

Stanisław GONDEK<sup>1</sup>

### **WPŁYW STRATEGII STEROWANIA NA EFEKTYWNOŚĆ PRZEJŚCIA DLA PIESZYCH Z SYGNALIZACJĄ ŚWIETLNA**

*W celu podniesienia bezpieczeństwa pieszych przekraczających drogi o dużym ruchu kołowym coraz częściej stosuje się przejścia dla pieszych z sygnalizacją świetlną. Sygnalizacja powoduje jednak zakłócenie płynności ruchu i straty czasu pojazdów wynikające z zatrzymań w czasie nadawania sygnału czerwonego na sygnalizatorach. W referacie przedstawiono model i program symulacyjny, który został wykorzystany do analiz efektywności różnych strategii sterowania na przejściu dla pieszych z sygnalizacją świetlną, tzn. sygnalizację stałoczasową, sygnalizację wzbudzaną i kaskadową sygnalizację wzbudzaną. Zaprezentowane wyniki badań pokazują, że zaawansowane systemy sterowania mogą poprawić płynność jazdy pojazdów oraz obniżyć straty czasu pojazdów i pieszych.*

### **INFLUENCE OF CONTROL STRATEGY ON EFFECTIVENESS OF SIGNALIZED PEDESTRIAN CROSSWALK**

*In order to increase safety of pedestrians that cross highly congested roads, signalized pedestrian crosswalks are being used more and more often recently. However, traffic signals disturb traffic's liquidity and cause time loss for vehicles due to stops during the red signal. The paper presents a model and a simulation program that was used to analyse effectiveness of several control strategies on signalized pedestrian crosswalks, i.e. the fixed signal, the actuated signal and the cascade signal. Presented results of this analysis illustrate that advanced control systems may improve traffic liquidity and decrease time loss for vehicles and pedestrians.*

#### **1. WPROWADZENIE**

Zwiększające się natężenia ruchu sprawiają, że korzystanie przez pieszych z przejść bez sygnalizacji świetlnej staje się coraz mniej bezpieczne. Szczególnie dotyczy to przejść zlokalizowanych na drogach dwujezdniowych położonych na obszarach zamiejskich, charakteryzujących się dużymi natężeniami ruchu potoku pojazdów i wysokimi prędkościami jazdy. Przepisy [1] zalecają w takich przypadkach stosować sygnalizację świetlną pełną lub wzbudzaną. Zastosowanie sygnalizacji powoduje:

---

<sup>1</sup> Politechnika Krakowska, Katedra Budowy Dróg i Inżynierii Ruchu, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, tel. +48 12 628-25-39, fax. +48 12 628-23-28, e-mail: sgondek@pk.edu.pl

- *zwiększenie bezpieczeństwa niechronionych uczestników ruchu (pieszych) poprzez segregację w czasie kolidujących ze sobą potoków pojazdów i pieszych (co powoduje likwidację punktów kolizji) dzięki podawaniu użytkownikom odpowiednich sygnałów informujących o prawie, bądź zakazie przejazdu lub przejścia,*
- *pogorszenie warunków ruchu pojazdów i pieszych wynikające z zakazu wjazdu/wchodzenia podczas nadawania sygnału czerwonego na sygnalizatorze. Jak wynika z [1] należy zapewnić taką długość sygnału zielonego ciągłego dla pieszych aby wyniosła co najmniej 100 % czasu przejścia przez całe przejście przy prędkości pieszego równej 1.4 m/s. Dla długich przejść dla pieszych (w przypadku dróg dwujezdniowych długość przejścia ma co najmniej kilkanaście metrów) faza dla pieszych (na którą składają się: sygnał zielony ciągły, sygnał zielony migający oraz czas międzyzielony) ma znaczny udział w cyklu generując straty czasu pojazdów zatrzymujących się na sygnale czerwonym i zakłócając płynność jazdy potoku pojazdów.*

Przy podejmowaniu decyzji o zastosowaniu sygnalizacji świetlnej na przejściu dla pieszych należy uwzględnić natężenia ruchu pojazdów i pieszych oraz liczbę wypadków z pieszymi [2]. Trudno jest określić dokładnie, przy jakim poziomie natężeń ruchu i przy ilu zdarzeniach instalować sygnalizację. Pomocne dla inżyniera ruchu przy podejmowaniu decyzji może być pomocnicze kryterium punktowe przedstawione w [1], które opiera się na liczbowych ocenach bezpieczeństwa i warunków ruchu pieszych i pojazdów. Nie może ono jednak zastępować całościowej analizy wymaganej przez przepisy [1].

Rozwój systemów detekcji pojazdów i pieszych umożliwia zastosowanie różnych strategii sterowania na przejściu dla pieszych z sygnalizacją świetlną, które mogą zminimalizować niekorzystny wpływ sygnalizacji na warunki ruchu pojazdów. Powinno się jednak przeanalizować czy koszty wprowadzenia i eksploatacji zaawansowanych strategii sterowania nie przekroczą efektów wynikających ze zmniejszenia strat czasu pojazdów.

Użytecznym narzędziem do analiz efektywności różnych strategii sterowania na przejściu dla pieszych może być program symulacyjny PRZEJSCIE, który odwzorowuje przebieg potoków ruchu i oblicza miary efektywności potoków pojazdów i pieszych co umożliwia ocenę efektywności sterowania.

W referacie opisano model i program symulacyjny PRZEJSCIE oraz przedstawiono wybrane wyniki badań symulacyjnych pokazujące efektywność przejść dla pieszych dla wybranych strategii sterowania.

## **2. STRATEGIE STEROWANIA NA PRZEJŚCIU DLA PIESZYCH**

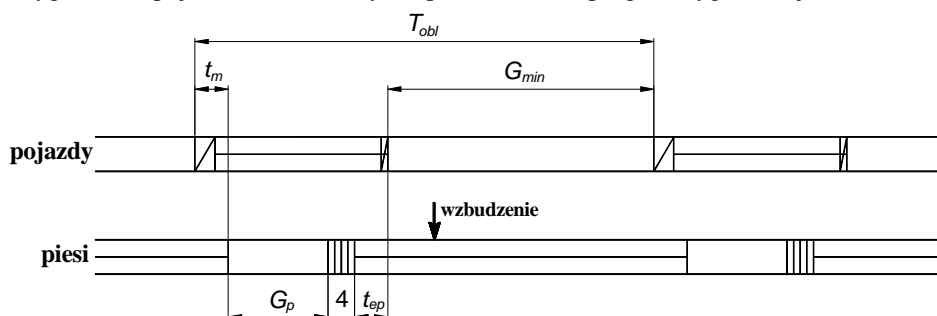
Po podjęciu decyzji o zastosowaniu sygnalizacji świetlnej na przejściu dla pieszych pozostaje wybór strategii sterowania oraz zaprojektowanie programu sygnalizacji. Najczęściej do wyboru są następujące strategie sterowania:

### **1. sygnalizacja wzbudzana dla pieszych**

Jest to najczęściej stosowana strategia sterowania bo stwarza pieszym dogodne warunki przechodzenia [2]. Sygnalizacja wzbudzana charakteryzuje się pracą według następującego układu: stan ustalony – stan wzbudzenia – stan ustalony. W konstrukcji programu sygnalizacji na przejściu (rys. 1) należy uwzględnić potrzeby pieszych i kierowców (pojazdów). W stanie „zerowym” (stan ustalony) na sygnalizatorach jest wyświetlany sygnał czerwony dla pieszych oraz sygnał zielony dla pojazdów. Po zgłoszeniu zapotrzebowania na sygnał zielony przez pieszego (co następuje w

momencie naciśnięcia przez niego przycisku dla pieszych na słupku sygnalizacyjnym), po upływie czasu międzycielonego  $t_m$  piesi otrzymują sygnał zielony o długości  $G_p$ , który powinien umożliwić pieszym przejście na drugą stronę jezdni z prędkością  $v_p = 1.4$  m/s. W obliczeniu długości czasu  $G_p$  trzeba uwzględnić natężenie ruchu pieszego na przejściu. Prędkości przechodzenia jezdni na przejściach sterowanych sygnalizacją świetlną w okresie sygnału zielonego, zielonego migającego i czerwonego (czas ewakuacji) są ważnymi parametrami przy projektowaniu programów tej sygnalizacji. W praktyce projektowej przyjmuje się prędkość pieszych 1.4 m/s.

Nieustanne wzbudzenia przez pieszych mogłyby spowodować problemy z przepustowością dla potoku pojazdów i dlatego po wyświetleniu dla pieszych sygnału zielonego, sygnału zielonego migającego i sygnału czerwonego tworzącego czas międzycielony  $t_{ep}$  sygnał zielony (poprzedzony sygnałem czerwono/żółtym) o długości  $G_{min}$  otrzymują pojazdy. Nieustanne wzbudzenia powodują, że sygnalizacja wzbudzana funkcjonuje jak stałoczasowa o długości cyklu obliczeniowego  $T_{obl}$  (wzór 1) i długości sygnału dla pojazdów  $G_{min}$ . Na rys. 1 przedstawiono program sygnalizacji wzbudzanej.



Rys. 1. Program sygnalizacji wzbudzanej dla pieszych

Czas ewakuacji  $t_{ep}$  w postaci sygnału czerwonego dla pieszych powinien zapewnić pieszemu pokonanie całego przejścia, jeśli w środku nie występuje miejsce azylu (wyspa, lub w pasie dzielącym) lub szerszej z dwóch części przejścia, jeśli przejście przechodzi przez miejsce azylu.

Długość cyklu obliczeniowego przyjmowanego do obliczeń przepustowości wynosi:

$$T_{obl} = G_{min} + t_m + G_p + 4 + t_{ep} \quad [s] \quad (1)$$

przy czym udział sygnału zielonego w cyklu tj.  $(G_{min}/T_{obl})$  powinien zapewnić pojazdom przepustowość przy danym natężeniu ruchu  $Q$  i natężeniu nasycenia  $S$ . Zatem długość sygnału  $G_{min}$  powinna wynosić  $G_{min} > T_{obl} \cdot Q/S$ .

## 2. sygnalizacja stałoczasowa

Jak wyżej wspomniano sygnalizacja wzbudzana przy nieustannych wzbudzeniach działa jak stałoczasowa, więc taka sygnalizacja jest stosowana gdy natężenie ruchu pieszych jest duże i występuje duże prawdopodobieństwo, że będą kolejne zgłoszenia pieszych przed zakończeniem minimalnego sygnału zielonego dla pojazdów  $G_{min}$ .

Pewną wadą sygnalizacji wzbudzanych jest to, że przy niewielkim ruchu pieszych, kierowcy ponoszą dość duże straty czasu z powodu konieczności zapewnienia pieszym czasów ewakuacji w postaci sygnału czerwonego. Pojedynczy piesi wchodzący na początku sygnału zielonego ciągle przechodzą całe przejście w okresie jego trwania i w takim przypadku sygnał migający i czas ewakuacji pozostają niewykorzystane. Stosowane w Wielkiej Brytanii sygnalizacje Pelikan i Tukan umożliwiają ograniczenie tych strat czasu przez: dopuszczenie możliwości zjazdu pojazdów w czasie ewakuacji pieszych, jeśli pieszych nie ma na przejściu (Pelikan) lub dzięki zastosowaniu specjalnej detekcji pieszych, która przy ich braku, kończy fazę dla pieszych i rozpoczyna dla pojazdów. Systemy te wymagają dość wysokiej kultury w relacji kierowca-pieszcy.

W przypadku przejść dla pieszych z szerokim pasem dzielącym możliwe jest zastosowanie jeszcze innego rozwiązania sterowania, tzn.:

### 3. *kaskadowa sygnalizacja wzbudzana dla pieszych*

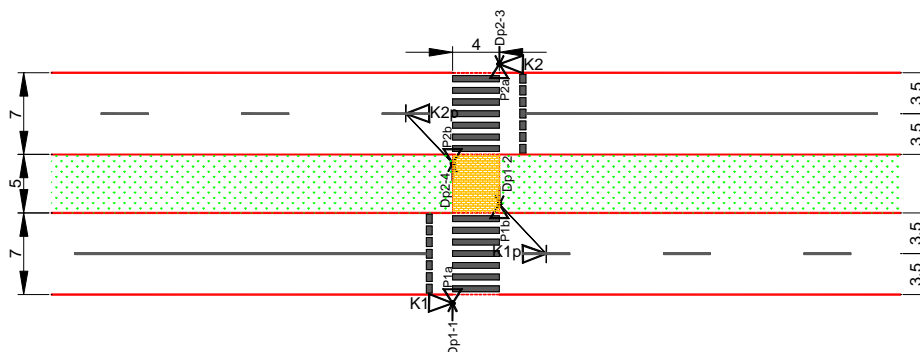
Zasada działania jest podobna jak w przypadku sygnalizacji wzbudzonej z tym, że zamiast przydzielać na obu jezdniach wymagany przepisami sygnał zielony dla pieszych projektuje się czas sygnału zielonego potrzebny do przekroczenia poszczególnych jezdni. Sygnał zielony na jezdni, z której przyjęto zgłoszenie jest przydzielany po zrealizowaniu minimalnego czasu zielonego dla pojazdów i czasie międzyzielonym pojazd-pieszcy a rozpoczęcie nadawania sygnału zielonego dla drugiej jezdni następuje w momencie dojścia pieszego do tej jezdni. Strategia ta wymaga identyfikacji przycisku dla pieszych, z którego pochodzi wzbudzenie dla prawidłowego nadawania sygnału zielonego na poszczególnych jezdniach. Pozwala ona skrócić długość sygnału czerwonego dla pojazdów co powoduje zmniejszenie strat czasu i długości kolejek a pieszym pozwala przejść przez całe przejście bez przypadków zatrzymania pieszych na pasie dzielącym w przypadku wejścia pod koniec sygnału zielonego.

## 3. MODEL I PROGRAM SYMULACYJNY PRZEJSCIE

W celu porównania efektywności w/w przedstawionych strategii sterowania na przejściu dla pieszych z sygnalizacją świetlną opracowano model symulacyjny i program komputerowy PRZEJSCIE.

### 3.1. Model symulacyjny

Do modelowania przyjęto przejście dla pieszych z sygnalizacją świetlną na drodze dwujezdniowej po 2 pasy ruchu a plan sytuacyjny przedstawiono na rys. 2.



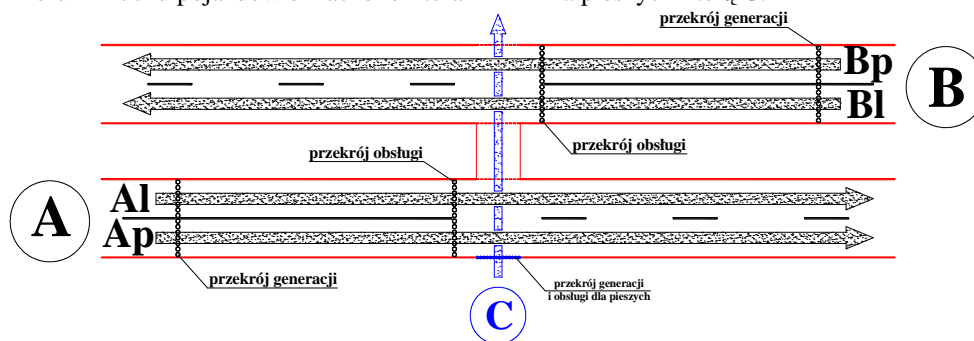
Rys. 2. Plan sytuacyjny przejścia dla pieszych z sygnalizacją świetlną

Założono szerokości pasów ruchu równe 3,5 m a pas dzielący jezdnie o szerokości 5,0 m. Dla pojazdów przyjęto sygnalizatory podstawowe zlokalizowane na słupkach sygnalizacyjnych (K1 i K2) oraz powtarzaczki na wysięgnikach (K1p i K2p). Dla pieszych przyjęto pary sygnalizatorów dla każdej jezdni (P1a i P1b oraz P2a i P2b) oraz przyciski dla pieszych na wszystkich słupkach sygnalizacyjnych (Dp1-1 i Dp1-2 oraz Dp2-3 i Dp2-4). Nie uwzględniono detektorów ruchu dla pojazdów ponieważ w stanie ustalonym zawsze nadawane są sygnały zielone dla pojazdów niezależnie od tego czy jest zapotrzebowanie na ich obsługę.

Mając na uwadze cel budowy modelu przyjęto następujące założenia:

- przejście dla pieszych zlokalizowane jest na terenie zamiejskim z ograniczeniem prędkości przed przejściem do 70 km/h dla obu kierunków,
- potok pojazdów składa się tylko z pojazdów osobowych przy przyjęciu równego obciążenia ruchem obu kierunków oraz równego rozkładu ruchu na pasach,
- na odcinku przed przejściem dla pieszych nie występuje wyprzedzanie pojazdów, jak również nie występuje zmiana wybranego pasa ruchu,
- potok pieszych porusza się tylko w jednym kierunku (natężenie ruchu pieszych w drugim kierunku pominięto aby zwiększyć efekt sterowania kaskadowego).

Odwzorowanie przejścia dla pieszych z sygnalizacją świetlną pokazano na rys. 3. Kierunki ruchu pojazdów oznaczono literami A i B a pieszych literą C.



Rys. 3. Modelowe odwzorowanie przejścia dla pieszych z sygnalizacją świetlną

Opracowywany model należy do mikromodeli symulacyjnych, w których przegląd sytuacji ruchowych zachodzących w obrębie przejścia dla pieszych jest dokonywany metodą „kolejnych zdarzeń” w wyróżnionych przekrojach (generacji i decyzji) i obejmuje także śledzenie zmian w strefach dojazdu do przejścia zajętych przez kolejkę oraz uwzględnia zgłoszenia od pieszych.

W modelu można wyróżnić dwa zasadnicze procesy:

- **proces zgłoszeń** realizujący zarówno generację pojazdów dojeżdżających do przejścia dla pieszych oraz ich przemieszczanie wzdłuż drogi wraz z oczekiwaniem w kolejce pojazdów, gdy ich ruch jest zatrzymywany przez sygnał czerwony jak i generowanie pieszych,
- **proces obsługi** z realizacją przejazdu przez pojazdy znajdujące się w przekrojach decyzji i przejścia pieszych w czasie trwania efektywnego sygnału zielonego.

Przyjęto następujące, ogólne założenia dla *procesu zgłoszeń*:

- zgłoszenia pojazdów i pieszych opisywane są przez odstępy czasu między kolejnymi obiektami,
- pojazdy są generowane dla każdego pasa ruchu z rozkładu wykładniczego przesuniętego w przekroju oddalonym od linii zatrzymań na taką odległość, w jakiej możliwy jest do pominięcia wpływ sytuacji ruchowej przed przejściem na zgłoszenia pojazdów,
- piesi są generowani dla jednego kierunku przechodzenia z rozkładu wykładniczego,
- proces tworzenia kolejki jest warunkowany czasem dołączenia kolejnego pojazdu do końca kolejki oraz momentem ruszenia ostatniego pojazdu z kolejki,
- pojazdy zmieniają swoją pozycję w kolejce ruszając z opóźnieniem  $\gamma$  w stosunku do pojazdu poprzedzającego.

Założenia dla *procesu obsługi* są następujące:

- program sygnalizacji dla pojazdów odwzorowany jest przez efektywne sygnały zielony i czerwony,
- przejazd pojazdów przez linię zatrzymań odbywa się w czasie nadawania efektywnego sygnału zielonego,
- zjazd pojazdów z kolejki powstałej na sygnale czerwonym realizowany jest z odstępami czasu  $\Delta t$ ,
- obsługa pieszych odbywa się w czasie sygnału zielonego ciągłego i migającego,
- przydzielanie sygnału zielonego dla pieszych uzależnione jest od przyjętej strategii sterowania:
  - dla sygnalizacji stałoczasowej przydzielanie sygnału zielonego następuje cyklicznie z okresem równym długości cyklu o długości zapewniającej przejście przez całe przejście,
  - dla sygnalizacji wzbudzonej przydzielanie sygnału zielonego następuje po zgłoszeniu wzbudzenia przez pieszego ale nie wcześniej niż po realizacji minimalnego sygnału zielonego dla pojazdów o długości zapewniającej przejście przez całe przejście,
  - dla sygnalizacji wzbudzonej kaskadowej przydzielanie sygnału zielonego następuje po zgłoszeniu wzbudzenia przez pieszego ale nie wcześniej niż po realizacji minimalnego sygnału zielonego dla pojazdów o długości zapewniającej przejście przez poszczególne jezdnie.

Model matematyczny dla modelu przejścia dla pieszych opracowano w postaci schematu blokowego, który ułatwia zarówno realizację jego implementacji komputerowej, jak i przeprowadzenie etapu testowania modelu.

### 3.2. Program symulacyjny PRZEJSCIE

Do opracowania programu komputerowego wykorzystano język programowania wyższego rzędu FORTRAN 95. Zastosowanie języka FORTRAN wynikało z dobrej jego znajomości przez autora referatu oraz z faktu, że FORTRAN nadal jest szeroko stosowany do rozwiązywania zadań inżynierskich na wyższych uczelniach całego świata i posiada bogate biblioteki oprogramowania. Program komputerowy PRZEJSCIE został napisany z wykorzystaniem języka Compaq Visual Fortran 6.6. Do generowania odstępów czasu pomiędzy pojazdami i pieszymi zastosowano generatory liczb losowych znajdujące się w bibliotece matematycznej IMSL.

Program komputerowy PRZEJSCIE ma program główny i 4 podprogramy typu SUBROUTINE do generowania odstępów czasu dla potoku pojazdów i pieszych oraz obsługi kolejek pojazdów na poszczególnych pasach ruchu i obliczeń wyników symulacyjnych. Program źródłowy liczy 832 linie a program wykonywalny EXE 639 KB. Dane do programu umieszczone są na dysku w postaci pliku ASCII o rozszerzeniu TXT. Program po uruchomieniu wczytuje te dane i przystępuje do obliczeń symulacyjnych.

Program tworzy plik z echem danych w celu sprawdzenia poprawności ich odczytania przez program oraz plik z wynikami obliczeń symulacyjnych o nazwie WYNIKI.TXT zawierający dla każdej z 3 strategii sterowania następujące parametry:

- liczbę obsłużonych pojazdów i pieszych w czasie symulacji,
- sumaryczne straty czasu pojazdów i pieszych,
- średnie straty czasu na pojazd i pieszego,
- liczba zatrzymanych pojazdów i pieszych,
- wskaźnik zatrzymań dla pojazdów i pieszych,
- kolejka maksymalna dla pojazdów.

Wyniki dla pojazdów dotyczą poszczególnych pasów ruchu, kierunków i wszystkich pojazdów.

## 4. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

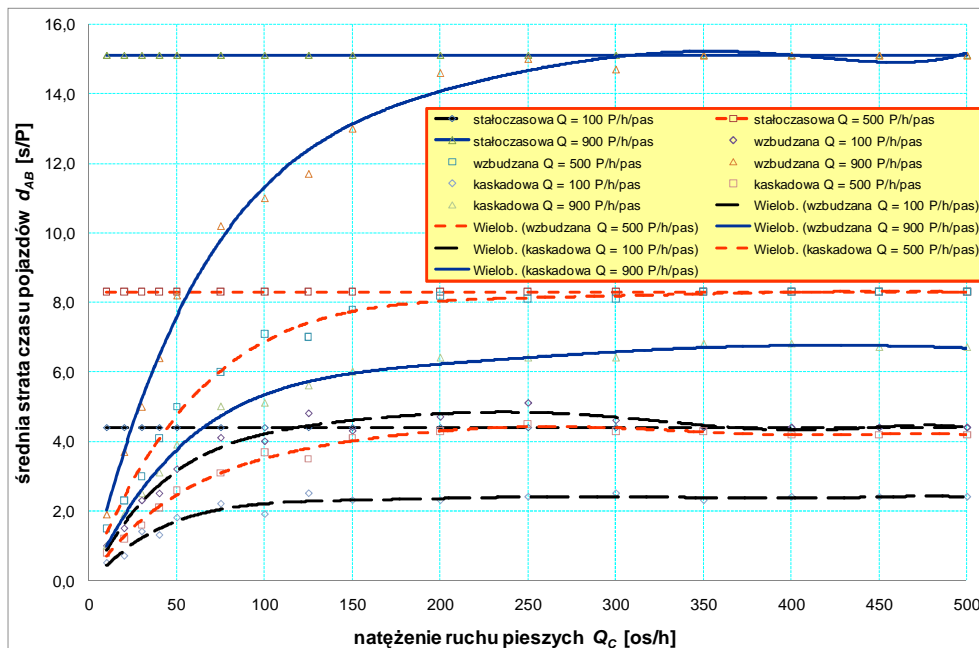
Wykorzystując opracowany program symulacyjny PRZEJSCIE wykonano serię obliczeń mających na celu zbadanie wpływu różnych strategii sterowania na efektywność przejścia dla pieszych z sygnalizacją świetlną. Przez efektywność rozumie się średnie straty czasu ponoszone przez pojazdy i pieszych, które są podstawowym kryterium oceny poziomów swobody ruchu stosowanym w inżynierii ruchu. Dodatkowym parametrem jest wskaźnik zatrzymań, który podaje udział pojazdów/pieszych ponoszących straty czasu w całkowitym potoku ruchu pojazdów/pieszych.

Efektywność strategii sterowania zależy od wzbudzeń pochodzących od pieszych przyciskających przycisk na słupku sygnalizacyjnym dlatego też analizy objęły badanie zmienności parametrów potoków pojazdów i pieszych od natężenia ruchu pieszych  $Q_C$  [os/h]. Obliczenia symulacyjne zostały wykonane dla następujących wartości danych wejściowych:

- natężenie pojazdów 100, 500 i 900 P/h/pas (na wszystkich pasach ruchu założono taką samą wartość natężenia ruchu),

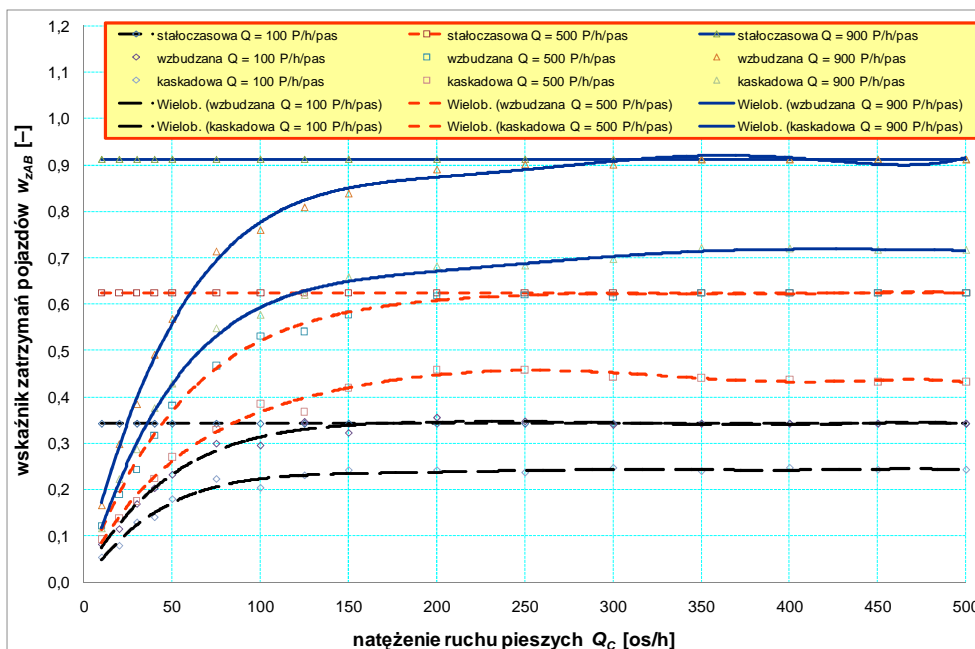
- natężenie pieszych zmieniano w zakresie  $10 \div 500$  os/h z krokiem 10, 25 i 50 os/h,
- parametry programu sygnalizacji dla analizowanych strategii sterowania:
  - dla sygnalizacji stałoczasowej długość cyklu  $T = 60$  s przy długościach sygnału zielonego dla pojazdów  $G = 34$  s i pieszych  $G_p = 14$  s,
  - dla sygnalizacji wzbudzonej przyjęto minimalną długość sygnału zielonego dla pojazdów  $G_{min} = 34$  s a długość sygnału zielonego dla pieszych  $G_p = 14$  s,
  - dla sygnalizacji wzbudzonej kaskadowej przyjęto minimalną długość sygnału zielonego dla pojazdów  $G_{min} = 34$  s a długość sygnału zielonego dla pieszych  $G_{pA} = 5$  s dla jezdni na kierunku A oraz  $G_{pB} = 6$  s dla jezdni na kierunku B z opóźnieniem 8 s w stosunku do sygnału zielonego na kierunku A,
- pozostałe parametry miały wartości defaultowe i nie były zmieniane w czasie obliczeń symulacyjnych.

Na rys. 4 przedstawiono zależności średnich strat czasu pojazdów  $d_{AB}$  od natężenia ruchu pieszych  $Q_C$  dla 3 poziomów natężeń ruchu pojazdów i 3 wybranych strategii sterowania a na rys. 5 podobne zależności dla wskaźnika zatrzymań  $w_{zAB}$ . Uzyskane zależności dla obu badanych parametrów mają podobny przebieg i są zgodne z teorią inżynierii ruchu.



Rys. 4. Zależność średnich strat czasu pojazdów  $d_{AB}$  od natężenia ruchu pieszych  $Q_C$  dla różnych natężeń pojazdów oraz analizowanych strategii sterowania



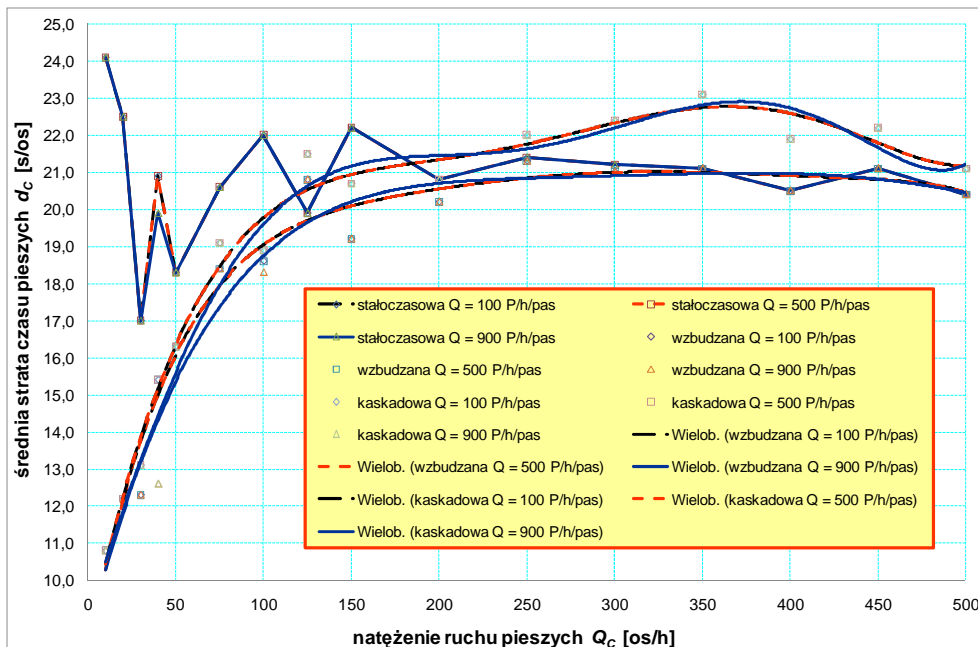


Rys. 5. Zależność wskaźnika zatrzymań pojazdów  $w_{zAB}$  od natężenia ruchu pieszych  $Q_C$  dla różnych natężeń pojazdów oraz analizowanych strategii sterowania

Uzyskane wyniki dla przyjętych danych pozwalają stwierdzić, że:

- dla sygnalizacji stałoczasowej średnie straty czasu  $d_{AB}$  (wskaźnik zatrzymań  $w_{zAB}$ ) nie zależą od natężenia ruchu pieszych i zmieniają się od 4.4 s/P (0.342) dla  $Q_{AB} = 100$  P/h/pas do 15.2 s/P (0.912) dla  $Q_{AB} = 900$  P/h/pas,
- dla sygnalizacji wzbudzonej oba parametry ( $d_{AB}$  i  $w_{zAB}$ ) wzrastają od 0 przy braku pieszych (brak wzbudzeń) do wartości osiąganych przy sygnalizacji stałoczasowej (asymptotycznie) – dla natężeń pieszych  $Q_C > 350$  os/h wartości średnich strat czasu i wskaźnika zatrzymań są identyczne jak przy sygnalizacji stałoczasowej,
- dla sygnalizacji acyklicznej oba parametry ( $d_{AB}$  i  $w_{zAB}$ ) mają podobny przebieg jak dla sygnalizacji wzbudzonej z tą różnicą, że dla natężeń pieszych  $Q_C > 350$  os/h wartości średnich strat czasu osiągają poziom rzędu 55% ÷ 45% wartości przy sygnalizacji stałoczasowej a wskaźnik zatrzymań osiąga poziom rzędu 69% ÷ 79% wartości przy sygnalizacji stałoczasowej.

Wpływ natężenia ruchu pieszych  $Q_C$  na średnie straty czasu pieszych  $d_C$  przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Zależność średnich strat czasu pieszych  $d_C$  od natężenia ruchu pieszych  $Q_C$  dla różnych natężeń pojazdów oraz analizowanych strategii sterowania

Wyniki potwierdziły brak wpływu natężeń ruchu pojazdów na straty czasu pieszych. Badania symulacyjne pokazały, że dla przyjętych parametrów średnie straty czasu pieszych  $d_C$  osiągają poziom  $20 \div 23$  s/os. Dla sygnalizacji stałoczasowej są one praktycznie niezależne od natężenia pieszych. Dla sygnalizacji wzbudzonej i kaskadowej krzywe mają prawie identyczny przebieg i rosną od 0 przy braku pieszych do poziomu około 21 s/os dla natężenia pieszych 200 os/P.

## 5. WNIOSKI KOŃCOWE

Przeprowadzone badania symulacyjne na opracowanym programie komputerowym PRZEJSCIE pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- opracowany model symulacyjny i jego implementacja komputerowa PRZEJSCIE odwzorowująca przejście dla pieszych z sygnalizacją świetlną na zamiejskich drogach dwujezdniowych z pasem dzielącym pomimo przyjętych uproszczeń modelowych jest użytecznym narzędziem wykorzystywanym przy analizach efektywności strategii sterowania sygnalizacją.
- najprostsza strategia sterowania jaką jest *sygnalizacja stałoczasowa* generuje stałe straty czasu pojazdów niezależnie od natężenia ruchu pieszego ponieważ sygnał zielony dla pieszych jest przydzielany w każdym cyklu nawet jeżeli brak jest pieszych,
- najczęściej stosowana w Polsce strategia sterowania, tzn. *sygnalizacja wzbudzana* pozwala zmniejszyć straty czasu pojazdów w przypadku niewielkich natężeń ruchu pieszego (granicznie do 0 przy braku pieszych) – przy wyższych natężeniach ruchu pieszego straty czasu są zbliżone (od około 200 os/P dla przeprowadzonych analiz) a

powyżej pewnego poziomu (około 350 os/P dla przeprowadzonych analiz) są identyczne ze stratami czasu otrzymanymi dla sygnalizacji stałoczasowej.

- większe korzyści może dać *sygnalizacja kaskadowa*, która dzięki skróceniu czasu zatrzymywania potoków pojazdów na poszczególnych kierunkach oprócz zalet sygnalizacji wzbudzonej pozwala osiągnąć dwukrotnie mniejsze straty czasu w porównaniu z sygnalizacją stałoczasową – przy bardziej wyrównanym rozkładzie kierunkowym pieszych efektywność tej strategii może być mniejsza,
- uzyskane wyniki pozwalają rekomendować do stosowania na zamiejskich przejściach dla pieszych *wzbudzaną sygnalizację kaskadową*, która jest efektywniejsza od sygnalizacji wzbudzonej – stosowanie tej strategii wymaga identyfikacji przycisku dla pieszych, z którego pochodzi wzbudzenie aby prawidłowo przydzielić sygnał zielony dla pieszych przy przechodzeniu przez poszczególne jezdnie,

Możliwości programu komputerowego PRZEJSCIE można rozszerzyć poprzez jego rozbudowę o następujące elementy wierniej odwzorowujące rzeczywiste warunki oraz umożliwiające badanie bardziej zaawansowanych strategii sterowania:

- ◆ zamodelowanie ruchu kolumnowego przy generowaniu pojazdów w przekrojach generacji,
- ◆ uwzględnienie struktury rodzajowej pojazdów i różnych prędkości jazdy tych pojazdów,
- ◆ dodanie drugiego kierunku dopływu pieszych oraz uwzględnienie zjawiska grupowania pieszych (przybywanie 2, 3 lub więcej osób równocześnie),
- ◆ dodanie możliwości detekcji pojazdów oraz pieszych (wykrywanie pieszego przed i na przejściu dla pieszych) pozwalające badać różne strategie sterowania.

## 6. LITERATURA

- [1] *Szczegółowe warunki techniczne dla sygnałów drogowych i warunki ich umieszczenia na drogach*. Załącznik nr 3 do Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 3.07.2003 r. Dz. U. nr 220, poz. 2181 z dnia 23.12.2003 r.
- [2] Gaca S., Suchorzewski W., Tracz M.: *Inżynieria ruchu drogowego. Teoria i praktyka*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2008.