

Leszek Smolarek  
Akademia Morska w Gdyni

## OCENA ZAGROŻENIA KOLIZYJNEGO DLA NIESTRZEŻONEGO PRZEJAZDU KOLEJOWEGO

**Streszczenie:** Statystyki pokazują, że ponad 97% wypadków na przejazdach powodują nieostrożni kierowcy. Według danych Komendy Głównej Policji w raporcie "Wypadki drogowe w Polsce w 2007 r.", w tym roku w 108 wypadkach na strzeżonych i niestrzeżonych przejazdach kolejowych zginęło 45 osób, a 127 zostało rannych. Ważnym jest opracowanie modelu pozwalającego ocenić zagrożenie na przejeździe kolejowym na podstawie lokalnych charakterystyk strumienia pojazdów korzystających z badanego przejazdu oraz intensywności i okresowości ruchu kolejowego. Ponieważ największym zagrożeniem dla kierowców są przejazdy kategorii C i D, dlatego należałoby je zmodernizować do przejazdów kategorii A lub B<sup>1</sup>. Przedstawiony w pracy model może być wykorzystany do hierarchizacji przejazdów ze względu na zagrożenie wypadkami oraz ustalenia miejsc szczególnie niebezpiecznych celem ich szybkiej modernizacji.

**Słowa kluczowe:** model kolejkowy, proces markowa, model symulacyjny bezpieczeństwa

### 1. WPROWADZENIE

Wypadki na przejazdach kolejowych są szczególnie niebezpieczne z uwagi na długą drogę hamowania i masę pociągu. Stanowią one wprawdzie ułamek procenta ogólnej liczby wypadków samochodowych w kraju, ale, ze względu na liczbę ofiar liczonych na pojedynczy wypadek, są w skutkach prawie trzykrotnie groźniejsze. W praktyce możemy wyróżnić dwa warianty wypadków, pierwszy, w którym pociąg najeżdża na pojazd kołowy znajdujący się na przejeździe i drugi, w którym samochód uderza w pociąg.

W Polsce jest ponad 13 tysięcy przejazdów, z czego ponad 9 tysięcy jest wyposażonych w sygnalizację świetlną i dźwiękową albo oznakowanych tylko krzyżem świętego Andrzeja i znakiem STOP. Szczegółowe dane dla lat 2003-2007 przedstawione są w tablicy 1<sup>2</sup>.

Ze względu na koszty modernizacji przejazdów koniecznym jest opracowanie narzędzi pozwalających na hierarchizację przejazdów kategorii C i D ze względu na poziom bezpieczeństwa, z uwzględnieniem dynamiki zmian natężenia ruchu kolejowego, Rys. 1.

---

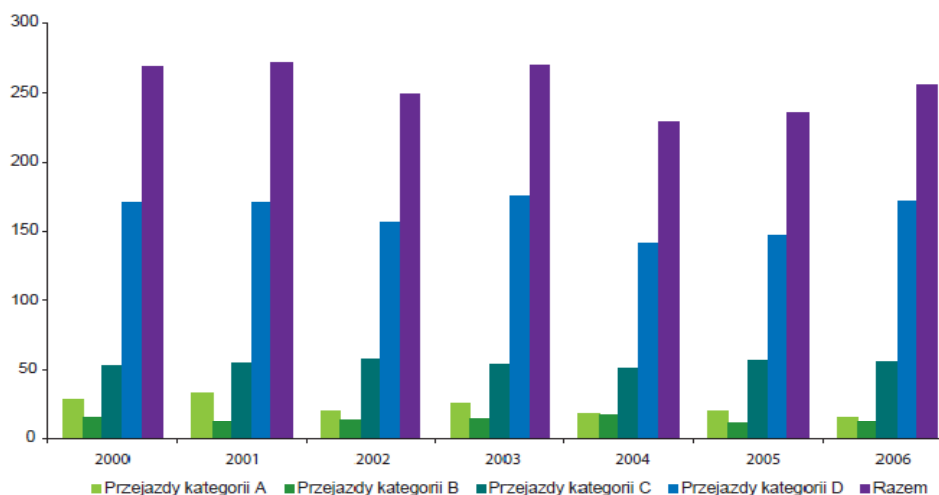
<sup>1</sup> Bezpieczeństwo ruchu kolejowego, Transport Szynowy - Statystyki i Analizy, © ZDG TOR Sp. z o.o.

<sup>2</sup> TK 4c - 0701 - 13 / 08, pismo ministra infrastruktury do marszałka sejmu z 13 sierpnia 2008 r.

Tablica 1.

## Liczba przejazdów kolejowych

Wyszczególnienie		Według stanu na dzień				
		31.12.2003r	31.12.2004r	31.12.2005r	31.12.2006r	31.12.2007r
kat. "A"	ogółem:	3138	3068	3014	2962	2890
	w tym: na liniach eksploatowanych	3059	2986	2938	2893	2834
Kat. "B"	ogółem:	399	446	474	507	570
	w tym: na liniach eksploatowanych	391	439	470	502	561
kat. "C"	ogółem:	1384	1340	1321	1329	1324
	w tym: na liniach eksploatowanych	1352	1304	1295	1305	1303
kat. "D"	ogółem:	11954	11163	10532	10347	10165
	w tym: na liniach eksploatowanych	8658	8617	8476	8330	8333
Razem	ogółem:	16875	16017	15341	15145	14949
	w tym: na liniach eksploatowanych	13460	13346	13179	13030	13031



Rys. 1. Wypadki na przejazdach kolejowo-drogowych w Polsce od 2000, © ZDG TOR Sp. z o.o.

Od wielu lat utrzymują się stałe proporcje pokazujące, że tylko 1, 5% wszystkich wypadków powstało z przyczyn leżących po stronie PLK S.A. zaś pozostałe 98, 5% wypadków powstało z przyczyn leżących po stronie użytkowników dróg, tablica 3. Szczegółowe dane dotyczące liczby wypadków i ofiar przedstawia tablica 2.

Tablica 2.

**Bezpieczeństwo ruchu kolejowego w zależności od typu przejazdu<sup>3</sup>**

kategoria przejazdu	kategoria wypadku	liczba wypadków	ofiary wypadków	
			zabici	ranni
A – strzeżone	18	17*	3	3
B – z sygnalizacją i półrogatkami	19	13	2	4
C – z sygnalizacją	20	64	15	43
<b>D – niestrzeżone</b>	<b>21</b>	<b>168</b>	<b>27</b>	<b>47</b>
F – użytku prywatnego	22	3	0	0
poza przejazdami i na torach dojazdowych	23	9	0	1
<b>RAZEM</b>		<b>274</b>	<b>47</b>	<b>98</b>

Tablica 3.

**Udział kierujących pojazdami kołowymi w spowodowaniu wypadku<sup>4</sup>**

Rok	Liczba wypadków ogółem	Liczba wypadków z winy kolei	% udział wypadków z winy kierowców
2000	274	15	94,53
2001	283	7	97,53
2002	254	7	97,25
2003	266	2	99,25
2004	242	7	97,11
2005	248	5	97,98
2006	270	4	98,52
2007*	169	2	98,82
średnio	262,43	6,71	98,16

\* Stan na 31.08.2007 r.

**1.1. Model ruchu na przejeździe w ocenie statystycznej [1]**

Adekwatnym miernikiem indywidualnego zagrożenia jest miernik IZBD wyrażony w ofiarach śmiertelnych (OŚ) na osobę przejeżdżającą przez przejazd kolejowy pojazdem kołowym w ciągu roku (OPPK · rok). Indywidualne zagrożenie bezpieczeństwa na przejazdach kolejowych kategorii A (IZBA), B (IZBB), C (IZBC), D (IZBD) wynoszą:

<sup>3</sup> Transport Szynowy - Statystyki i Analizy, © ZDG TOR Sp. z o.o.

<sup>4</sup> Transport Szynowy - Statystyki i Analizy, © ZDG TOR Sp. z o.o.

$$IZBDP = \frac{LOS}{LP \cdot LPO \cdot ZP \cdot LPD \cdot ZD \cdot 365} \left[ \frac{OS}{OPPK \cdot rok} \right], \quad IZBDP = \frac{12}{10^{13}} \frac{OS}{OPPK \cdot rok} \quad (1)$$

gdzie:

LP - liczba przejazdów,

LOŚ - liczba ofiar śmiertelnych na wszystkich przejazdach kolejowych w 2007 r.,

LPO - liczba pociągów na przeciętnej linii kolejowej,

ZP - wypełnienie przeciętnego pociągu,

LPD - liczba pojazdów drogowych przejeżdżających przez przeciętny przejazd,

ZD - średnie wypełnienie pojazdu drogowego,

365 - liczba dni w roku,

OŚ - ofiar śmiertelnych,

OPPK - osoba przejeżdżająca przez przejazd pojazdem kołowym.

$$\begin{aligned} IZBDP &= \frac{24}{10^{10}} \frac{OS}{OPPK \cdot rok}, & IZBDA &= \frac{3}{10^{10}} \frac{OS}{OPPK \cdot rok}, \\ IZBDB &= \frac{10,86}{10^{10}} \frac{OS}{OPPK \cdot rok}, & IZBDC &= \frac{78,8}{10^{10}} \frac{OS}{OPPK \cdot rok}, \\ IZBDD &= \frac{44,38}{10^{10}} \frac{OS}{OPPK \cdot rok}. \end{aligned} \quad (2)$$

## 2. MODEL KOLEJKOWY ZAGROŻENIA

Rozpatrujemy system  $M_2/G_2/1$  ze stratami, dwoma wejściami i dwoma wykładniczymi strumieniami zgłoszeń oraz dowolnymi czasami obsługi dla każdego ze strumieni.

Dowolność czasu obsługi jest efektem zróżnicowania pojazdów korzystających z przejazdu (traktory, maszyny rolnicze, samochody ciężarowe, autobusy, samochody osobowe, pojazdy jednośladowe), dlatego jako rozkład obsługi wykorzystywany będzie dla pojazdów kołowych rozkład trójkątny, zaś dla pojazdów szynowych rozkład jednostajny.

Przyjmijmy, że:

- intensywność  $i$ -tego strumienia jest równa  $\lambda_i$ ,
- czas przejazdu (zajętości systemu) opisany jest rozkładem o skończonej wartości średniej  $\beta_i$ ,
- prawdopodobieństwo, że pojazd z  $i$ -tego strumienia pierwszy wjedzie na przejazd wynosi  $\alpha_i$ , gdzie  $i = 1, 2$ .

Stan systemu określony jest wektorem  $(w_1, w_2)$  gdzie  $w_i = 0$  jeśli na  $i$  tym wejściu nie ma zgłoszenia (pojazdu kołowego dla  $i = 1$  i pociągu dla  $i = 2$ ) oraz 1 jeśli jest zgłoszenie.

Wartości prawdopodobieństw stacjonarnych  $p_{ij}$  dla stanów  $(i, j)$  określone są wzorami, wzory opracowane w oparciu o [2], Rys. 2.

$$p_{0,0} = \frac{2}{1+(1+\rho)^2}, \quad p_{1,0} = p_{0,0} \frac{\alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2 + 0,5\rho^2}{1+\rho},$$

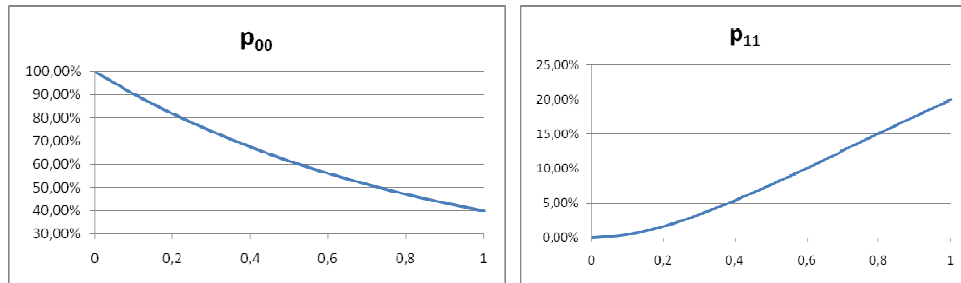
$$p_{0,1} = p_{0,0} \frac{(1-\alpha_1)\rho_1 + (1-\alpha_2)\rho_2 + 0,5\rho^2}{1+\rho}, \quad p_{1,1} = \frac{\rho^2}{1+(1+\rho)^2}.$$

gdzie

$$\rho_i = \lambda_i \cdot \beta_i \quad \text{dla } i = 1,2; \quad \rho = \rho_1 + \rho_2.$$

Przyjmując  $\alpha_2 = 1 - \alpha_1 \in [0,1]$  mamy

$$p_{1,0} = p_{0,0} \frac{\rho_2 + \alpha_1(\rho_1 - \rho_2) + 0,5\rho^2}{1+\rho}, \quad p_{0,1} = p_{0,0} \frac{\rho_1 - \alpha_1(\rho_1 - \rho_2) + 0,5\rho^2}{1+\rho}$$



Rys. 2. Zmiany wartości stanów  $p_{00}$  i  $p_{11}$  w zależności od natężenia ruchu na przejeździe

## 2.1. Opis dynamiczny

Powiemy, że wystąpiło zagrożenie kolizyjne, [3] jeśli na przejeździe pojawi się jednocześnie pojazd kołowy i pociąg, tzn. system będzie w stanie (1,1), Rys. 3. Oznacza to zajście jednego z dwóch zdarzeń, dla  $n$  - tego pojazdu kołowego i  $m$  - tego pojazdu szynowego:

- na przejeżdżający pojazd kołowy najeżdża pociąg tzn.

$$T_k \leq T_p \leq T_k + U_k;$$

- samochód uderza w przejeżdżający pociąg tzn.

$$T_p \leq T_k \leq T_p + U_p.$$

(5)

Ponieważ strumień pojazdów i strumień pociągów są z założenia niezależnymi poissonowskimi procesami stochastycznymi to

(6)

gdzie:

$T_k$  – zmienna losowa o rozkładzie wykładniczym z parametrem  $\lambda_1$  opisująca odstęp czasu pomiędzy kolejnymi pojazdami kołowymi,

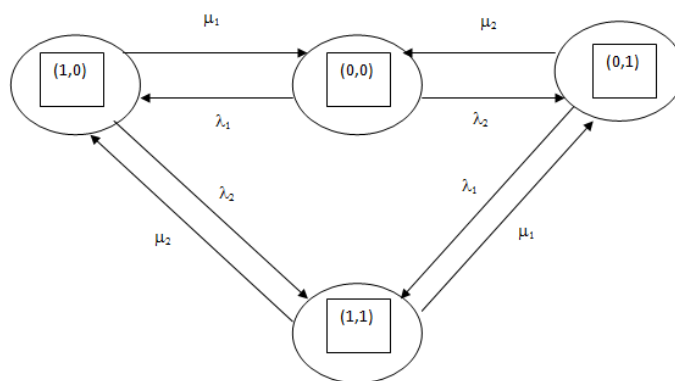
$U_k$  – zmienna losowa o rozkładzie trójkątnym (o intensywności  $\mu_1$ ) opisująca czas przejazdu pojazdu kołowego przez przejazd kolejowy,

$T_p$  – zmienna losowa o rozkładzie wykładniczym z parametrem  $\lambda_2$  opisująca odstęp czasu pomiędzy kolejnymi pojazdami szynowymi,

$U_p$  – zmienna losowa o rozkładzie jednostajnym (o intensywności  $\mu_2$ ) opisująca czas przejazdu pojazdu szynowego przez przejazd kolejowy,

LS – liczba samochodów przejeżdżających przez przejazd kolejowy do chwili  $t_w$ ,

LP – liczba pociągów przejeżdżających przez przejazd kolejowy, do chwili  $t_w$ .



Rys. 3. Graf włożonego łańcucha markowa

## 2.2. Model symulacyjny

Złożoność rozpatrywanego modelu powoduje, że do oszacowania charakterystyk chwilowych (dla zadanego okresu czasu) niezbędne jest wykorzystanie modeli symulacyjnych bazujących na modelu kolejkowym zagrożenia. W rozpatrywanym modelu przyjęto dwa typy rozkładów czasu przejazdu przez przejazd kolejowy pojazdów szynowych i kołowych:

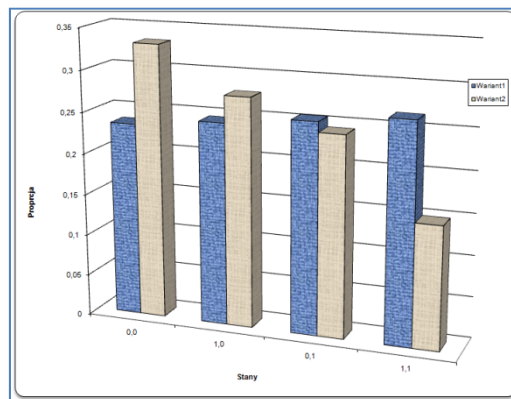
- Jednostajny (równomierny ciągły) nieuwzględniający struktury rodzajowej strumienia pojazdów;
- Trójkątny, w którym położenie mody wyznacza najliczniejsza grupa pojazdów kołowych (np. maszyny i ciągniki rolnicze, albo ciężarówki itp.).

Intensywności dla poszczególnych strumieni ruchu, przy uwzględnieniu dobowych zmian natężenia ruchu, przyjęto, jako zmienne z przedziałów  $\lambda_1 \in [0, \lambda_{1\max}]$ ,  $\lambda_2 \in [0, \lambda_{2\max}]$ .

Schemat krokowy symulacji:

- W chwili  $t_0$  rozpoczęcia symulacji system jest w stanie (0,0).

- Losujemy wartość czasu czekania na pojazd kołowy  $t_k$  ( $k = 0$  w chwili  $t_0$ ) zgodnie z rozkładem wykładniczym o intensywności  $\lambda_1$ ,  $k = k+1$ .
- Losujemy wartość czasu czekania na pojazd szynowy  $s_n$  ( $n = 0$  w chwili  $t_0$ ) zgodnie z rozkładem wykładniczym o intensywności  $\lambda_2$ ,  $n = n+1$ .
- Losujemy czas przebywania na przejeździe pojazdu kołowego  $os_k$  (czas obsługi), zgodnie z rozkładem trójkątnym o intensywności  $\mu_1$ .
- Losujemy czas przebywania na przejeździe pojazdu szynowego  $op_n$  (czas obsługi), zgodnie z rozkładem jednostajnym o intensywności  $\mu_2$ .
- Obliczamy ciągi
  - a.  $\{T_{cwk}\}$  – czas wjazdu na przejazd pojazdu kołowego;
  - b.  $\{T_{cok}\}$  – czas opuszczenia przejazdu przez pojazd kołowego;
  - c.  $\{T_{cwp}\}$  – czas wjazdu na przejazd pojazdu szynowego;
  - d.  $\{T_{cop}\}$  – czas opuszczenia przejazdu przez pojazd szynowy.
- Uruchamiamy procedurę kolizja.
  - a. Wyniki procedury zapisujemy w zmiennych:
    - i. ciąg chwil kolizji,
    - ii. liczba kolizji typu samochód - pociąg,
    - iii. liczba kolizji typu pociąg - samochód.
- Uruchamiamy procedurę wykresy, Rys. 4.
- Przygotowanie raportu.



Rys. 4. Proporcje czasu przebywania w poszczególnych stanach dla różnych wariantów  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  i natężeń ruchu, na podstawie symulacji

Parametry  $\alpha_1$  i  $\alpha_2$  oszacowano na podstawie danych historycznych dotyczących przyczyn wypadków, przyjmując  $\alpha_1=98\%$ ,  $\alpha_2=2\%$ .

### 3. WNIOSKI

Przejazdy kolejowe, jako miejsca, w których przecinają się potoki ruchu pojazdów szynowych i pojazdów kołowych są rejonem szczególnie narażonym na niebezpieczeństwo zderzenia, [4]. Pociąg to pojazdy o wielkiej masie, braku możliwości manewrowania i bardzo długiej drodze hamowania, co w połączeniu z prędkością, z jaką

się porusza stanowi wielkie zagrożenie dla kierującego i pasażerów pojazdu kołowego, który musi uczynić wszystko, żeby nie doszło do kolizji. Zachowanie szczególnej ostrożności podczas przejeżdżania przez tory kolejowe polegać musi na podjęciu działań zmierzających do zapewnienia bezpiecznego przejazdu i odpowiednich do warunków i sytuacji. Istotnym czynnikiem oceny stanu bezpieczeństwa ruchu kolejowego jest analiza zaistniałych wypadków kolejowych, ich przyczyn, skutków oraz występujących zagrożeń. Zastosowanie modeli symulacyjnych wykorzystujących metody teorii obsługi masowej pozwala na kategoryzację i hierarchizację przejazdów kolejowych ze względu na poziom bezpieczeństwa. W modelach tych proces kolizji jest procesem punktowym przyjmującym w chwili  $t$  wartość równą liczbie kolizji, które wystąpiły w przedziale czasu  $[t_0, t)$ . Zastosowanie modeli stochastycznych pozwala na uwzględnienie dynamicznych zmian natężenia ruchu.

### Bibliografia

1. Cieślakowski S., J., Wybrane zagadnienia z zakresu bezpieczeństwa transportu, Elektroniczne czasopismo naukowe z dziedziny logistyki LogForum, ISSN 1734-459X, 2009, Vol. 5, Issue 3, No 3, <http://www.logforum.net>
2. Obretenow A., Dimitrow B., Teoria masowej obsługi, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1989.
3. Smolarek L., Smalko Z., Estimate of Collision Threat for Ship Routes Crossing, Proceedings of XIII International Scientific and Technical Conference on Marine Traffic Engineerin, MTE 2009, Malmo Sweden, pp.195-199.
4. Wawrzyński W., Bezpieczeństwo systemów sterowania w transporcie. Wydaw. Inst. Technologii Eksploatacji, Warszawa-Radom 2004.

### RISK ASSESSMENT OF COLLISION AT PASSIVELY-PROTECTED RAIL CROSSINGS

**Abstract:** Occupants of a motor vehicle that collides with a train are 40 times more likely to die, than if they had collided with another motor vehicle. More than half of all railroad mishaps occur at these unprotected crossings. While an automobile traveling 50 miles per hour requires approximately 50 feet to come to a stop, it takes a train over a mile and a half, more than 150 times longer, to stop traveling from the same rate of speed<sup>5</sup>. Queuing models can be used for categorization of rail crossing according their safety. Application of simulation models using methods of queuing theory helps for prioritizing the rail crossings because of the level of security. In these models, the process of collision is a point process taking at the time  $t$  value equal to the number of collisions that occurred within the time interval  $[t_0, t)$ . Application of stochastic models allows to take into consideration the dynamic changes in traffic. The complexity of such models makes necessary to use simulation approach. While grade crossing warning signals have become more high tech and rail traffic has steadily increased, the railroads responsible for maintenance have continuously reduced their workforce, leaving the public at increased risk.

**Keywords:** queuing models, Markov processes, simulation approach of safety model

---

<sup>5</sup> [www.ggreen.com/aop/personal-injury/railroad-crossing-litigation/](http://www.ggreen.com/aop/personal-injury/railroad-crossing-litigation/)