p = 0.01$  zachodzi zależność  $p \lambda_1$  odpowiada wartości  $\lambda_1$  z modeli poprzednich dla przejazdów kat D i C z ostrzeganiem i bez ostrzegania).

Dla układu równań opisujących zachowanie się systemu dla bardzo dużego upływu czasu (przy  $t \rightarrow \infty$ ), dla modelu kat. D otrzymano graniczne prawdopodobieństwo wystąpienia stanu nietypowej reakcji kierowcy  $Pk_N$ .

$$Pk_N = \lim_{t \rightarrow \infty} Pk_N(t) = \frac{p \lambda_1 \lambda_3 \mu_2}{(p \lambda_3 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2) \mu_3 + p \lambda_1 \mu_2 (p \lambda_3 + \mu_3)} \quad (2)$$

Dla założonego parametru  $p=0.3$ , intensywności przejścia pomiędzy stanami 1 i stanem  $PK_K$ , wynoszą odpowiednio  $p\lambda_1=0.27$ ,  $p\lambda_3=1.3\cdot 10^{-6}$ . Prawdopodobieństwo  $PK_N$  wynosi  $Pk_N=1.4\cdot 10^{-4}$ . Natomiast dla parametru  $p=0.01$  intensywności przejścia przyjmuje wartość  $p\lambda_1=0.0089$ ,  $p\lambda_3=4.5\cdot 10^{-8}$  a prawdopodobieństwo  $Pk_N=1.94\cdot 10^{-6}$ .

W obliczeniach dla modelu przejazdu kategorii C prawdopodobieństwo  $Pk_N$  opisane jest zależnością:

$$Pk_N = \lim_{t \rightarrow \infty} Pk_N(t) = \frac{p\lambda_4\mu_1}{p\lambda_4\mu_1 + (\lambda_1 + \mu_1)\mu_4} \quad (3)$$

Dla założonego parametru  $p=0.3$ , wartość intensywności przejścia wynosi  $p\lambda_4=0.021$  a prawdopodobieństwo  $Pk_N=1.8\cdot 10^{-2}$ . Natomiast dla parametru  $p=0.01$  i intensywności  $p\lambda_4=0.00072$ , prawdopodobieństwo wystąpienia nietypowej reakcji kierowcy  $Pk_N$  wynosi  $Pk_N=6.6\cdot 10^{-4}$ .

W obliczeniach dla modelu z dodatkowym systemem ostrzegania (rys. 3c) prawdopodobieństwo nietypowej reakcji kierowcy wyrażone jest następującym wzorem:

$$Pk_N = Pk_N(t)_{t \rightarrow \infty} = \frac{\mu_2(p\lambda_3p\lambda_6(p\lambda_5 + \mu_1) + p\lambda_1p\lambda_5(p\lambda_6 + \mu_3)\mu_4)}{p\lambda_1\mu_2(p\lambda_6 + \mu_3)\mu_4(p\lambda_5 + \mu_5) + (p\lambda_5 + \mu_1)((p\lambda_6 + \mu_3)(\lambda_4\mu_2 + (\lambda_2 + \mu_2)\mu_4)\mu_5 + p\lambda_3\mu_2\mu_4(p\lambda_6 + \mu_5))} \quad (4)$$

Przy założonym parametrze  $p=0.3$ , intensywności przejścia pomiędzy stanami 1,3 i  $Pk_N$  przyjmują następujące wartości:  $p\lambda_1=9.1\cdot 10^{-5}$ ,  $p\lambda_3=0.22$ ,  $p\lambda_5=5.1\cdot 10^{-7}$ ,  $p\lambda_6=2.2\cdot 10^{-8}$ . po przeprowadzonych obliczeniach prawdopodobieństwo  $Pk_N$  jest równe  $1.2E-8$ . W przypadku parametru  $p=0.01$ , intensywności przejść pomiędzy w/w stanami wynoszą:  $p\lambda_1=3.1\cdot 10^{-7}$ ,  $p\lambda_3=0.0022$ ,  $p\lambda_5=1.9\cdot 10^{-9}$ ,  $p\lambda_6=9.5\cdot 10^{-9}$  oraz prawdopodobieństwo wystąpienia sytuacji nietypowego zachowania kierowcy  $Pk_N=9.74\cdot 10^{-9}$ .

W tabeli 1 przedstawiono zestawienie wyników prawdopodobieństw  $Pk_N$  wystąpienia nietypowej reakcji kierowcy w złych warunkach pogodowych.

Porównując wyniki otrzymane dla modelu przejazdu kategorii C i D, gdzie prawdopodobieństwo wystąpienia stanu  $Pk_N$  dla kategorii C jest większe niż dla kategorii D, można to tłumaczyć większym natężeniem ruchu drogowego na przejazdach kat. C oraz lokalizacją, w których instaluje się odpowiednie kategorie przejazdów kolejowych. Obliczenia przeprowadzone dla modelu przejazdu z dodatkowym system ostrzegania pokazują, że prawdopodobieństwo zderzenia samochodu z pociągiem w złych warunkach pogodowych jest na poziomie  $Pk_N=1.28\cdot 10^{-8}$ ,  $Pk_N=9.74\cdot 10^{-9}$ , co pozwala stwierdzić, że wprowadzenie dodatkowego ostrzegania kierowców zbliżających się do przejazdu kolejowego może wpłynąć na poprawę bezpieczeństwa w ruchu kolejowo drogowym.

**Tab. 1.** Zestawienie wyników prawdopodobieństwa  $Pk_N$

	Model podstawowy	Model przy $p=0.3$	Model przy $p=0.01$
Przejazd kat. D	$Pk = 4.3\cdot 10^{-5}$	$Pk_N = 1.4\cdot 10^{-4}$	$Pk_N = 1.94\cdot 10^{-6}$
Przejazd kat. C	$P4 = 6.6\cdot 10^{-6}$	$Pk_N = 1.8\cdot 10^{-2}$	$Pk_N = 6.6\cdot 10^{-4}$
Przejazd kat. D/C z dodatkowym ostrzeganiem	$Pk = 9.031\cdot 10^{-7}$	$Pk_N = 1.28\cdot 10^{-8}$	$Pk_N = 9.74\cdot 10^{-9}$

Jak wynika z otrzymanych wyników, zastosowanie dodatkowego systemu ostrzegania, co najmniej 10 krotnie redukuje ryzyko wystąpienia kolizji samochodu z pociągiem.

## WNIOSKI

Zastosowanie dodatkowego systemu ostrzegania w istotny sposób poprawia bezpieczeństwo na niestrzeżonych przejazdach kolejowych (kat. D) oraz na przejazdach kolejowych bez zapór, wyposażonych tylko w sygnalizację świetlną dla kierowców (kat. C). Jak wykazano w artykule, prawdopodobieństwo kolizji samochodu z pociągiem maleje znacznie (ponad 10 krotnie), co pokazuje, że proponowany system może podnieść bezpieczeństwo w przypadku trudnych warunków środowiskowych i klimatycznych, takich jak ograniczenie widoczności przez deszcz, śnieg a przede wszystkim mgłę (od 10 do 25 dni w roku) [1]. Biorąc pod uwagę fakt, że ponad 80% śmiertelnych wypadków w transporcie kolejowym występuje na przejazdach kolejowych, w związku z tym celowe jest wprowadzanie takich rozwiązań w przyszłości. Tezę tę potwierdzają plany wdrożenia w UE (a także w Polsce) powszechnie dostępnego szerokopasmowego Internetu.

## THE INFLUENCE OF WHETHER CONDITIONS TO SAFETY OF THE CROSS LEVEL SYSTEMS

### *Abstract*

*The paper deals with safety of unguarded cross level intersections (without barriers) equipped with additional warning system based on WiFi, WiMax and WSN public communication standards. Such system based on open radio transmission network may inform the car drivers about the train in the intersection area, and using the model related to Markov process theory applied for mathematical analysis and simulation we can show the of probability of catastrophic failure (collision with train) is  $10^2$  less than in other cases. Assuming typical parameters for not sufficient weather conditions (heavy rain, snow or fog) the proposed system assures the better safety criteria corresponding to probability of collision the train and car.*

## BIBLIOGRAFIA

1. Bester L., „Analiza zintegrowanego systemu bezpieczeństwa w transporcie lądowym na przykładzie przejazdów kolejowych”, Rozprawa doktorska, Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, Radom 2012
2. Bester L., Lewiński A.: “The Analysis of Transmission Parameters in Railway Cross Level Protection Systems with Additional Warning of Car drivers”, Communications in Computer and information Science (329) Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012, 12th International Conference on Transport System Telematics, TST 2012
3. Jaźwiński J., Ważyńska-Fiok K. „Bezpieczeństwo systemów”, PWN Warszawa 1993
4. Lewiński A., „Nowoczesne systemy telematyki kolejowej”, Wydawnictwa Politechniki Radomskiej, 2012
5. Lewiński A., Bester L.: ”Modelowanie zdarzeń na niestrzeżonych przejazdach kolejowych”. IX Konferencja Naukowo-Techniczna „Logitrans 2012”, Logistyka 2/2012, Szczyrk 2012.

### *Autorzy:*

**dr hab. inż. Andrzej LEWIŃSKI, prof ndzw. UTH Rad.** – Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im Kazimierza Pułaskiego w Radomiu

**dr inż. Lucyna BESTER** – Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im Kazimierza Pułaskiego w Radomiu