

LEWIŃSKI Andrzej¹
BESTER Lucyna²

Modelowanie zdarzeń na niestrzeżonych przejazdach kolejowych

*Bezpieczeństwo na niestrzeżonych przejazdach kolejowych
Modelowanie i symulacja zdarzeń*

Streszczenie

W pracy przedstawiono zagadnienia związane z podniesieniem bezpieczeństwa na niestrzeżonych przejazdach kolejowych poprzez zastosowanie dodatkowego systemu ostrzegania kierowców w oparciu o publiczne standardy transmisji bezprzewodowej. Przeprowadzone analizy matematyczne opracowanych w tym celu modeli oparto na procesach Markowa, a otrzymane wyniki badań symulacyjnych potwierdzają zasadność takiego rozwiązania.

MODELING OF EVENTS ON UNGUARDED RAILWAY CROSSINGS

Abstract

The paper deals with problems of increasing the safety of unguarded cross level intersections through application of additional warning system for drivers based on public wireless transmission standards. The results of mathematical analyses and simulation tests elaborated in Markov process models confirm the advantage of such solution.

1. WPROWADZENIE

Przejazdy kolejowe kategorii D, jako miejsca przecięcia się w jednym poziomie dwóch potoków ruchu, kolejowego i samochodowego są źródłem wielu tragicznych w skutkach wypadków. Na tego typu przejazdach jednym z czynników zagrożenia bezpieczeństwa ruchu drogowego jest niezachowanie przez kierujących szczególnej ostrożności przy braku dobrej widoczności nadjeżdżającego pociągu spowodowanej złymi warunkami atmosferycznymi lub też ukształtowaniem terenu. W celu ograniczenia występowania sytuacji niebezpiecznych na przejazdach kat. D, podejmuje się działania ukierunkowane na zwiększenie bezpieczeństwa poprzez wprowadzanie dodatkowych metod ostrzegania kierowców. Przykładem systemu informującego o zbliżaniu się do przejazdu pociągu jest wyposażenie przejazdów w dodatkowe urządzenia wczesnego ostrzegania kierowców. Istotą proponowanego systemu dodatkowego ostrzegania jest wykorzystanie do transmisji komunikatów powszechnie dostępnych standardów sieci bezprzewodowych takich jak, WiMax, WSN i Wi-Fi (Worldwide Interoperability for Microwave Access, Wireless Sensor Network, Wireless Fidelity).

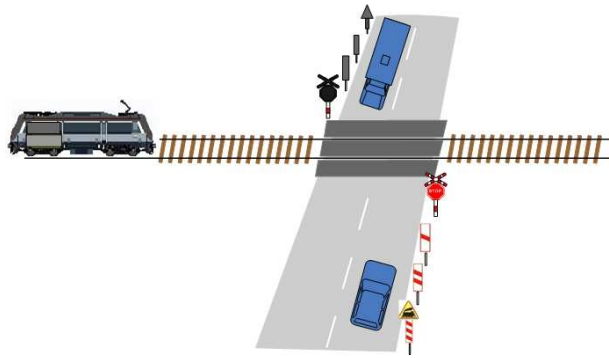
Ważnym czynnikiem określenia poziomu bezpieczeństwa przejazdu kolejowego jest analiza zaistniałych na nim wypadków, ich przyczyn, skutków oraz prawdopodobieństw ich wystąpienia. W artykule przedstawiono modele matematyczne do analizy zdarzeń zachodzących na przejazdach oraz na podstawie modeli przeprowadzono badania symulacyjne. W tym celu wykorzystano procesy stochastyczne w postaci procesów Markowa, modelujących przebieg funkcjonowania przejazdów kat. D oraz przejazdów kat. D wyposażonych w dodatkowy system ostrzegania kierowców.

2. MODEL PRZEJAZDU NIESTRZEŻONEGO ORAZ PRZEJAZDU WYPOSAŻONEGO W DODATKOWY SYSTEM OSTRZEGANIA KIEROWCÓW

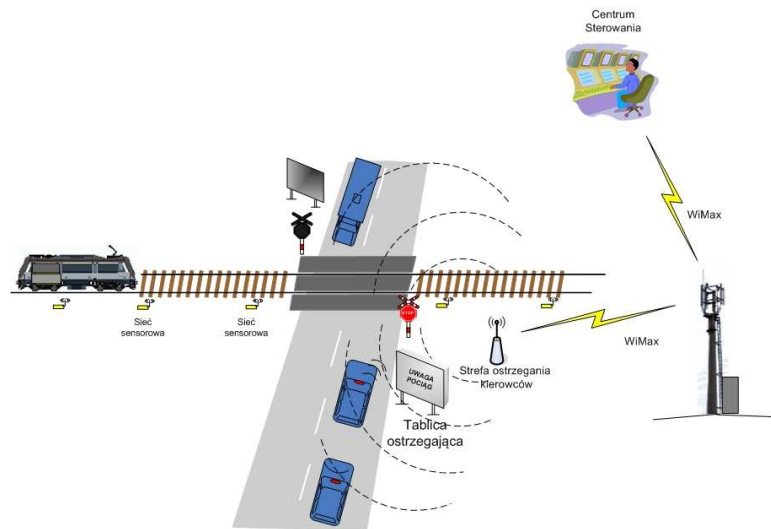
Na rysunku 1 została przedstawiona architektura przejazdu kategorii D, przejazdy te zabezpieczane są najczęściej znakiem drogowym „krzyż św. Andrzeja” oraz znakiem drogowym STOP. Na tego typu przejazdach bezpieczeństwo zależy głównie od zachowania ostrożności przez kierujących pojazdami. W celu podwyższenia bezpieczeństwa zaproponowano system wczesnego ostrzegania kierowców znajdujących się w obrębie przejazdu o zbliżającym się pociągu. Architektura i koncepcja działania została przedstawiona na rysunku 2. W systemie tym, jako medium transmisji komunikatów ostrzegawczych zastosowano standard WiMax, ponieważ bezprzewodowa transmisja umożliwia realizację dynamicznego sterowania systemem wysyłania komunikatów do pojazdów lub też sterowanie komunikatami na telebimach znajdujących się przy drodze.

¹Politechnika Radomska, Wydział Transportu i Elektrotechniki; 26-600 Radom; ul. Malczewskiego 29.
Tel: + 48 48 361-77-20, E-mail: a.lewinski@pr.radom.pl

²Politechnika Radomska, Wydział Transportu i Elektrotechniki; 26-600 Radom; ul. Malczewskiego 29.
Tel: + 48 48 361-77-22, E-mail: l.bester@pr.radom.pl



Rys. 1 Przejazd kategorii D bez rogatek i bez samoczynnej sygnalizacji świetlnej.

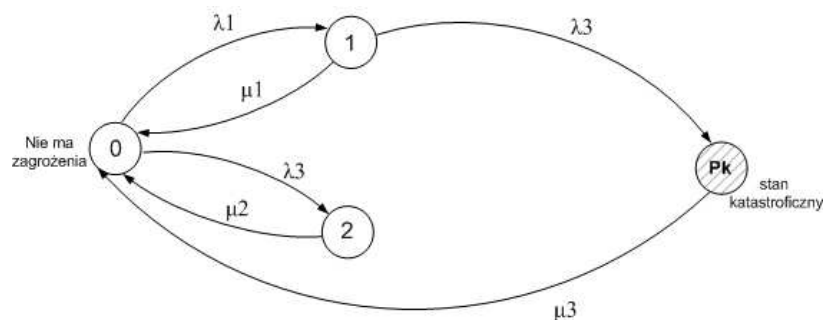


Rys. 2 Przejazd z realizacją dodatkowego systemu ostrzegania kierowców na przejazdach kat. D

Technologia WiMax została wybrana ze względu na zapewnienie kompatybilności sprzętu różnych producentów oraz pracy w różnych konfiguracjach. Bardzo ważną cechą systemu opartego na standardzie 802.16 jest możliwość rozwijania istniejącej struktury sieci telekomunikacyjnej w celu spełnienia potrzeb odbiorcy, praktycznie bez żadnej ingerencji w istniejącą już infrastrukturze kolejowej. Standard WiMAX działa w paśmie licencjonowanym 3,5GHz oraz 3,7GHz (w Polsce), czego zaletą jest brak występowania zakłóceń sygnału. Zapewnienia realizacje transmisji szerokopasmowej w obszarach o promieniu od kilku do kilkunastu kilometrów od stacji bazowej, w zasięgu linii widoczności LoS (Line of Sight).

Modelowanie jest wstępnym etapem analizy umożliwiającym uzyskanie poglądu na temat poprawy bezpieczeństwa na przejazdach kolejowych kat. D. Pozwala to na zebranie informacji o nowych metodach, które mogłyby być zastosowane do rozwiązania danego problemu.

Podstawowym modelem analizy bezpieczeństwa na przejazdach kolejowych jest model przejazdu niestrzeżonego kategorii D, co przedstawia rysunek 3.



Rys. 3 Model przejazdu kategorii D

W modelu tym poszczególne stany opisują zdarzenia występujące na przejeździe kolejowym kategorii D: 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 zatrzymał się przed przejazdem

Stan 2 – kierowca zatrzymał się przed przejazdem

Stan Pk – stan katastroficzny, kierowca wjechał pod nadjeżdżający pociąg

Parametry przejścia opisują następujące zdarzenia:

λ_1, λ_2 – pojawił się pociąg i samochód

λ_3 – kierowca wjechał pod pociąg

μ_3 – czas powrotu do stanu bez zagrożenia „0”

Model przedstawiony na rysunku 3 można opisać układem równań operatorowych:

$$\begin{cases} s^* P_0 - 1 = -(\lambda_1 + \lambda_2)P_0 + \mu_1 P_1 + \mu_2 P_2 + \mu_3 P_k \\ s^* P_1 = \lambda_1 P_0 - (\mu_1 + \lambda_3)P_1 \\ s^* P_2 = \lambda_2 P_0 - \mu_2 P_2 \\ s^* P_k = \lambda_3 P_1 - \mu_3 P_k \end{cases} \quad (1)$$

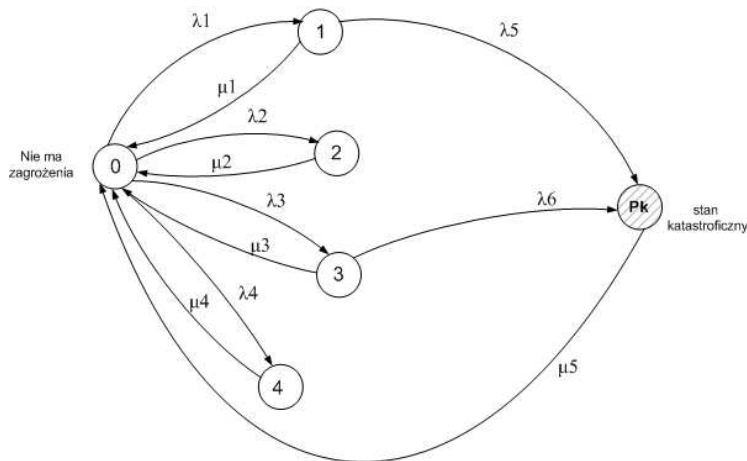
Najważniejszy pod względem analizy bezpieczeństwa jest prawdopodobieństwo wystąpienia stanu katastroficznego Pk rozumiane, jako zderzenie samochodu z pociągiem, opisanego zależnością (2):

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

Analiza modelu została przeprowadzona dla przyjętego średniego (iloczyn ruchu 10 000) i dużego (iloczyn ruchu 20 000) natężenia ruchu pojazdów λ znajdującego się w przedziale tej kategorii przejazdu.

Zakładając wartości parametrów $\lambda_1=0.8987h^{-1}$, $\lambda_2=0.000038h^{-1}$, $\lambda_3=0.0000045h^{-1}$, $\mu_1=0.16h^{-1}$, $\mu_2=0.005h^{-1}$, $\mu_3=0.083h^{-1}$, obliczono prawdopodobieństwo stanu Pk dla średniego natężenia ruchu $P_k = 4.3E-5$ oraz dla dużego natężenia ruchu $\lambda_1=0.1983h^{-1}$, prawdopodobieństwo Pk, wynosi $P_k = 2.9E-5$.

Na rysunku 4 został przedstawiony model systemu przejazdu kat. D wyposażonego w dodatkowy system ostrzegania kierowców oraz opisujący zdarzenia, jaki mogą się pojawić podczas funkcjonowania systemu.



Rys. 4 Model systemu z dodatkowym ostrzeganiem kierowców na przejazdach kat. D

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 $\lambda[h^{-1}]$, oraz odwrotność czasu powrotu do stanu 0 - stanu pracy systemu bez zagrożenia $\mu [h^{-1}]$. W tym modelu parametry przejść opisują zdarzenia:

- $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ – pojawił się pociąg i samochód
- λ_5, λ_6 – kierowca wjechał pod pociąg
- μ_1, μ_3 – kierowca przejechał, nie ma zagrożenia

Równania stanu dla modelu z rysunku 4 w postaci operatorowej ma następującą postać:

$$\begin{cases} s^* P_0 - 1 = -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4)P_0 + \mu_1 P_1 + \mu_2 P_2 + \mu_3 P_3 + \mu_4 P_4 + \mu_5 P_k \\ s^* P_1 = \lambda_1 P_0 - (\mu_1 + \lambda_5)P_1 \\ s^* P_2 = \lambda_2 P_0 - \mu_2 P_2 \\ s^* P_3 = \lambda_3 P_0 - (\mu_3 + \lambda_6)P_3 \\ s^* P_4 = \lambda_4 P_0 - \mu_4 P_4 \\ s^* P_k = \lambda_5 P_1 + \lambda_6 P_3 - \mu_3 P_k \end{cases} \quad (3)$$

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 P_k . Prawdopodobieństwo graniczne przy $t \rightarrow \infty$ wystąpienia stanu katastroficznego P_k przedstawia wzór (4):

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

Prawdopodobieństwo wystąpienia stanu P_k dla średniego natężenia ruchu, $\lambda_1 = 0.000034$ wynosi $P_k = 9.031E-7$, natomiast dla dużego natężenia ruchu ($\lambda_1 = 0.0000014$) prawdopodobieństwo to jest równe $P_k = 2.992E-6$.

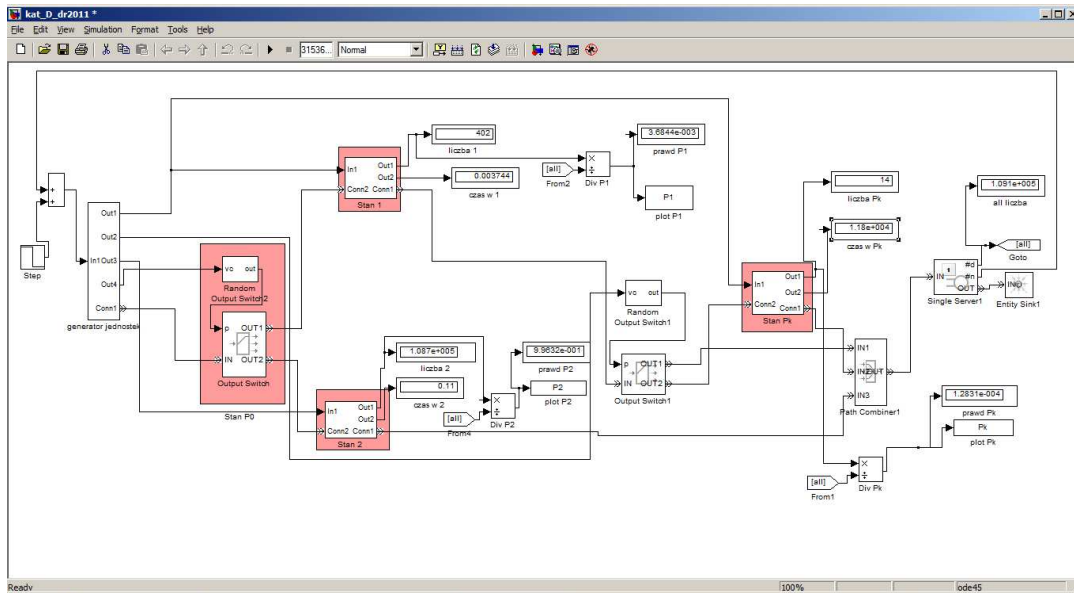
Jak wynika z otrzymanych wyników, zastosowanie dodatkowego systemu ostrzegania, co najmniej 10-krotnie redukuje ryzyko wystąpienia kolizji samochodu z pociągiem.

3. SYMULACJA ZDARZEŃ NA NIESTRZEŻONYM PRZEJEŹDZIE ORAZ PRZEJEŹDZIE Z DODATKOWYM SYSTEMEM OSTRZEGANIA

Badania symulacyjne systemu ostrzegania na przejazdach i analiza danych dają możliwość badania zachowań kierowców oraz różnych zjawisk związanych z ruchem samochodów na przejeździe kolejowym. Daje możliwość pokazania i uzasadnienia wprowadzenia usprawnień w zakresie poprawy bezpieczeństwa na przejazdach kolejowych, jest również względnie wiarygodnym sposobem umożliwiającym efektywne wykorzystanie i integrację nowych technologii transmisji danych w systemach przejazdowych [3,4,5,6].

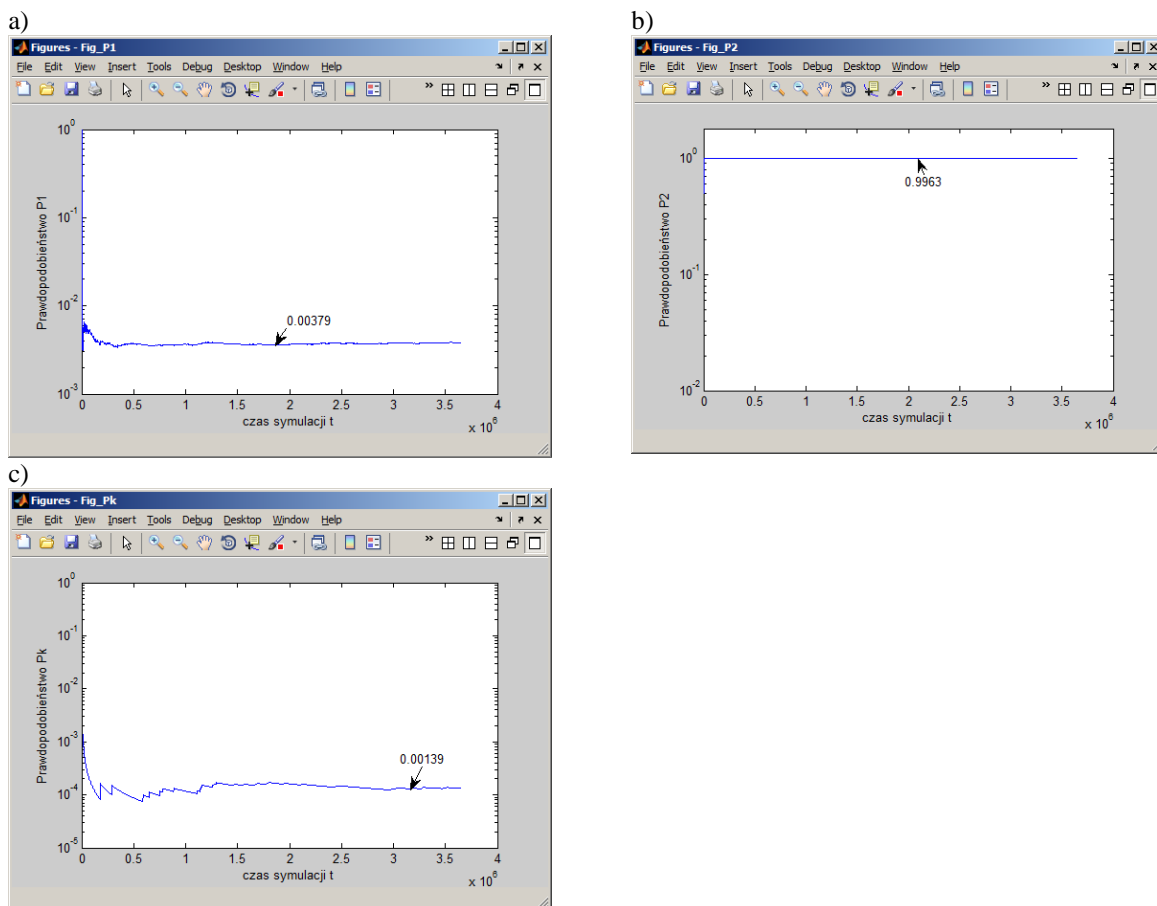
Symulacje zostały przeprowadzone w programie do obliczeń naukowo-technicznych Matlab/Simulink w module SimEvents. Program ten został wybrany ze względu na możliwość symulacyjne odwzorowania funkcjonowania badanych systemów. SimEvents jest specjalizowanym modulem programu Simulink przeznaczonym do symulacji układów o skończonej liczbie stanów oraz pozwala modelować systemy, które nie są taktowane przez upływ czasu, ale przez dyskretne zdarzenia takie jak przemieszczanie się obiektów.

Model symulacyjny przejazdu kategorii D, został przedstawiony na rysunku 5. Uzyskane wartości prawdopodobieństwa przebywania w poszczególnych stanach są następujące: $P_1 = 3.6E-3$, $P_2 = 9.96E-1$, $P_k = 1.28E-4$.



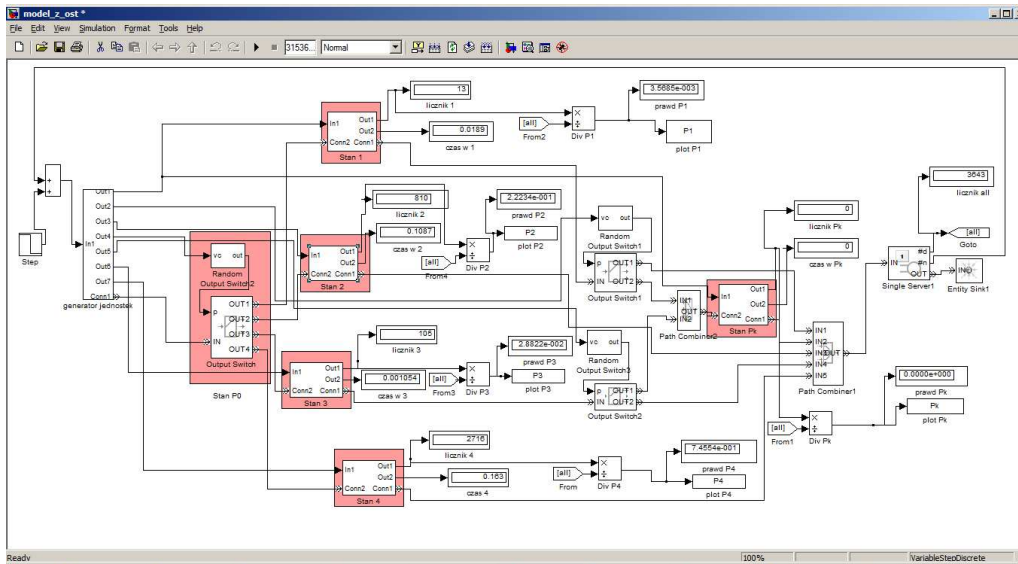
Rys. 5 Model symulacyjny dla modelu przejazdu kolejowego kat. D zaimplementowany w SimEvents

Natomiast na rysunku 6 przedstawiono graficzne wyniki symulacji przeprowadzonej dla modelu kat. D z rys. 5.



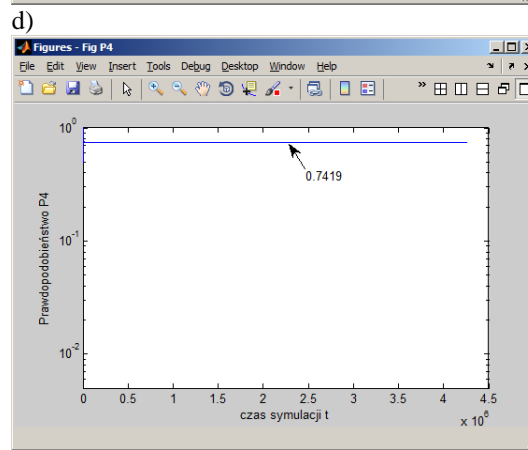
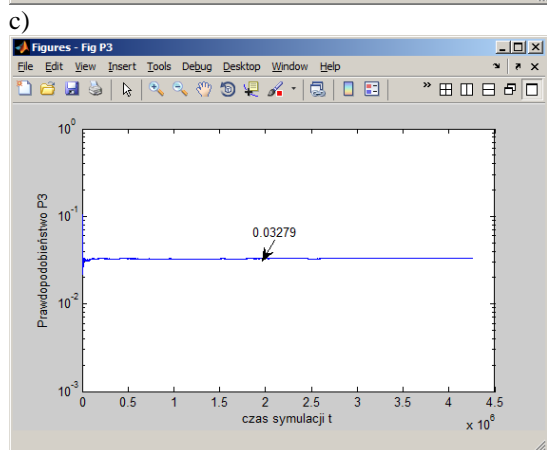
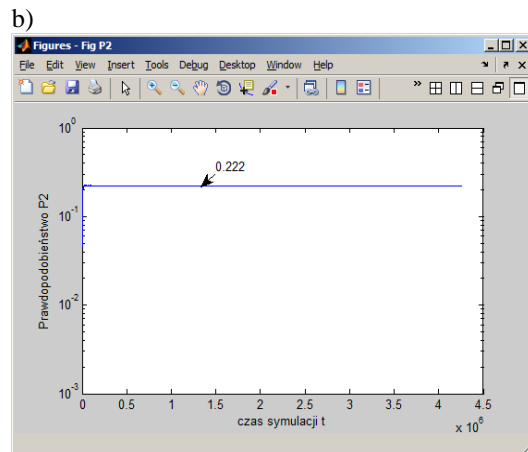
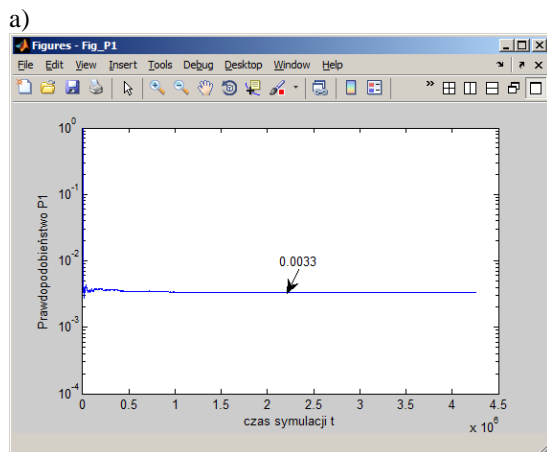
Rys. 6 Przebieg prawdopodobieństwa wystąpienia stanu P1 (a), P2 (b) i Pk (c) w funkcji czasu symulacji

Kolejnym badanym modelem jest model przejazdu kolejowego z zastosowanym systemem dodatkowego ostrzegania kierowców przed nadjeżdżającym pociągiem, model ten dokładnie odwzorował proces Markowa przedstawiony na rysunku 6.

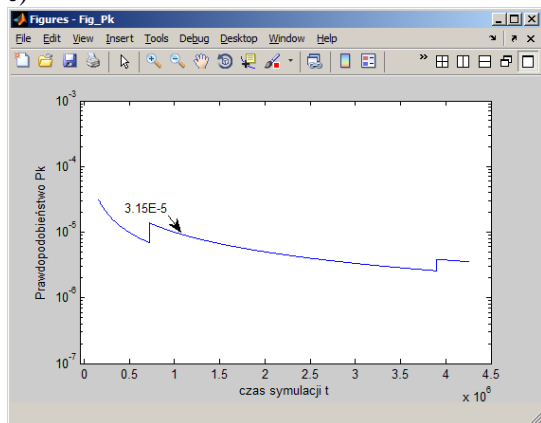


Rys. 6 Model symulacyjny przejazdu kolejowego kat. D wyposażonego w dodatkowy system ostrzeżenia zaimplementowany w SimEvents

Otrzymane w wyniku symulacji prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych stanów (rys.7) wynoszą odpowiednio: $P1 = 3.4E-3$, $P2 = 2.2E-1$, $P3 = 3.3E-2$, $P4 = 7.4E-1$, $Pk = 4.13E-6$.



e)



Rys. 7 Przebieg prawdopodobieństwa stanu P1 (a), P2 (b), P3 (c), P4 (d), Pk (e) w funkcji czasu symulacji

4. PODSUMOWANIE

Analizy matematyczne przeprowadzone na modelu opracowanym na podstawie procesów Markowa opisujących zdarzenia na niestrzeżonym przejeździe kat. D uzasadniają bardzo dużą przydatność zastosowania dodatkowego systemu ostrzegania na przejeździe kolejowym. Potwierdzają to również wyniki badań symulacyjnych przeprowadzonych w najbardziej rozpowszechnionym w środowisku naukowym oprogramowaniu MATLAB/SIMULINK. System ten oparty na publicznych standardach transmisji bezprzewodowej jest typowym systemem niskokosztowym, łatwym do implementacji zarówno operatorów komórkowych jak i przez PKP PLK w postaci dodatkowych tablic informacyjnych. Systemy takie nie muszą obecnie spełniać wysokich kryteriów bezpieczeństwa (wystarczy SIL1-2), ale jak pokazały wyniki badań analitycznych i symulacyjnych znakomicie poprawiają bezpieczeństwo na przejazdach kolejowych (ponad 10 krotny spadek kolizji samochodu z pociągiem) [1,2].

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Norma PN-EN 50159-2010 (U) Zastosowania kolejowe. Łączność, sygnalizacja i systemy sterowania. Transmisja w systemach sterowania ruchem kolejowym.
- [2] Normy PN-EN 5012x-2005 (U) Zastosowania kolejowe. Łączność, sygnalizacja i systemy sterowania. Bezpieczeństwo w systemach sterowania ruchem kolejowym.
- [3] Lewiński A., Bester L., Toruń A.: *Sposoby realizacji transmisji otwartej w systemach sterowania ruchem kolejowym*, Materiały konferencji LOGITRANS 2011, Politechnika Radomska 2011, Logistyka Nr 3/2011 (płyta CD)
- [4] Lewiński A., Bester L.: *Additional Warning System for Cross Level*, Communications in Computer and information Science (104), Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010
- [5] Lewiński A., Bester L.: *Zastosowanie bezprzewodowych systemów transmisji do poprawy bezpieczeństwa na przejazdach kolejowych*, Materiały konferencji TRANSPORT XXI WIEKU 2010
- [6] 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.