ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1985

Seria: BUDOWNICTWO z. 61 Nr kol. 842

Ewa KONONOWICZ
Franciszek PIETRUCHA

KRYTERIUM RUCHOWE KLASYFIKACJI PRZEJAZDÓW KOLEJOWYCH W UJĘCIU TEORII MASOWEJ OBSŁUGI

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

1. WSTĘP

Skrzyżowania dróg publicznych z liniami kolejowymi, zwane popularnie przejazdami kolejowymi, od lat przysparzają wielu trosk i kłopotów zarówno służbom kolejowym, jak i drogowym. Ze względu na potencjalne zagrożenie, jakie stwarza możliwość konfliktu pojazdów drogowych z kolejowymi, stanowią one czułe miejsca sieci transportowej. Skrzyżowania dróg z kolejami mogą być dwojakiego rodzaju. Typ pierwszy stanowią skrzyżowania dwupoziomowe w postaci wiaduktów drogowych lub kolejowych. Realizacja tego typu skrzyżowań wymaga sporych nakładów finansowych, lecz eliminuje całkowicie niebezpieczeństwo zderzenia pojazdów obu rodzajów ruchu.Drugi typ stanowią przejazdy i przejścia jednopoziomowe stanowiące obszar wspólnej drogi kolejowej i samochodowej. Jest to zatem wspólny dla potoków (użytkowników) obu rodzajów ruchu obszar kolizji. Jest zasadą, że na przejazdach pierwszeństwo ma ruch kolejowy. Ogranicza to w znacznym stopniu przepływ ruchu drogowego, a zatem zmniejsza sprawność drogi. Występujące na przejazdach duże zagrożenie bezpieczeństwa, zwłaszcza użytkowników drogi, wymaga stosowania technicznych i organizacyjnych środków zabezpieczenia (urządzenia rogatkowe, sygnalizacja świetlna i dźwiękowa, znaki drogowe).

Pośród czynników decydujących o zakwalifikowaniu skrzyżowania do określonego typu, zaś w grupie skrzyżowań jednopoziomowych - wyposażenia go w stosowne środki zabezpieczenia - jednym z najważniejszych jest kryterium ruchowe, ujmujące w sposób syntetyczny intensywność ruchu kolejowego i drogowego. W niniejszym artykule autorzy podjęli próbę racjonalizacji tego kryterium przy użyciu metod teorii masowej obsługi. Dla uzyskania obiektywnych wskaźników zakłóceń ruchu drogowego zbudowano, zaprezentowany w rozdziale 3, stochastyczny model pracy przejazdu kolejowego. Modelu użyto następnie do przeprowadzenia szeregu eksperymentów modelowych, których rezultaty podano w rozdziale 4.

2. OBOWIAZUJĄCE KRYTERIA KLASYFIKACJI SKRZYŻOWAŃ LINII KOLEJOWYCH Z DROGAMI

O tym, czy skrzyżowanie ma być dwupoziomowe czy jednopoziomowe, zaś w zakresie jednopoziomowych o jego kategorii, decydują pewne przyjęte kryteria, bardzo ściśle określone w przepisach kolejowych. Ogólnie można powiedzieć, iż o klasyfikacji stanowią:

- kategoria drogi kolejowej i samochodowej,
- pole widoczności przejazdu: widoczność pociągów i przejść z drogi i widoczność drogi z pociągu oraz tzw.
- iloczyn ruchu, będący miarą natężenia, a zatem i kolizyjności obu rodzajów ruchu.

To ostatnie kryterium występuje w większości przepisów regulujących sprawy klasyfikacji przejazdów, lecz formuły ustalania miernika kolizyjności są różne.

Na PKP w porozumieniu z Administracją Drogową obowiązuje postać "iloczynu ruchu" - IR:

$$IR = D \cdot K \tag{1}$$

gdzie:

D - średnie dobowe natężenie ruchu pojazdów drogowych wszystkich rodzajów wyrażone w jednostkach umownych i liczone wg pewnych zasad zawartych w przepisach [1],

K - średnia dobowa liczba pociągów lub jazd manewrowych w obrębie skrzyżowania.

Przepisy w sposób arbitralny podają również graniczne wartości iloczynu ruchu, kwalifikujące - przy spełnieniu pozostałych wymogów - przejazd do odpowiedniej kategorii. I tak dla $IR \geqslant 60\,000$ przejazd kwalifikuje się jako skrzyżowanie dwupoziomowe, dla $50\,000 < IR \leqslant 20\,000$ jako jednopoziomowy niestrzeżony.

Iloczyn ruchu uwzględnia jedynie dwa parametry, podczas gdy kolizyjność zależy także - co wynika z obserwacji - od innych jeszcze parametrów np. liczby zamknięć i średniego czasu ich trwania.

W Czechosłowacji posługują się podobnie skonstruowanym miernikiem [2], zwanym tam "ruchowym momentem przejazdu":

$$M = 10\, a\, b \tag{2}$$

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 zamysł zbadania statystycznego zjawisk ruchowych na przejazdach kolejowych i opisania 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 [4] jako podstawę do decyzji o budowie skrzyżowania dwupoziomowego stosuje się miernik czasu zajęcia skrzyżowania przez pojazdy obu rodzajów ruchu w pojazdogodzinach/5 lat. Przy jego wartości powyżej 10 000 skrzyżowanie kwalifikuje się jako dwupoziomowe.

Z porównania czterech przedstawionych wcześniej kryteriów ruchowych 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 uwzględnia 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 oraz
- brak obiektywnego uzasadnienia przyjętych wartości progowych iloczynu ruchu, kwalifikujących przejazd od odpowiedniej kategorii.

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

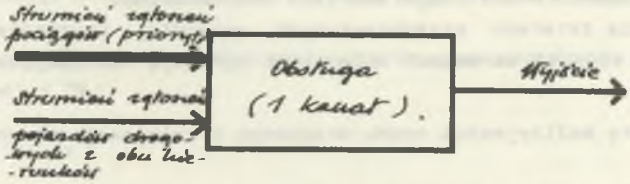
3. STOCHASTYCZNY MODEL PRACY PRZEJAZDU KOLEJOWEGO

3.1. Przejazd kolejowy jako system obsługi masowej

Przejazd kolejowy zwykły w poziomie szyn traktować można jako 1-kanałowe urządzenie masowej obsługi służące dwom 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 rozumieć będziemy zajęcie w sensie teorii masowej obsługi powierzchni przejazdu przez pojazd drogowy lub pociąg Po-

wierzchnia przejazdu ograniczona jest krawędziami jezdni drogi i usytuowania rogatek (półrogatek) przejazdowych, sygnalizatorów lub znaków "krzyż św. Andrzeja". Zakłada się, że długość kolejki jest nieograniczona, zaś kolejność obsługi zgłoszeń o jednakowym priorytecie jest zgodna z kolejnością przybyć (FIFO) (rys. 1).

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.



Rys. 1. Przejazd kolejowy jako model teorii masowej obsługi

Ruch pojazdów drogowych zdeterminowany jest na przejeździe nie tyle liczbą pociągów co czasem dostępności kanału obsługi, co wiąże się z czasem zamykania rogatek lub czasem przejazdu pociągu obejmującym także tzw. buforowy czas bezpieczeństwa w przypadku przejazdu bez rogatek. 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 rozpocząć się 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 [5], [6] metodą zderzeń 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:

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

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 oczekiwana 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,

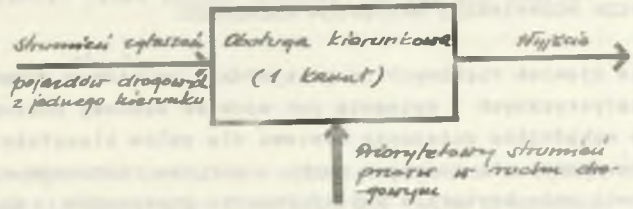
$\rho_d = \frac{\lambda_d}{\mu_d}$ - intensywność ruchu drogowego,

$\rho_p = \frac{\lambda_p}{\mu_p}$ - 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 przebyć 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 [7] wynika, że strumień zgłoszeń pociągów w określonym przekroju linii kolejowej może być uważany za strumień zgłoszeń Poissona z wykładniczym rozkładem czasu między kolejnymi przybyciami.



Rys. 2. Model zdekomponowany przejazdu kolejowego

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 ta zależy od stanu 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 $t_d^2 + s_d^2$ jest stała i wynosi 0,0051.

Warunek równowagi stochastycznej systemu wyraża się spełnieniem nierówności:

$$\rho_p + \rho_d < 1 \tag{4}$$

gdzie:

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

ρ_d - intensywność ruchu drogowego; $\rho_d = \frac{\lambda_d}{\mu_d}$.

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

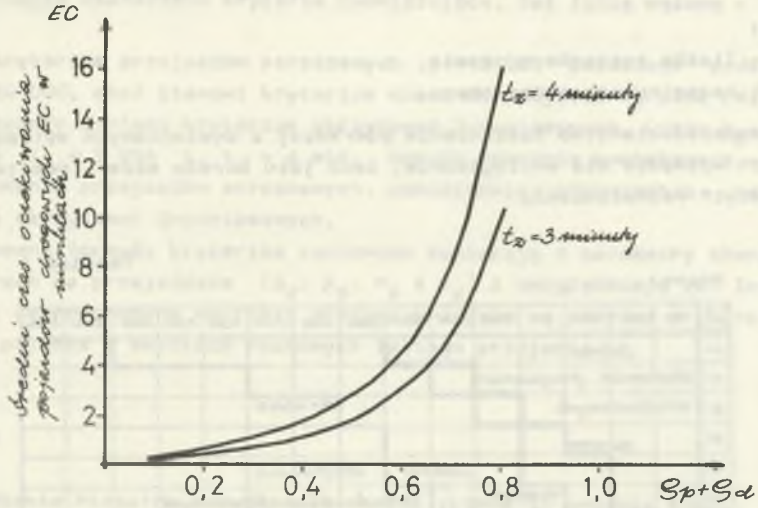
W modelu zakłada się, że strumień ruchu drogowego jest stacjonarny w przedziale godzin szczytu (szczyt 3-godzinny).

4. PROPOZYCJA MODYFIKACJI KRYTERIUM RUCHOWEGO

Rozpoznanie zjawisk ruchowych na przejeździe kolejowym dokonane za pomocą badań statystycznych i opisanie ich modelem masowej obsługi nasuwa pomysł użycia wskaźników działania systemu dla celów klasyfikacji.

Suma intensywności obu rodzajów ruchu z warunku równowagi stochastycznej (3) 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.

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.



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

W grupie przejazdów 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 nadjedzie 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 nadjedzie co najmniej jeden pojazd drogowy, wyraża się wzorem:

$$p_1 = 1 - e^{-\lambda_d \cdot t_z} \tag{5}$$

gdzie:

λ_d - intensywność strumienia zgłoszeń pojazdów drogowych,

t_z - czas niedostępności przejazdu dla ruchu drogowego.

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

$$p_2 = \frac{n\, t_z}{\tau} \tag{6}$$

gdzie:

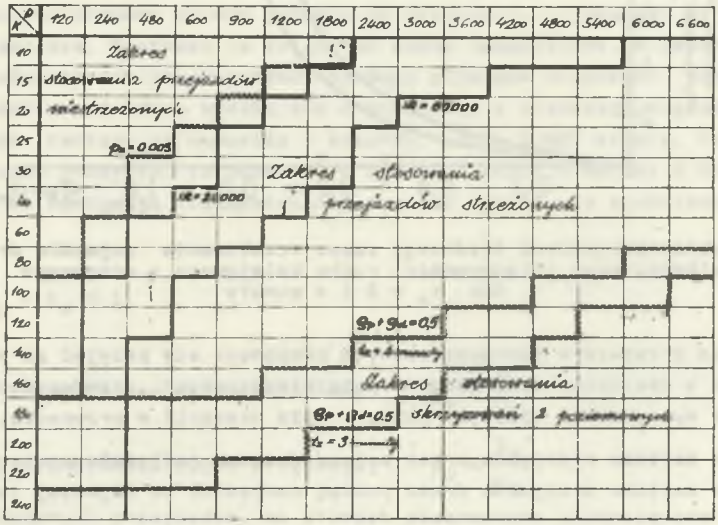
n - liczba pociągów w czasie,

τ - rozpatrywany okres czasu.

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

Tablica 1

TABLICA 1



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 uzależniony być od wskaźników zakłóceń ruchu drogowego. Wartości wskaźników zakłóceń takich jak długość kolejki i czas oczekiwania w kolejce zależą, jak wykazały badania modelowe, od długości 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.

Tablica 1 zawiera graficzną prezentację obowiązujących i proponowanych kryteriów ruchowych dla różnych kombinacji średnich dobowych intensywności ruchu drogowego i kolejowego (D i K).

Linię ciągłą zaznaczono kryteria obowiązujące, zaś linią wężową - proponowane.

Linia kryterium przejazdów strzeżonych p = 0,005 przebiega podobnie jak IR = 20 000, choć stanowi kryterium nieco ostrzejsze. Wyraźne różnice istnieją między liniami kryterium skrzyżowań 2-poziomowych. Linie $\rho_p+\rho_d$ = = 0,5 dla t_z = 3 min i t_z = 4 min. bardzo znacznie powiększają zakres stosowania przejazdów strzeżonych, zmniejszając odpowiednio zakres stosowania skrzyżowań 2-poziomowych.

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

LITERATURA

[1] Zarządzenie Ministra Komunikacji nr 215 z dnia 10 grudnia 1968.

[2] CSN 342650 Predpisy pro zeleznicni prejezdova zabezpecovaci zarizeni. Praha 1981.

[3] Richards H.A.: Bridges G.S.: Raildroad Grade Crossings. Automative Safety Fundation 1968.

[4] Kaneko T.: Safety Measures for Grade Crossing. Japanese Railway Engineering 1979, nr 4.

[5] Saaty T.L.: Elements of Queneing Theory with Aplications. New York 1962.

[6] Klimow G.P. Procesy masowej obsługi. Warszawa 1979.

[7] Węgierski J.: Metody probabilistyczne w projektowaniu transportu szynowego. Warszawa 1971.

КРИТЕРИЙ ДВИЖИМОСТИ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕЕЗДОВ В АСПЕКТЕ ТЕОРИИ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Р е з ю м е

В статье авторы предлагают применение модели теории массового обслуживания к характеристике нарушений дорожного движения на железнодорожным переезде. Эти характеристики могут найти применение в классификации железнодорожных переездов.

A CRITERION OF RAILROAD CROSSING CLASSIFICATION VIA QUEUING THEORY

S u m m a r y

In this papers the authors offer the use of the queuing theory model to assign road traffic disturbance characteristics on the railroad cros-

sing. These characteristic can be used as a tool to the railroad crossing classification.