

Ewa KONONOWICZ
Franciszek PIETRUCHA

MODELOWANIE RUCHU NA SKRZYŻOWANIACH DRÓG I LINII KOLEJOWYCH

Streszczenie. W artykule autorzy proponują użycie modelu teorii masowej obsługi do wyznaczania charakterystyk zakłóceń ruchu drogowego na przejeździe kolejowym. Charakterystyki mogą znaleźć zastosowanie jako narzędzie klasyfikacji skrzyżowań dróg i linii kolejowych.

TRAFFIC MODELING ON THE RAILWAY CROSSING

Summary. In the papers the authors offer the use of the queuing theory model to assign road traffic disturbance characteristics on the road-rail crossing. These characteristics may be used as a classification tool of a railway crossing.

1. WSTĘP

Przejazdy kolejowe, jak popularnie nazywane są skrzyżowania dróg publicznych z liniami kolejowymi, od lat przysparzają wielu trosk i kłopotów zarówno służbom drogowym, jak i kolejowym. Ze względu na potencjalne zagrożenie, jakie stwarza możliwość konfliktów pojazdów drogowych z kolejowymi, stanowią one niezwykle czułe miejsce sieci transportowej. Skrzyżowania te mogą być dwójakiego rodzaju. Typ pierwszy to skrzyżowania dwupoziomowe w postaci wiaduktów drogowych nad koleją, wiaduktów kolejowych lub tuneli pod koleją. Realizacja tego typu skrzyżowań wymaga sporych nakładów finansowych, lecz wyklucza całkowicie niebezpieczeństwo zderzenia pojazdów obu rodzajów ruchu. Drugi typ stanowią przejazdy jednopoziomowe, stanowiące obszar wspólny drogi kolejowej i drogi samochodowej. Jest to zatem wspólny - dla potoków ruchu obu rodzajów - obszar kolizji.

Jest zasadą, że na przejazdach pierwszeństwo posiada ruch kolejowy. W przypadku zajęcia przejazdu przez pojazd kolejowy pojazdy drogowe zmuszone są do zatrzymania. Sytuacja taka powoduje perturbacje w ruchu drogowym tym dotkliwsze, im dłużej zajęty jest przejazd (co związane jest z intensywnością ruchu kolejowego) i im bardziej intensywny jest korzystający z przejazdu, ruch drogowy. Przejazd kolejowy w jednym poziomie, poza powodowaniem utrudnień w ruchu na drogach, stanowi także zawsze duże zagrożenie bezpieczeństwa. Stąd

potrzeba wyposażenia go w techniczne i organizacyjne środki zabezpieczenia ruchu (urządzenia rogatkowe, sygnalizację świetlną i dźwiękową, znaki drogowe).

W procesie decyzyjnym ważne jest dysponowanie racjonalnym kryterium, pozwalającym na zakwalifikowanie projektowanego lub przebudowywanego skrzyżowania droga - kolej, do grupy skrzyżowań dwupoziomowych, wymagających budowy wiaduktu lub tunelu. Obowiązujące przepisy [7], poza jednoznacznymi wytycznymi w tym względzie wynikającymi z funkcji drogi (m.in. autostrady, drogi ekspresowe) lub kolei (linie o dużej prędkości), zawierają także znaczny margines dowolności interpretacyjnej odniesiony do tak nieprecyzyjnych czynników, jak np. dogodne warunki terenowe czy czynniki obronne. Autorzy, poszukując dróg ograniczenia wspomnianej dowolności interpretacyjnej, sięgnęli do wypróbowanego narzędzia, jakim są metody teorii masowej obsługi, przydatne zwłaszcza do opisu procesów o charakterze losowym, jakimi w istocie są procesy ruchowe w ruchu drogowym i kolejowym. W niniejszej pracy autorzy podejmują próbę takiego ujęcia kryterium ruchowego, które ich zdaniem powinno być rozstrzygające w podejmowaniu decyzji o rodzaju skrzyżowania, by mogło ono być z powodzeniem wykorzystane jako pomocnicze w przypadkach, kiedy inne względy nie pozwalają na jednoznaczną klasyfikację. Dla uzyskania obiektywnych wskaźników zakłóceń w ruchu drogowym zbudowano, zaproponowany w rozdziale 3, stochastyczny model pracy przejazdu kolejowego. Model ten został następnie wykorzystany do przeprowadzenia serii eksperymentów modelowych, których rezultaty podano w rozdziale 4.

2. STOSOWANE KRYTERIA KLASYFIKACJI SKRZYŻOWAŃ LINII KOLEJOWYCH Z DROGAMI

Warunki kwalifikacji skrzyżowań linii kolejowych z drogami określają w Polsce odpowiednie przepisy [7]. Dla obiektów nowo budowanych jako zasadę stosuje się rozwiązanie bezkolizyjne dla następujących przypadków skrzyżowań:

- linia kolejowa z drogą ekspresową lub autostradą,
- linia kolejowa dla prędkości pociągów $V > 160$ km/h z drogami publicznymi,
- układ torowy stacji w obrębie semaforów rozjazdowych z drogami publicznymi,
- linia kolejowa z drogą oznaczoną liczbą 1- lub 2- cyfrową,
- linia kolejowa z drogą oznaczoną liczbą 3-cyfrową lub inną drogą wojewódzką, gminną, lokalną miejską lub zakładową, gdy:
 - łączny czas zamknięcia przejazdu kolejowego $t > 12$ h/dobę,
 - istnieją warunki terenowe i istnieje uzasadnienie ekonomiczne lub obronne.

W przypadku obiektów modernizowanych stosuje się w całości zasady podane wyżej, a ponadto zaleca się skrzyżowania dwupoziomowe, jeśli niezbędne jest zwiększenie przepustowości drogi.

Tak więc parametrami kwalifikującymi skrzyżowania jako bezkolizyjne są: wysoka klasa drogi, duża prędkość pociągów na linii, duży całkowity czas niedostępności przejazdu dla ruchu drogowego (z powodu zajęcia przez ruch kolejowy) oraz usytuowanie skrzyżowania w obrębie stacji. Milcząco przyjmuje się tu, że skrzyżowanie jednopoziomowe dla tych warunków byłoby niebezpieczne lub znacznie zmniejszyłoby przepustowość drogi i płynność ruchu drogowego, przy założeniu bezwzględnej priorytetu ruchu kolejowego.

Za miarę kolizyjności obu rodzajów ruchu przyjmuje się "iloczyn ruchu" IR:

$$IR = D \cdot K \quad (1)$$

gdzie:

D - średnie dobowe natężenie ruchu drogowego,

K - średnie dobowe natężenie ruchu kolejowego, liczone wg zasad zawartych w przepisach [7].

Wartość iloczynu ruchu stanowi o zakwalifikowaniu skrzyżowania do jednej z pięciu kategorii przejazdów, czyli skrzyżowania jednopoziomowego.

W Czechach posługują się podobnie skonstruowanym miernikiem [6], zwanym tam "ruchowym momentem przejazdu":

$$M = 10 \cdot a \cdot b \quad (2)$$

gdzie:

a - średnia godzinowa intensywność ruchu kołowego na przejeździe,

b - dobowa intensywność ruchu pojazdów kolejowych.

We wzorach określających miernik kolizyjności operuje się wartościami średnimi parametrów (średnie natężenie ruchu drogowego i kolejowego), podczas gdy w rzeczywistości mają one charakter zmiennych losowych.

Stąd powstał zamiysł zbadania statystycznego zjawisk ruchowych na przejazdach kolejowych i opisanie ich metodami teorii masowej obsługi.

Na kolejach amerykańskich wg [3] odpowiednikiem tego miernika jest tzw. "Hazard Index" HI. Istnieje kilkanaście różnych wzorów na ustalenie jego wartości, obowiązujących w poszczególnych stanach. W niektórych wzorach pojawia się wielkość prawdopodobieństwa zaistnienia kolizji, zależnego od intensywności ruchu pociągów i pojazdów drogowych oraz ich prędkości.

W Japonii [1] jako podstawę do decyzji o budowie skrzyżowania dwupoziomowego stosuje się miernik czasu zajęcia skrzyżowania przez pojazdy obu rodzajów ruchu w pojezdgodzinach/5 lat. Przy jego wartości powyżej 10 000 skrzyżowanie kwalifikuje się jako dwupoziomowe.

Z porównania czterech przedstawionych wcześniej kryteriów stosowanych w różnych zarządach kolejowych wynikają następujące spostrzeżenia:

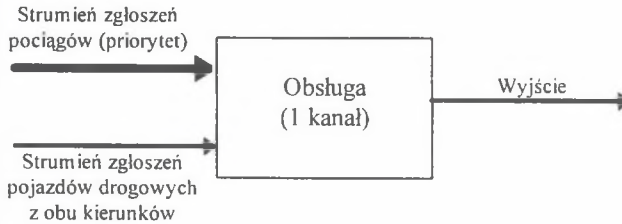
- formuła miary kolizyjności ruchu drogowego i kolejowego ma charakter dyskusyjny,
- we wzorach na miernik kolizyjności operuje się wartościami zdeterminowanymi - średnimi parametrów, które w rzeczywistości są zmiennymi losowymi,
- na PKP iloczyn ruchu IR uwzględniła tylko dwa parametry charakteryzujące kolizyjność (D i K), podczas gdy zjawisko jest bardziej złożone i powinno się je opisać innymi jeszcze parametrami, np. liczbą zamknięć i czasem ich trwania.
- brak obiektywnego uzasadnienia przyjętych wartości progowych iloczynu ruchu, kwalifikujących skrzyżowania od odpowiedniej kategorii.

Spostrzeżenia te nasunęły myśl o rozwiązaniu zagadnienia kolizyjności metodami teorii masowej obsługi z probabilistycznym opisem modelu.

3. STOCHASTYCZNY MODEL PRACY PRZEJAZDU KOLEJOWEGO

Jednopoziomowe skrzyżowanie linii kolejowej z drogą, zwaną dalej przejazdem, traktować można jako 1-kanalowe urządzenie masowej obsługi służące dwóm strumieniom zgłoszeń klientów: strumieniowi pojazdów drogowych nadjeżdżających z obu kierunków ruchu oraz strumieniowi zgłoszeń pociągów, który jest strumieniem priorytetowym. Zgłoszenia strumienia priorytetowego obsługiwane są w pierwszej kolejności. Przez pojęcie "obsługa" rozumiemy będziemy zajęcie (w sensie teorii masowej obsługi) powierzchni przejazdu przez pojazd

drogowy lub pociąg. Powierzchnia przejazdu ograniczona jest krawężnikami jezdni drogi i usytuowaniem rogatki (półrogatek) przejazdowych, sygnalizatorów lub znaków "krzyż św. Andrzeja". Zakłada się, że długość kolejki jest nieograniczona, a kolejność obsługi zgłoszeń o jednakowym priorytecie jest zgodna z kolejnością przybyć (FIFO) (rys. 1.)



Rys. 1. Przejazd kolejowy jako model teorii masowej obsługi
Fig. 1. Railway crossing as a model of theory of broad services

Celem badań modelowych jest uzyskanie charakterystyk zakłóceń ruchu drogowego na przejeździe kolejowym. Wymaga to dekompozycji przedstawionego modelu ogólnego do postaci uwzględniającej rozdzielenie kierunków ruchu na drodze. Dla strumienia pojazdów drogowych najistotniejszymi charakterystykami zakłóceń są: długość kolejki, czas oczekiwania w kolejce i prawdopodobieństwo, że pojazd zostanie zatrzymany przed przejazdem. Ponieważ struktura kierunkowa ruchu drogowego może być istotnie różna, stąd charakterystyki te powinny być określane oddzielnie dla każdego z kierunków.

Ruch pojazdów drogowych zdeteminowany jest na przejeździe nie tyle liczbą pociągów, ile czasem dostępności kanału obsługi, co wiąże się z czasem zamykania rogatki lub czasem przejazdu pociągu obejmującym także tzw. buforowy czas bezpieczeństwa w przypadku przejazdu bez rogatki. Stąd w modelu zdekomponowanym przyjęto za strumień priorytetowy strumień przerw w ruchu drogowym, traktując jako obsługę czas zamknięcia przejazdu lub czas przejazdu pociągu (dla przejazdów niezamykanych). Model zdekomponowany przedstawia rys. 2.

Obsługa zgłoszeń priorytetowych może się rozpocząć dopiero po obsłużeniu zgłoszenia (z lub bez priorytetu), które aktualnie jest obsługiwane. Taki priorytet nazywa się w teorii masowej obsługi priorytetem względnym lub słabym.

Przy założeniu, że strumienie zgłoszeń obu rodzajów są strumieniami Poissona, zaś czas obsługi dla każdego ze strumieni jest zmienną losową o rozkładzie dowolnym, uzyskano w teorii masowej obsługi [2], [4] metodą zdarzeń dodatkowych rozwiązania analityczne dla systemu jednokanałowego z priorytetem względnym (model M/G/1). Rozwiązania te są ważne dla systemu znajdującego się w równowadze stochastycznej. Umożliwiają one obliczenie wartości oczekiwanej czasu oczekiwania pojazdów drogowych o niższym priorytecie) z następującego wzoru:

$$EC = \frac{\lambda_d (t_d^2 + S_d^2) + \lambda_p (t_p^2 + S_p^2)}{2(1 - \rho_d - \rho_p)(1 - \rho_p)} \quad (3)$$

gdzie:

λ_d - intensywność przybyć pojazdów drogowych w pojazdach na minutę,

λ_p - intensywność zamknięć przejazdu dla ruchu drogowego wyrażona liczbą zamknięć na minutę,

- t_d - wartość oczekiwania czasu zajęcia przejazdu przez pojazd drogowy w minutach,
 S_d - odchylenie standardowe czasu zajęcia przejazdu przez pojazd drogowy w minutach,
 t_p - wartość oczekiwania czasu zajęcia przejazdu przez pociąg w minutach (czasu zamknięcia przejazdu dla ruchu drogowego),
 S_p - odchylenie standardowe czasu zamknięcia przejazdu dla ruchu drogowego w minutach,

$$\rho_p = \frac{\lambda_d}{\mu_d} \text{ - intensywność ruchu drogowego,}$$

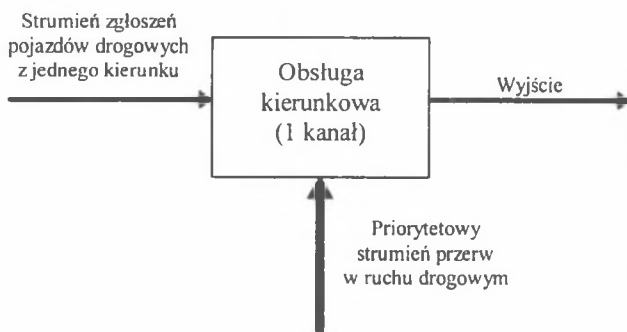
$$\rho_p = \frac{\lambda_p}{\mu_p} \text{ - intensywność ruchu kolejowego,}$$

μ_d - intensywność obsługi pojazdów drogowych w pojazdach na minutę,

μ_p - intensywność obsługi ruchu kolejowego wyrażona liczbą przerw w ruchu drogowym na minutę, np.

$$\mu_p = \frac{1}{t_p}.$$

Badania statystyczne ruchu drogowego na 10 przejazdach kolejowych potwierdziły przyjęte w modelu założenia o charakterze strumienia zgłoszeń pojazdów drogowych. Średnie intensywności pojazdów drogowych wynosiły dla przejazdów strzeżonych od 0,42 do 4,14 pojazdów na minutę, zaś dla niestrzeżonych od 0,10 do 0,29 pojazdów na minutę. Z literatury przedmiotu [5] wynika, że strumień zgłoszeń pociągów w określonym przekroju linii kolejowej może być uważany za strumień zgłoszeń Poissona z wykładniczym przesuniętym rozkładem czasu między kolejnymi zgłoszeniami.



Rys. 2. Model zdekomponowany przejazdu kolejowego
 Fig.2. Model of decomposed Railway crossing

Rozkład odstępów czasu między początkami kolejnych zamknięć przejazdu, ściśle powiązany z jednym lub splotem kilku strumieni zgłoszeń pociągów, jest - jak wykazują badania własne - także rozkładem wykładniczym.

Średnie intensywności zamknięć dla przejazdów strzeżonych wahały się od 0,011 do 0,11 zamknięć na minutę, dla przejazdów niestrzeżonych od 0,001 do 0,06 zamknięć na minutę.

Czasy zamknięcia dla badanych przejazdów mają różne rozkłady, których parametry określono na podstawie badań oddzielnie dla każdego z nich. Średnie wartości czasów zamknięć dla badanych przejazdów strzeżonych wynosiły od 1,72 minuty do 4,06 minuty (wartości wariancji s^2 od 1,98 do 5,46 minuty do kwadratu).

Badania prowadzone na przejazdach wykazały, że czas zajęcia przejazdu przez pojazd drogowy zależy głównie od prędkości, z jaką ten porusza się w jego obrębie. Prędkość warunkuje stan nawierzchni. W badaniach przyjęto stałą wartość intensywności obsługi pojazdów drogowych, wspólną dla wszystkich przejazdów, wynikającą z prędkości i średniego odstępu między pojazdami. Wartość ta wynosiła 4 sekundy, czyli 0,067 minuty. Dla prostoty obliczeń przyjęto, że suma $t_{d2} + S_{d2}$ jest stała i wynosi 0,0051.

Warunek równowagi stochastycznej systemu wyraża się spełnieniem nierówności:

$$\rho_p + \rho_d < 1. \quad (4)$$

Dla badanych przejazdów, na których obserwowano zróżnicowane intensywności ruchu drogowego, jak i kolejowego, w każdym przypadku warunek ten był spełniony.

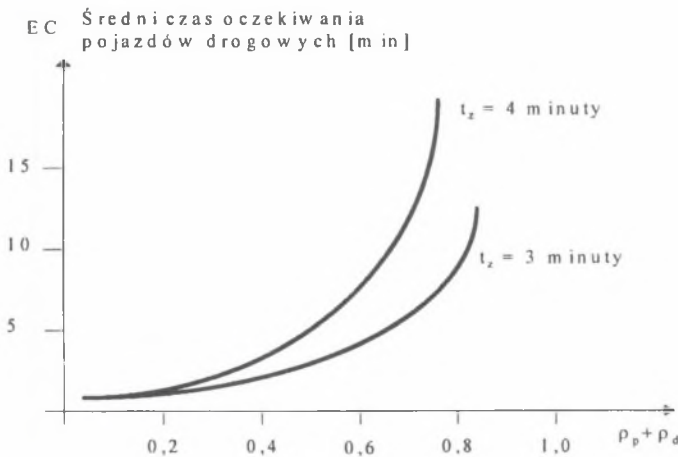
W modelu zakłada się, że strumień ruchu drogowego jest stacjonarny w przedziale godzin szczytu (szczyt 3-godzinny).

Oczywiste jest, że dla $\rho_p + \rho_d \geq 1$ skrzyżowanie musi być 2-poziomowe.

4. PROPOZYCJA MODYFIKACJI KRYTERIUM RUCHOWEGO

Rozpoznanie zjawisk ruchowych na przejeździe kolejowym dokonane za pomocą badań statystycznych i matematyczne ich opisanie z wykorzystaniem teorii kolejek nasuwa pomysł użycia wskaźników działania systemu dla celów klasyfikacji.

Suma intensywności obu rodzajów ruchu z warunku równowagi stochastycznej (4) stanowić może kryterium kwalifikowania przejazdów do kategorii dwupoziomowych. Z badań modelowych wynika, że w miarę wzrostu sumy intensywności rośnie średni czas oczekiwania pojazdów drogowych w kolejce.



Rys. 3. Wykres zależności średniego czasu oczekiwania pojazdów drogowych EC od wielkości sumy $\rho_p + \rho_d$ intensywności ruchu kolejowego i drogowego dla t_z 3 i 4 minuty

Fig. 3. Diagram showing relationship between average waiting time of EC road vehicles and sum $\rho_p + \rho_d$ as intensity of train movement and road traffic for $t_z = 3$ and 4 minutes

Dla wartości sumy $\rho_p + \rho_d$ w granicach 0,5 - 0,6 i wartości większych czas oczekiwania rośnie bardzo silnie, co pokazano na rys. 3. Stąd wartość tę można przyjąć jako graniczną.

W grupie skrzyżowań jednopoziomowych proponuje się przyjąć za podstawę do decyzji o zastosowaniu urządzeń zabezpieczających prawdopodobieństwo możliwości wystąpienia kolizji. Kolizja może nastąpić w przypadku, gdy:

- w czasie zajęcia przejazdu przez pojazd drogowy nadjeżdża pociąg lub
- w czasie zajęcia przejazdu przez pociąg nadjeżdże co najmniej jeden samochód.

Wartości tych prawdopodobieństw mogą być wyznaczone na podstawie znajomości charakterystyk strumieni zgłoszeń i czasów zajęcia przejazdów.

Prawdopodobieństwo p_z zaistnienia przypadku drugiego można obliczyć jako iloczyn prawdopodobieństw.

Prawdopodobieństwo p_1 , iż w czasie niedostępności przejazdu nadjeżdże co najmniej jeden pojazd drogowy, wyraża się wzorem:

$$p_1 = 1 - e^{-\lambda_d \cdot t_z} \quad (5)$$

Prawdopodobieństwo p_2 , że w dowolnej chwili przejazd będzie zajęty - niedostępny, można oszacować jako:

$$p_2 = \frac{n \cdot t_z}{\tau} \quad (6)$$

gdzie:

- n - liczba pociągów w czasie τ ,
- τ - rozpatrywany okres czasu.

Prawdopodobieństwo zaistnienia pierwszej z wymienionych sytuacji kolizyjnych wyznacza się analogicznie, lecz jako bardzo małe - pomija się go w dalszych rozważaniach.

Nie sposób ustalić obiektywnie wartości tego prawdopodobieństwa, rozstrzygającej o konieczności wprowadzenia urządzeń zabezpieczających. Dlatego proponuje się przyjęcie np. wartości $p_z = 0,005$. Nie należy utożsamiać prawdopodobieństwa możliwości wystąpienia kolizji z prawdopodobieństwem zaistnienia wypadku. To drugie jest znacznie mniejsze (ale nie większe) i składa się nań prawdopodobieństwo możliwości kolizji (wielkość obiektywna) i ryzyko związane z czynnikiem ludzkim (wielkość subiektywna).

W grupie przejazdów wyposażonych w urządzenia zabezpieczające (dla których $p_z > 0,005$) wybór jednego z rodzajów zabezpieczeń może być uzależniony od wskaźników zakłóceń ruchu drogowego. Wartości wskaźników zakłóceń, takich jak długość kolejki i czas oczekiwania w kolejce, zależą, jak wykazały badania modelowe, od czasu zamknięcia przejazdu i liczby zamknięć. W tym przypadku nie można określić wyraźnych zakresów stosowania poszczególnych rodzajów zabezpieczeń opierając się wyłącznie na wartościach wymienionych wskaźników.

Proponowane formuły kryteriów zawierają 4 parametry charakteryzujące ruch na przejeździe (λ_d , λ_p , n_z , t_z) i uwzględniają ich losową zmienność. Zaproponowane wartości progowe przyjęte są również arbitralnie, dają jednak pojęcie o skutkach ruchowych takiego przyjęcia.

LITERATURA

1. Kaneko T.: Safety Measures for Grade Crossing. Japanese Railway Engineering 1979, nr 4.
2. Klimow G.P.: Procesy masowej obsługi. Warszawa 1979.
3. Richards H.A., Bridges G.S.: Railroad Grade Crossings. Automotive Safety Foundation 1968.
4. Saaty T.L.: Elements of Queuing Theory with Applications. New York 1962.

5. Węgiński J.: Metody probabilistyczne w projektowaniu transportu szynowego. Warszawa 1971.
6. ČSN 342650 Předpisy pro železniční přejezdová zabezpečovací zařízení. Praha 1981.
7. Zarządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej nr 144 z dn. 26 lutego 1996 r.

Recenzent: Dr hab.inż. Paweł Piec

Abstract

Railway crossing, as popularly known, are the crossings of public roads with railways. They have created a lot of problem for both road and railway services. In this work, the authors built model whereby crossing was treated as 1-passage device of broad service for two stream entry of clients: Stream of vehicles coming from opposite sides and stream of train entries as the priority stream. Entries of priority stream are first served. The aim of the model research is to find out the characteristic disturbances of the road at railway crossings.

The result of the research shows that disturbance indications such as queue length and waiting time on the line depend on the period of crossing closure and the number of closures.