

## MODEL SYMULACYJNY ZWĘŻENIA DROGI DWUPASOWEJ DWUKIERUNKOWEJ

W przypadku zajęcia pasa ruchu na drodze dwupasowej dwukierunkowej najczęściej wprowadza się ruch wahadłowy umożliwiający przejazd pojazdów na zmianę po zwężonym odcinku drogi. Dla zapewnienia sprawnego i bezpiecznego przebiegu takiego ruchu stosuje się oznakowanie odcinka zwężenia znakami drogowymi lub sygnalizacją świetlną (stałoczasową lub akomodacyjną). Wybrany sposób sterowania ruchem na zwężeniu powinien zapewnić odpowiednią przepustowość oraz minimalne straty czasu pojazdów. Użytecznym narzędziem w poszukiwaniu optymalnego sterowania ruchem na zwężeniu drogowym będzie model symulacyjny. W referacie przedstawiono model matematyczny, jego implementację komputerową oraz wstępne wyniki badań empirycznych natężeń nasycenia. Szczegółowo przedstawiono elementy procesów w modelu symulacyjnym: procesu zgłoszeń, procesu obsługi i procesu formowania kolejki oraz omówiono uwarunkowania sterowania na zwężeniu. Przedstawiono sposób odwzorowania losowości potoku ruchu w modelu przez zastosowanie generatorów liczb losowych. Program komputerowy jest obecnie w fazie testowania. Budowany model symulacyjny będzie wykorzystany do analiz efektywności zwężenia drogowego dla wypracowania zaleceń metodologicznych dla sterowania ruchem w ruchu wahadłowym, w ramach projektu wykonywanego przez konsorcjum kilku uczelni w programie RID-I/50.

### WSTĘP

W ramach programu RID-I/50 (Rozwój Innowacji Drogowych) konsorcjum pracowników kilku uczelni (**konsorcjum naukowe OT2-2B/PK-PW-PG**) opracowuje projekt „**Nowoczesne metody obliczania przepustowości i oceny warunków ruchu dla dróg poza aglomeracjami miejskimi, w tym dla dróg szybkiego ruchu**” (umowa nr DZP/RID-I-50/9/NCBR/2016 z dnia 26.02.2016 r.). Logo programu RID oraz projektu badawczego przedstawiono na rys. 1. Celem projektu jest aktualizacja metod oceny warunków ruchu i szacowania przepustowości dla dróg zamiejskich z uwzględnieniem metod HCM-2010 i HBS 2015 oraz najnowszych opublikowanych w literaturze badań. Metody obejmą odcinki autostrad, dróg ekspresowych, wielopasowych i dwupasowych dwukierunkowych (1 x 2) oraz dróg 2 + 1. Ich integralnymi elementami będą: metoda ustalania natężeń miarodajnych do wykonywania analiz warunków ruchu oraz metody obliczeniowe dla węzłów drogowych i zwężeń drogowych z sygnalizacją, występujących na drogach 1 x 2. Metody uwzględnią będą Lokalne Ograniczenia Przepustowości (LOP) występujące na sieci drogowej, które mogą wynikać z przyczyn ruchowych oraz infrastrukturalnych. W projekcie rozpoznane zostaną przyczyny powstawania LOP, ich klasyfikacja oraz opracowany zostanie katalog metod przeciwdziałania ich powstawaniu oraz łagodzeniu ich skutków w zarządzaniu ruchem (KSZR). Opracowane zostaną również wytyczne do budowy i kalibracji mikrosymulacyjnych modeli ruchu.



Rys. 1. Logo: a. programu RID i b. projektu badawczego DZP/RID-I-50/9/NCBR/2016

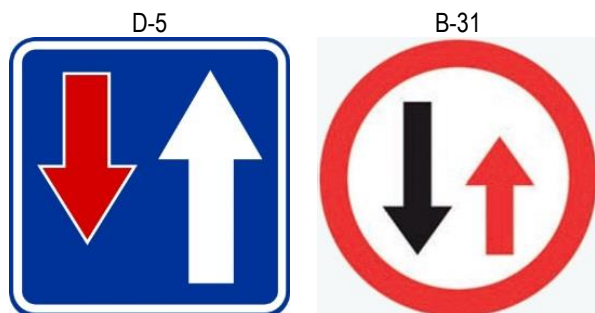
W projekcie podjęty został m.in. problem zwężeń drogowych na drogach 1 x 2, sterowanych sygnalizacją świetlną, który nie jest uprządkowany w skali kraju. Obserwuje się znaczne problemy ruchowe w tego typu miejscach (LOP) w sieci drogowej, które często wynikają ze źle dobranych parametrów sterowania w stosunku do natężeń ruchu i długości odcinka robót. W [1] podano schematy oznakowania i zabezpieczenia robót z ruchem wahadłowym. Niestety, zawarto w nim jedynie ogólne informacje na temat długości sygnałów świetlnych. Publikacje i program symulacyjny „ZWĘŻENIE” [2, 3] powstałe w latach 80-tych, jako jedyne wskazywały na specyfikę i potrzeby wynikające z tego typu sterowania. Obowiązujący Dziennik Ustaw nr 220 [4] i metoda MOP-SZS-04 [5] nie obejmują tego typu zagadnień. Brakuje wyraźnych zaleceń metodologicznych w skali całego kraju, co do projektowania zwężeń drogowych sterowanych sygnalizacją świetlną na drogach krajowych. W wielu krajach problem jest w zasadzie rozwiązany. Powstało wiele instrukcji kompleksowo rozwiązujących problem robót drogowych na tego typu drogach. Przykładem jest obszerna instrukcja brytyjska [6] ale nie przystaje ona do realiów polskich. W celu eliminacji niekorzystnego wpływu miejsc występowania LOP (czasowe zwężenia jezdni, roboty drogowe) na przepustowość i warunki ruchu pojazdów, w ramach programu RID powstanie instrukcja projektowania tymczasowej sygnalizacji świetlnej przy prowadzeniu robót drogowych. Instrukcja obejmie projektowanie sygnalizacji zmiennoczasowej i stałoczasowej dla ruchu wahadłowego. Prawidłowe przyjęcie parametrów sterowania w powiązaniu z długością odcinka robót, natężeniem ruchu i potrzebami uczestników ruchu wpłynie na minimalizację niekorzystnego oddziaływania tego typu miejsc na funkcjonowanie sieci drogowej. Z instrukcji wynikać będą również wskazania, co do potrzeb wprowadzania objazdów.

Analizy warunków ruchu i przepustowości zwężeń na drogach 1 x 2 prowadzone będą głównie z wykorzystaniem opracowywanego modelu symulacyjnego i wspomagane uzupełniającymi i weryfikacyjnymi badaniami empirycznymi. Badania empiryczne obejmować będą pół-automatyczną rejestrację przejazdów pojazdów na sygnale zielonym, parametrów sterowania, struktury rodzajowej ruchu oraz mierników warunków ruchu w powiązaniu z badaniami ankietowymi

kierujących pojazdami, co do odczuć jakości funkcjonowania badanego zwężenia drogowego.

W przypadku prowadzenia robót drogowych w pasie drogowym najczęściej występuje zwężenie przekroju jezdni skutkujące zakłóceniem płynności jazdy oraz pogorszeniem bezpieczeństwa użytkowników drogi. W przypadku dróg dwupasowych dwukierunkowych zajęcie jednego pasa ruchu wymusza zastosowanie następujących rozwiązań organizacji ruchu:

- 1) kierowanie ruchem przez przeszkolony personel,
- 2) znaki drogowe D-5 i B-31 (rys. 2),



**Rys. 2.** Znaki drogowe stosowane na zwężeniu drogowym: D-5 „Pierwszeństwo na zwężonym odcinku drogi” i B-31 „Pierwszeństwo dla nadjeżdżających z przeciwnika”

- 3) sygnalizacja tymczasowa (akomodacyjna/stałoczasowa) (rys. 3),



**Rys. 3.** Sygnalizatory stosowane przy sterowaniu sygnalizacją świetlną na zwężeniu drogowym

- 4) objazd wraz z czasowym zamknięciem remontowanego odcinka drogi.

Właściwa organizacja ruchu na zwężonych do jednego pasa ruchu odcinkach ma istotne znaczenie dla bezpiecznego i płynnego przebiegu ruchu. Wybrany sposób organizacji powinien zapewnić odpowiednią przepustowość oraz minimalizować straty czasu pojazdów.

W przypadku zastosowania sygnalizacji tymczasowej dla odcinka z ruchem wahadłowym dłuższego niż 50 m przy znacznej zmienności obciążenia ruchem danego fragmentu drogi w dobie, obowiązkowe jest stosowanie detekcji ruchu w celu dostosowania dłu-

gości sygnałów zielonych do rzeczywistych potoków pojazdów dojeżdżających do zwężenia. Pozwala to uniknąć tworzenia się długich kolejek pojazdów na sygnale czerwonym podczas gdy na przeciwnym kierunku część sygnału zielonego pozostaje niewykorzystana z powodu braku pojazdów zgłaszających się do obsługi – przypadki takie mają miejsce przy sterowaniu stałoczasowym i znacznych wahań natężeń ruchu potoków dojeżdżających do zwężenia. Ze względów praktycznych powinno się stosować detektory niewymagające wbudowania w nawierzchnię (np. wideodetektory czy detektory radarowe).

Analizę warunków ruchu na zwężeniu można wykonać przy pomocy komputerowego programu symulacyjnego ZWEZENIE [3], który umożliwia porównanie efektywności sterowania znakami i sygnalizacją świetlną wprowadzając jako dane długość zwężenia i natężenia ruchu na obu kierunkach oraz parametry procesów zgłoszeń i obsługi dla samochodów osobowych i pojazdów ciężkich. Podstawową wadą programu jest brak możliwości analiz dla akomodacyjnego programu sygnalizacji świetlnej, co obecnie jest zalecane i coraz powszechniej stosowane.

W referacie zostanie przedstawiony model symulacyjny zwężenia ze szczególnym omówieniem modułu sterowania akomodacyjnego przy różnych strategiach sterowania. Zaprezentowany model ma opracowaną implementację komputerową, która obecnie jest w fazie testowania. Efektywność różnych strategii sterowania reprezentowana m.in. przez średnie straty czasu  $d$  [s/P], liczbę pojazdów zatrzymujących się  $I_{pzat}$  [P] i kolejki maksymalne  $k_{max}$  [P] dla każdego kierunku i dla przekroju będzie mogła być przedstawiona na jednej z kolejnych konferencji.

## 1. MODEL MATEMATYCZNY ZWĘŻENIA

### 1.1. Wprowadzenie

Jak już wcześniej wspomniano jednym z celów projektu badawczego jest opracowanie modelu matematycznego i jego implementacji komputerowej, jako narzędzia do badania sprawności zwężenia dróg dwupasowych dwukierunkowych z ruchem wahadłowym.

Obecnie, gdy techniki komputerowe są podstawowym narzędziem i warsztatem pracy inżyniera, nie może dziwić fakt, że symulacja komputerowa znalazła szerokie zastosowanie w badaniach procesów ruchu drogowego, z których wiele to złożone procesy stochastyczne. Modelowanie numeryczne będzie również wykorzystywane w opracowywanym projekcie badawczym. Za zastosowaniem tego narzędzia przemawiają także następujące przesłanki:

- duże trudności i w wielu przypadkach nierealność realizacji eksperymentów badawczych na poligonach rzeczywistych,
- nierealność kompleksowej rejestracji parametrów określających przebieg i warunki ruchu na zwężeniach dróg o ruchu regulowanym za pomocą oznakowania drogowego lub stałoczasową/akomodacyjną sygnalizacją świetlną,
- ograniczenia czasowe, personalne, sprzętowe i finansowe,
- korzyści płynące z symulacji komputerowej, a wśród nich możliwości modelowania systemu dynamicznego, jakim jest ruch drogowy, możliwości określenia wpływu parametrów ruchu oraz parametrów sterowania na przepustowość i warunki ruchu, możliwości badania mierników jakości ruchu oraz badania prognozowanych sytuacji ruchowych.

Opracowywany model symulacyjny jest wynikiem identyfikacji procesów ruchu na obiektach drogowych. Szczególny nacisk w procesie identyfikacji położono na odwzorowanie niestacjonarności dopływających strumieni. Niestacjonarność dopływających strumieni utożsamiana jest ze zmiennością w czasie intensywności potoków ruchu, definiowanej jako wartości oczekiwanej chwilowego natężenia ruchu.

W modelu można wyróżnić trzy procesy:

- proces zgłoszeń realizujący zarówno generację pojazdów dojeżdżających do odcinka zwężonego oraz ich przemieszczanie wzdłuż odcinków dojazdowych z rejestracją w miejscach lokalizacji detektorów i oczekiwaniem w kolejce pojazdów, gdy brak jest możliwości przejazdu przez odcinek zwężony,
- proces obsługi związany z podejmowaniem decyzji o przejeździe przez zwężony odcinek drogi przez pojazdy znajdujące się w przekrojach decyzji (stanowiskach obsługi),
- proces obsługi kolejki realizujący zjazdy pojazdów z kolejki powstałej przed zwężonym odcinkiem drogi.

Opracowywany model należy do mikromodeli symulacyjnych, w których przegląd sytuacji ruchowych zachodzących w obrębie zwężenia drogowego jest dokonywany metodą „kolejnych zdarzeń” w wyróżnionych przekrojach (generacji, detekcji i decyzji) i obejmuje także śledzenie zmian w strefach dojazdów do odcinka zwężonego zajętych przez kolejkę. Należy jeszcze podkreślić, że model symulacyjny nie należy do kategorii tzw. „czarnej skrzynki” (ang. black box), dla której system opisuje się ogólnymi formułami analitycznymi lub empirycznymi, lecz stanowi możliwie wierne (stosownie do celów budowy modelu) odwzorowanie procesów ruchu zachodzących na zwężeniu drogowym w postaci numerycznej (analogicznie jak model fizyczny stanowi odzwierciedlenie rzeczywistego systemu w mniejszej skali). Z tego powodu model posiada znaczną liczbę parametrów wejściowych i charakteryzuje się wykorzystaniem generatorów liczb pseudolosowych dla odwzorowania losowych procesów zachodzących na zwężeniach drogowych, a wynikających m.in. z udziału w procesie ruchu człowieka, którego reakcje na zaistniałą sytuację ruchową nie udaje się opisać w sposób zdeterminowany. Należy ponadto podkreślić stały rozwój istniejących modeli symulacyjnych wynikający głównie:

- ze zdobywanych doświadczeń w eksploatacji dostępnych numerycznych i analitycznych modeli ruchu,
- z prowadzenia systematycznych identyfikacyjnych badań empirycznych wybranych elementów procesów ruchu na elementach sieci drogowej, w tym na skrzyżowaniach z akomodacyjną sygnalizacją świetlną,
- ze stałego wzrostu możliwości obliczeniowych dostępnych maszyn cyfrowych i rozwoju kompilatorów języków programowania.

Model symulacyjny wymaga weryfikacji pod względem poprawności funkcjonowania modelowanego systemu oraz uzyskiwanych wyników. Na etapie modelowania prowadzone są żmudne, ręczne badania weryfikacyjne z wykorzystaniem odpowiednio przygotowanych testów sprawdzających, uwzględniających występowanie najbardziej typowych sytuacji ruchowych na zwężeniu drogowym. Umożliwiają one wyeliminowanie większości błędów modelowych i programowych. Opracowany program komputerowy jest aktualnie sprawdzany z wykorzystaniem tych testów. Z uwagi na złożoność, stochastyczny, niestacjonarny charakter oraz wzajemne powiązania procesów ruchu na zwężeniu drogowym przeprowadzana jest weryfikacja procesów cząstkowych oraz planowane jest dokonanie porównania najistotniejszych wyników końcowych symulacji (straty czasu, zatrzymania czy kolejki) z wynikami badań empirycznych, wynikami obliczeń według formuł stosowanych w metodach zagranicznych oraz z wynikami badań symulacyjnych innych autorów. Planowane jest również przeprowadzenie analizy czułości wyników symulacji na zmiany poszczególnych parametrów modelu ruchu mające na celu ewentualne wyeliminowanie parametrów, które mają znikomą wpływ na wyniki i wyznaczenie parametrów decydujących o wynikach symulacji, które powinny być szczególnie starannie pomierzone lub dobrane.

Do opracowania programu komputerowego wykorzystano język programowania wyższego rzędu FORTRAN [7]. Zastosowanie tego języka wynikało z dobrej jego znajomości przez współautora projektu

badawczego (był to główny język programowania na dużych komputerach) oraz z faktu, że FORTRAN nadal jest szeroko stosowany do rozwiązywania zadań inżynierskich na wyższych uczelniach całego świata i posiada bogate biblioteki oprogramowania.

Na opracowanie własnego modelu symulacyjnego zdecydowano się pomimo istnienia i wykorzystywania wielu programów symulacyjnych potoków ruchu w sieciach drogowych, w tym programu PTV VISSIM. Wynika to z następujących przesłanek:

- pomimo dużych możliwości kodowania różnych aspektów sieci drogowej, parametrów sterowania i różnych typów pojazdów (np. dla programu VISSIM) użytkownik programu nie ma dostępu do kodu źródłowego, a tym samym nie może wpływać na wybrane parametry sterowania,
- braku możliwości generowania pojazdów i ich atrybutów z wykorzystaniem różnych rozkładów prawdopodobieństwa,
- szczególnie istotnym elementem przy badaniach wpływu wybranych parametrów na sprawność zwężenia drogowego jest powtarzalność przebiegów symulacyjnych przy zastosowaniu w modelu wielu generatorów liczb losowych, a co można uzyskać jedynie w sytuacji, gdy kontroluje się wartości początkowe do generatorów – przez eliminację zmian wyników symulacji na skutek generowania różnych ciągów liczb losowych w kolejnych przebiegach można uzyskać rzeczywisty wpływ zmiany parametru na wyniki symulacji.

## 1.2. Założenia do modelu matematycznego

### Proces zgłoszeń

Proces zgłoszeń realizowany jest oddzielnie dla każdego kierunku dojazdu do zwężenia drogowego niezależnie od sposobu regulacji ruchem (znakami drogowymi lub sygnalizacją świetlną) i obejmuje generowanie pojazdów. Obsługa tych zgłoszeń zależy natomiast od charakteru potoku (strumień priorytetowy lub podporządkowany), realizowanego programu lub algorytmu sterowania oraz obecności lub nie kolejki pojazdów. Przyjęto następujące, ogólne założenia dla procesu zgłoszeń:

- zgłoszenia pojazdów na dojeździe do odcinka zwężonego opisywane są przez odstępy czasu między kolejnymi pojazdami,
- pojazdy są generowane w przekroju oddalonym od linii zatrzymań na taką odległość, w jakiej możliwy jest do pominięcia wpływ sytuacji ruchowej na zwężeniu drogowym na zgłoszenia pojazdów oraz gwarantującej położenie poza strefą detekcji,
- dla pojazdów intensywność procesu zgłoszeń w okresie obliczeń może być zadawana jako stała lub w postaci funkcyjnej zależności od czasu (w postaci funkcji skokowej),
- pojazdy przejeżdżają pomiędzy przekrojem generacji a przekrojem obsługi z różnymi prędkościami, co może prowadzić do grupowania się pojazdów na dojeździe do zwężenia,
- w strumieniu ruchu rozróżnia się samochody osobowe i pojazdy ciężkie (samochody ciężarowe i autobusy),
- w czasie przebywania w systemie nie zmieniają się raz przypisane pojazdom atrybuty: rodzaj, prędkość oraz indywidualny graniczny odstęp czasu (generowany dla pojazdów z podporządkowanego kierunku).

Zgłoszenia pojazdów generowane są przez stochastyczne procesy poissonowskie; jednorodne i niejednorodne, oraz specjalne procedury kreujące kolumny pojazdów w dopływającym strumieniu. W modelu wyróżnić można następujące rodzaje procesów zgłoszeń, określonych rozkładami odstępów czasu między przybyciami kolejnych pojazdów:

- stacjonarny – bazujący na rozkładzie wykładniczym przesuniętym,
- niestacjonarny – o parametrach rozkładu jw. uzależnionych od czasu rzeczywistego w jakim ten proces zachodzi, z możliwością

realizacji kilku typów zmian intensywności ruchu w czasie – w modelowaniu niestacjonarnego procesu zgłoszeń przyjmuje się krótkie interwały stacjonarności  $t_s$ , o długości do 5 minut, oraz

– z kolumnami pojazdów – tworzonymi w obydwu w.w. procesach za pomocą specjalnej procedury przemieszczania pojazdów strumienia między kolejnymi przekrojami (model mikroskopowy).

Przepis generowania odstępów czasu, których rozkład odpowiada rozkładowi wykładniczemu przesuniętemu dany jest następującym równaniem:

$$t_o = -[\bar{t}(\tau_i, t_s) - t_{om}] \cdot \ln(r_n) + t_{om} \quad (1)$$

gdzie:

- $\bar{t}(\tau_i, t_s)$  – średni odstęp czasu w strumieniu właściwy interwałowi  $t_s$  rozpoczynającemu się w chwili  $\tau_i$  [s],
- $t_{om}$  – minimalny odstęp czasu między kolejnymi pojazdami w strumieniu [s],
- $r_n$  – ciąg liczb losowych równomiernie rozłożonych w przedziale [0, 1].

Zależnie od długości interwału  $t_s$  przyjęto dwie procedury generowania. W przypadku przedziałów stacjonarności  $t_s$  o długości do kilkudziesięciu sekund, wygenerowany odstęp czasu może być znacznie dłuższy od  $t_s$ . Zasadniczy problem stanowi w tym przypadku zależność średniej intensywności strumienia (będącej równocześnie parametrem rozkładu odstępów czasu) od aktualnie generowanego odstępu czasu między pojazdami. Sposób rozwiązania problemu i odpowiednią procedurę generowania przedstawiono w publikacji [8]. W przypadku, gdy natężenia ruchu i interwały stacjonarności  $t_s$  są duże, prawdopodobieństwo wystąpienia odstępu czasu, znacznie większego od  $t_s$  jest bardzo małe. W tej sytuacji do generowania stosuje się wprost procedurę daną wzorem (1), przyjmując w kolejnym kroku generowania intensywność strumienia właściwą interwałowi  $t_s$ , w którym znalazł się ostatni wygenerowany pojazd. Procedury generowania pozwalają na odwzorowanie niestacjonarnych potoków zgłoszeń o różnych stopniach ograniczenia ich swobody.

Model umożliwia realizację kilku typów zmian intensywności strumienia w czasie:

- według rzeczywistych, empirycznych profili intensywności strumienia,
- według profili parabolicznych, symetrycznych i niesymetrycznych, o różnych stosunkach intensywności maksymalnej do średniej w okresie analizy,
- według profili sinusoidalnych o zadanej liczbie okresów i amplitudzie zmian,
- według dowolnych zadanych profili (w tym spotykanych często potoków ruchu o hiperlosowych wahaniami natężenia).

Po wejściu do systemu (przekroczeniu przekroju generacji) pojazdowi zostają przyporządkowane następujące atrybuty:

- a) rodzaj – generowany według rozkładu równomiernego z uwzględnieniem otrzymanych z badań empirycznych (z ewentualnym uwzględnieniem prawdopodobieństw warunkowych kolejności występowania w potoku ruchu samochodów osobowych i pojazdów ciężkich),
- b) prędkość – reprezentowana przez czas przejazdu między przekrojem generacji i przekrojem obsługi, modelowany rozkładem normalnym (co jest równoznaczne z opisem prędkości pojazdów przez asymetryczny rozkład normalny-transformowany) z parametrami przyjmowanymi odpowiednio dla samochodów osobowych i pojazdów ciężkich:

$$f(v) = \frac{0.4 \cdot L}{v^2 \cdot \sigma_{tp}} \cdot \exp \left[ -\frac{\left( \frac{L}{v} - \bar{t}_p \right)^2}{2 \cdot \sigma_{tp}^2} \right] \quad (2)$$

gdzie:

- $\bar{t}_p$  – średni czas przejazdu odcinka o długości  $L$ ,
- $\sigma_{tp}$  – odchylenie standardowe czasów przejazdu odcinka  $L$ .

Dla pojazdów poruszających się w kolumnie prędkości są jednakowe. Prędkość pojazdu ulega zmianie w sytuacji, gdy poprzedzający go pojazd porusza się z mniejszą prędkością oraz gdy rozważany pojazd dojeżdża do kolejki lub do linii zatrzymań bez możliwości jej przekroczenia (tzn. gdy np. przed odcinkiem zwężonym nadawany jest sygnał czerwony). Uwarunkowania te powodują, że dla strumienia z pojazdami poruszającymi się nieswobodnie, rozkład prędkości ulega zmianie (wzrasta częstość występowania mniejszych prędkości).

- c) w przypadku pojazdu relacji podporządkowanej (dotyczy to pojazdów na kierunku podporządkowanym w przypadku regulacji ruchu znakami drogowymi) generowany jest *indywidualny graniczny odstęp czasu*  $t_g$  determinujący obsługę tego pojazdu. Jest on generowany z rozkładu normalnego obustronnie uciętego z parametrami obliczonymi analitycznie a wartościami zależnymi od długości zwężenia i rodzaju pojazdu przyjęto za [3].

Zgłoszenia pojazdów w przekroju obsługi (na linii zatrzymań) determinowane są: procesem wejścia w system, prędkościami jazdy na odcinku dojazdowym do zwężenia, regulaminem kolejki, stanem sygnałów świetlnych, oraz w przypadku strumieni podporządkowanych – udziałem możliwych do wykorzystania odstępów czasu w strumieniu nadrzędnym. Zgłoszenia na początku strefy detekcji, zlokalizowanej między przekrojem generacji a linią zatrzymań, zależą od ww. parametrów.

## Proces obsługi

Jak już wyżej podano model umożliwia odwzorowanie funkcjonowania zwężenia drogowego o ruchu regulowanym:

- znakami drogowymi oraz
- za pomocą sygnalizacji akomodacyjnej jak również stałoczasowej. Sterowanie stałoczasowe stosowane jest jako specjalny tryb pracy sygnalizacji akomodacyjnej (np. w przypadku przecięcia na dojazdach do zwężenia lub awarii systemu detekcji).

W przypadku zastosowania na zwężeniu drogowym regulacji ruchu znakami drogowymi określającymi pierwszeństwo przejazdu na jednym z kierunków obsługa pojazdów dojeżdżających do zwężenia opiera się na następujących założeniach (za [3]):

- ruch pojazdów odwzorowany jest jako przecinanie się dwóch potoków ruchu wjeżdżających na zwężony odcinek drogi z przeciwnych kierunków,
- każdy pojazd podporządkowany ma przypisany graniczny odstęp czasu  $t_g$ ,
- przejazd odcinka zwężenia przez pojazdy podporządkowane jest uwarunkowany wystąpieniem odpowiednich luk/odstępów czasu w potoku nadrzędnym, tzn. odstęp między pojazdami musi być równy lub większy od granicznego odstępu czasu  $t_g$ ,
- pojazdy podporządkowane przejeżdżają odcinek zwężony wykorzystując luki dyspozycyjne (przejazd bez zatrzymania przed zwężeniem) lub odstęp czasu między pojazdami potoku nadrzędnego (przejazd z zatrzymaniem w kolejce przed zwężeniem),

- analiza możliwości przejazdu przez odcinek zwężony podejmowana jest w przekrojach obsługi zlokalizowanych na liniach zatrzymań przed zwężeniem,
  - czas przejazdu zwężonego odcinka drogi o długości  $L_{zw}$  wynosi:
    - pojazd kontynuujący przejazd odcinka zwężonego bez zatrzymywania się pokonuje go w czasie  $t_L$ ,
    - pojazd, który zatrzymał się przed wjazdem na zwężony odcinek drogi po otrzymaniu możliwości przejazdu najpierw przyspiesza a następnie kontynuuje przejazd z prędkością dopuszczalną pokonując odcinek zwężenia w czasie  $t_{L_o}$  dla samochodów osobowych i  $t_{L_c}$  dla pojazdów ciężkich,
  - w celu odwzorowania w modelu przypadków wjazdu na zwężenie za pojazdem poprzedzającym wprowadzono parametr  $t_{pp}$ , który jest maksymalnym odstępem czasu pomiędzy pojazdami podporządkowanymi, przy którym pojazd kontynuujący jazdę za pojazdem poprzedzającym wjeżdża na odcinek zwężony polegając na decyzji akceptacji odstępu czasu pojętej przez poprzednika,
  - w przypadku wystąpienia dużego odstępu czasu między pojazdami w potoku nadrzędnym kilka pojazdów z kolejki na kierunku podporządkowanym może przejechać odcinek zwężenia jeden za drugim (tzw. wielokrotne wykorzystanie odstępu czasu) – odstępy czasu pomiędzy pojazdami przekraczającymi linię zatrzymań zostały zróżnicowane dla pierwszych pięciu pojazdów, następnie przejeżdżają już w stałych odstępach czasu,
  - w przypadku występowaniu kolejki pojazdów na kierunku podporządkowanym długiego odcinka zwężonego w przypadku wjazdu na zwężenie pierwszego pojazdu z kolejki kolejne ruszają za nim bez sprawdzania luk dyspozycyjnych, co może spowodować konieczność zatrzymania pojazdów na kierunku nadrzędnym – liczebność grupy pojazdów wjeżdżających za poprzednikiem jest daną wejściową do modelu (badania empiryczne wskazują, czy ma to być zmienna deterministyczna czy losowa),
  - pojazd podporządkowany wykorzystujący odstęp czasu w potoku nadrzędnym rusza z czasem opóźnienia  $t_{op}$  w stosunku do opuszczenia powierzchni kolizji przez pojazd nadrzędny.
- W przypadku sterowania ruchem na zwężeniu drogowym przez sygnalizację świetlną obsługa opiera się na następujących założeniach:
- program sterowania realizowany jest przez rzeczywiste długości sygnałów: zielonego, żółtego i czerwonego (długości sygnałów zielonych i czerwonych są stałe dla sterowania stałoczasowego i zmienne dla sterowania akomodacyjnego),
  - przejazd zwężenia przez pojazd odbywa się podczas sygnału zielonego i w zależności od decyzji kierowcy również sygnału żółtego. Pojazdy z kolejki opuszczają stanowisko obsługi w odstępach  $\Delta t$ , będących zmienną losową o rozkładzie normalnym uciętym, o parametrach determinowanych rodzajem pojazdu i jego pozycją w kolejce. Dla  $\sigma_{\Delta t} = 0$  uzyskuje się deterministyczny proces obsługi pojazdów.
  - w przypadku zastosowania sygnalizacji stałoczasowej przyjęto (za [3]):
    - dwufazowy program sygnalizacji (nie uwzględnia się przypadku występowania dodatkowego wlotu na zwężonym odcinku drogi),
    - czasy międzysygnalowe oraz długości cyklu minimalnego i optymalnego obliczane są z wzorów stosowanych w inżynierii ruchu [9],
    - prędkości ewakuacji przyjmuje się równe prędkości dopuszczalnej na zwężeniu (wynikającej z wprowadzonego znaku B-33) lub kwantylowi 15 % prędkości ewakuacji uzyskanego z pomiarów empirycznych,
    - natężenia nasycenia są danymi wejściowymi i będą przyjmowane na podstawie wartości uzyskanych z badań empirycznych,
  - podział cyklu na fazy jest dokonywany proporcjonalnie do natężeń ruchu potoków dopływających do zwężenia,
  - jest możliwość wprowadzania wszystkich parametrów programu sygnalizacji przez użytkownika, jako danych wejściowych do programu symulacyjnego,
  - w przypadku zastosowania sygnalizacji akomodacyjnej przyjęto:
    - logika sterowania akomodacyjnego obejmuje zadania detektorów, warunki i specyfikę przełączania, włączania i wyłączania sygnałów oraz kasowanie zapisanych zgłoszeń zapotrzebowania na sygnał zielony – algorytm sterowania zawiera m.in. warunki logiczne, określające powiązania parametrów strumienia ruchu (luki czasu pomiędzy pojazdami, czasy zajęcia detektorów, prędkości dojazdu oraz zgłoszenia i zjazdy pojazdów) oraz warunki czasowe, wyznaczające minimalne i maksymalne długości sygnałów zielonych oraz programy przejść między fazami,
    - strefa detekcji obejmuje odcinek przed linią zatrzymań o długości  $l_{zd}$  i pokrywa się z zasięgiem „wirtualnego” detektora wynikającego z zastosowanej metody detekcji (np. wideodetekcja, detektor radarowy, itp.),
    - pojazd wjeżdżający do strefy detekcji zgłasza zapotrzebowanie na sygnał zielony dla kierunku, z którego dojechał i podtrzymuje to zgłoszenie dopóki nie opuści strefy detekcji (przejedzie linię zatrzymań przy sygnalizatorze),
    - realizacja fazy ruchu warunkowana jest wystąpieniem zapotrzebowania na nią, tj. zarejestrowaniem przynajmniej jednego pojazdu w strefie detekcji,
    - minimalna długość sygnału zielonego  $G_{min}$  determinowana jest zarejestrowaną liczbą zgłoszeń od pojazdów dojeżdżających do zwężenia w trakcie nadawania sygnału czerwonego, lecz nie może być większa od długości sygnału potrzebnego na obsługę kolejki mieszczącej się w strefie detekcji,
    - o wydłużeniu aktualnie nadawanego sygnału zielonego decyduje zgłoszone zapotrzebowanie od pojazdu wjeżdżającego do strefy detekcji przypisanej do danej fazy ruchu oraz nie przekroczenie maksymalnego odstępu czasu od poprzedniego zgłoszenia na danym kierunku lub maksymalnej długości sygnału zielonego w danej fazie,
    - długość jednostkowego wydłużenia sygnału zielonego  $\Delta t_{max}$  zależna jest od długości strefy detekcji i powinna umożliwić przejazd przez linię zatrzymań pojazdowi wjeżdżającemu do strefy detekcji (pod warunkiem, że długość sygnału zielonego nie przekroczy wartości maksymalnej  $G_{max}$ ),
    - maksymalna długość sygnału zielonego  $G_{max}$  przyjmowana jest z programu stałoczasowego, jako długość sygnału zielonego dla tej fazy,
    - w przypadku braku zapotrzebowania na sygnał zielony dla obu kierunków dojazdu do zwężenia możliwa jest realizacja jednej z 3 strategii [10]:
      - „all red” (wszystkie czerwone) – na obu kierunkach nadawany jest sygnał czerwony, co umożliwi natychmiastowe przejście do fazy, na którą jest zapotrzebowanie,
      - „preference” (sygnał zielony na kierunku preferowanym, najczęściej o większym natężeniu ruchu) – przy zgłoszeniu na kierunku przeciwnym sygnał zielony może być nadawany po okresie czasu międzysygnalowego (przy dłuższych odcinkach zwężenia może to być nawet kilkanaście sekund),
      - sygnał zielony nadawany na kierunku, na którym zarejestrowano ostatnie zgłoszenie,
    - minimalna długość sygnału czerwonego  $R_{min}$  przyjmowana jako 2 s (część projektantów zaleca stosować  $R_{min} = 5$  s) ma

- zapobiec krótkotrwałemu nadawaniu sygnału czerwonego, co mogłoby być odebrane jako awaria sygnalizacji,
- większość parametrów do strategii sterowania jest obliczana w modelu, ale istnieje możliwość ich wprowadzenia przez użytkownika programu symulacyjnego, jako danych wejściowych do programu symulacyjnego.

## Proces obsługi kolejek

Dla procesu obsługi kolejek przyjęto następujące założenia:

- kolejka może się tworzyć na obu dojazdach do zężenia drogowego – na kierunku nadrzędnym, przy regulacji znakami drogowymi, kolejka tworzy się z pojazdów oczekujących na zwolnienie powierzchni kolizji zajętej przez pojazd z kierunku podporządkowanego, który nieprawidłowo oceniwszy sytuację, wymusił pierwszeństwo przejazdu lub z pojazdów, które nie sprawdzając możliwości przejazdu wjechali na zężenie za poprzednikiem,
- obsługa pojazdów z kolejki odbywa się według najczęściej stosowanej strategii FIFO (First-In, First-Out), czyli zgłoszenia w kolejce są uporządkowane w kolejności przybywania a do obsługi wybiera się kolejno zgłoszenia o najdłuższym czasie oczekiwania,
- zmiana stanu kolejki jest analizowana w momencie ruszenia pojazdu znajdującego się na pierwszym miejscu w kolejce – decyduje, czy kolejny, wygenerowany pojazd dojedzie do końca kolejki, czy też nie, podejmowana jest na podstawie porównania czasu wygenerowania pojazdu dojeżdżającego, powiększonego o czas dojazdu z przekroju generacji do końca kolejki (z uwzględnieniem czasu hamowania)  $t_{dk}$  oraz czasu ruszenia ostatniego pojazdu z kolejki  $t_{rk}$ ,
- długość stanowisk w kolejce jest zmienną losową, zależną od rodzaju pojazdu (samochód osobowy lub pojazd ciężki) i jest generowana z rozkładu o rozkładzie normalnym (po przyjęciu zerowego odchylenia standardowego ma stałą wartość – zmienna deterministyczna),
- pojazdy zmieniają swoją pozycję w kolejce ruszając z opóźnieniem  $t_k$  w stosunku do pojazdu poprzedzającego – przyjmowane w modelu wartości  $t_k$  są zależne od pozycji zajmowanej przez pojazd w kolejce i mogą być opisane przez zmienną losową (rozkład normalny) lub deterministyczną.

## 1.3. Uwarunkowania sterowania na zężeniu

Sygnalizację świetlną na zężeniu drogowym o ruchu wahadłowym wprowadza się w przypadku, gdy nie są spełnione warunki zastosowania znaków drogowych, a więc:

- nie jest zapewniona odpowiednia wzajemna widoczność pojazdów dojeżdżających do zężenia z obu kierunków, a w szczególności, gdy kierowca dojeżdżający z kierunku podporządkowanego nie może ocenić czy odstęp dyspozycyjny/czasu w potoku nadrzędnym może być przez niego zaakceptowany,
- długość odcinka robót przekracza maksymalną dopuszczalną przepisami wartość 150 m dla robót krótko trwających [11].

Innymi przesłankami wymuszającymi zastosowanie sygnalizacji świetlnej na zężeniu drogowym mogą być:

- niewystarczająca przepustowość zężenia drogowego oznakowanego znakami drogowymi,
- niemożność prawidłowej oceny odstępu dyspozycyjnego/czasu w potoku nadrzędnym, zwłaszcza przy dłuższych zężeniach skutkujące wymuszonymi zatrzymaniami pojazdów relacji nadrzędnej,
- zapewnienie bezpieczeństwa przy przejeździe przez zężony odcinek drogi.

W związku ze specyfiką zężenia drogowego przy sterowaniu sygnalizacją świetlną występują następujące uwarunkowania:

- najczęściej jest to sygnalizacja dwufazowa obsługująca na przemian oba potoki dojeżdżające do zężenia drogowego – czasem na odcinku zężenia znajduje się dodatkowy wlot, który musi być obsługiwany w osobnej, trzeciej fazie ruchu,
- przy długich odcinkach zężenia czasu międzyzielone  $t_m$  mogą osiągać wartości kilkunastu sekund, co wynika z:
  - niskiej prędkości ewakuacji wynikającej z wprowadzonego ograniczenia prędkości na zężeniu drogowym oraz zmniejszonej szerokości pasa, która wpływa na ograniczenie prędkości przejazdu zężenia,
  - długiej drogi ewakuacji poza punkt kolizji zlokalizowany poza strefą zężenia,
- poprawne wyznaczenie czasu międzyzielonego  $t_m$  jest istotne z uwagi na bezpieczeństwo i sprawność zężenia drogowego,
- dla uniknięcia znacznego udziału czasu traconego w cyklu (suma czasów międzyzielonych do długości cyklu) stosuje się znacznie większe długości cyklu w porównaniu ze skrzyżowaniami, rzędu 200 s i dłuższe,
- w przypadku sterowania akomodacyjnego należy unikać częstej zmiany faz, bo może się to wiązać z dużymi stratami czasu związanymi z długimi czasami międzyzielonymi – można to osiągnąć przez odpowiedni dobór parametrów sterowania:  $G_{min}$  i  $G_{max}$ .

W publikacji [10] przedstawiono wyniki analiz efektywności sterowania zmiennoczasowego na zężeniu drogowym z wykorzystaniem programu mikrosymulacyjnego PTV VISSIM. Z zaprezentowanych wyników obliczeń autorzy wyciągnęli następujące wnioski:

- badania wpływu wybranych strategii sterowania przy braku wzbudzeń (faza preferowana, pozostawanie w realizowanej fazie oraz all red) na warunki ruchu przy niewielkich natężeniach ruchu (rzędu 200 ÷ 300 E/h) nie wykazały znaczącego wpływu tych strategii na średnie straty czasu – najlepsze warunki uzyskano dla strategii all red a najgorsze dla fazy preferowanej,
- badania efektywności sterowania akomodacyjnego w warunkach dobrej zmienności ruchu dla dwóch rzeczywistych odcinków drogi wykazały, że straty czasu zmalały w zakresie 16 % ÷ 25 % jeżeli zamiast sygnalizacji stałoczasowej zastosowano sygnalizację akomodacyjną (dla długości zężenia równej 100 m oraz maksymalnej długości cyklu równej 200 s).

Wykazana w [10] redukcja kosztów ponoszonych przez kierowców, jaka może być osiągnięta dzięki zastosowaniu sygnalizacji zmiennoczasowej, wskazuje, że nawet w przypadku, gdy sygnalizacja tymczasowa ma funkcjonować tylko przez krótki okres robót drogowych, powinna być stosowana sygnalizacja zmiennoczasowa zamiast stałoczasowej.

Przy założeniu dostosowywania długości sygnału zielonego do potrzeb strumieni ruchu metodą pomiaru luk czasu  $\Delta t$  przez detektor znajdujący się na dojeździe do zężenia, mierzone są odstępy czasu netto między kolejnymi pojazdami strumienia ruchu. Długość sygnału zielonego jest dostosowywana do potrzeb ruchu po upływie minimalnego zadanego czasu trwania sygnału zielonego  $G_{min}$ . Sygnał zielony może być wydłużany do momentu, aż zmierzony odstęp czasu między kolejnymi pojazdami jest większy od zadanego w programie jednostkowego wydłużenia  $\Delta t_{max}$  lub do osiągnięcia wartości maksymalnej długości trwania sygnału zielonego  $G_{max}$ . Jako odstęp czasu, powodujący przerwanie sygnału zielonego, mogą być deklarowane wartości od 2 do 5 s. Wartości powyżej 3 s mogą być deklarowane tylko w wyjątkowych przypadkach, np.: niekorzystnej geometrii dojazdu do zężenia drogowego, dużych spadków podłużnych dojazdów do zężenia lub wysokiego udziału pojazdów ciężkich w ruchu.

Odległość początku „wirtualnego” detektora od linii zatrzymań determinuje minimalną długość wstępną sygnału zielonego  $G_{min}$ . Powinna ona umożliwiać przejazd przez zężenie wszystkim pojazdom,

które znalazły się w strefie detekcji. Minimalna długość sygnału zielonego może być zmieniana na podstawie pomiaru liczby pojazdów, które dojechały do zwężenia w trakcie trwania sygnału czerwonego. Zliczanie pojazdów w okresie sygnału czerwonego jest szczególnie celowe przy niewielkich natężeniach potoków dopływających, dla których niepotrzebna byłaby zbyt długa minimalna wartość sygnału zielonego.

W procedurze wydłużania sygnałów zielonych są uwzględniane tylko te odstępy czasu między zgłoszeniami, które po upływie minimalnej długości sygnału zielonego, osiągną wartość nie większą niż zadeklarowane  $\Delta t_{max}$ . Rejestracja odstępów czasu jest wykonywana na początku „wirtualnego” detektora.

Detektory służą również do rejestrowania zapotrzebowania na sygnał zielony przez pojazdy oczekujące przed linią zatrzymań, które nie zdążyły przejechać na sygnale zielonym. Pozwala to na przejście do fazy obsługującej te pojazdy nawet w przypadku braku dojazdu kolejnych pojazdów na tym kierunku.

Przedstawione wyżej uwarunkowania stanowią przesłanki do zastosowania systemu detekcji na dojazdach do zwężenia z wykorzystaniem detektorów pełniących zarówno funkcje detektorów przejazdu (dynamicznych) jak i obecności (statycznych). Przez *obecność* rozumiane jest znajdowanie się pojazdu w strefie detekcji. Czas *obecności* rozumiany jest, jako czas przebywania uczestnika ruchu w strefie detekcji.

#### 1.4. Model matematyczny zwężenia

Model matematyczny dla modelu zwężenia zdecydowano się przedstawić w postaci schematu blokowego, który ułatwił zarówno opracowanie programu komputerowego, jak i obecnie prowadzonego etapu testowania modelu.

Budowę modelu rozpoczęto od zdefiniowania bloków funkcjonalnych i ich wzajemnego powiązania. Następnie bloki funkcjonalne uszczegóławiano przedstawiając działania w sposób opisowy.

## 2. PROGRAM KOMPUTEROWY ZWEZ\_D2P

Kolejnym etapem pracy było opracowanie implementacji komputerowej modelu matematycznego. Zdecydowano się go nazwać **ZWEZ\_D2P** wykorzystując odpowiednie litery z nazwy modelu – **ZWĘŻENIE Drogi 2-Pasowej** dwukierunkowej.

### 2.1. Język programowania

Mając opracowany model matematyczny w postaci schematu blokowego należało dokonać jego zapisu w języku programowania, aby powstał program komputerowy. Obecnie, gdy na rynku komputerowym istnieje znaczna liczba języków programowania, trudno podjąć decyzję, który z nich byłby najlepszy do napisania programu. Stosunkowo największą popularność ma język C, który zdominował polski rynek oprogramowania. W pracach naukowych wykorzystywane jest często środowisko MATLAB. Autor wybrał ostatecznie język programowania FORTRAN, na co złożyły się następujące przesłanki:

- dobra znajomość języka przez autora (w Katedrze Budowy Dróg i Inżynierii Ruchu od początku lat 80-tych wykorzystywano różne wersje języka FORTRAN do pisania programów komputerowych w ramach prac własnych i naukowo-badawczych),
- możliwość wykorzystania niektórych procedur, opracowanych wcześniej w ramach prac naukowo-badawczych, po ich adaptacji do nowego standardu języka,

- istnieje duża liczba bibliotek gotowych procedur opracowanych w języku FORTRAN, które stanowią istotną pomoc przy programowaniu,
- język FORTRAN jest nadal bardzo popularny w środowisku naukowym całego świata,
- nie ustępuje on innym językom programowania (w tym językowi C) przy tworzeniu nowoczesnego oprogramowania w środowisku Windows.

Program komputerowy ZWEZ\_D2P został napisany z wykorzystaniem języka Compaq Visual Fortran 6.6, który został zakupiony w ramach jednej z prac naukowo-badawczych wykonywanych w IIDIK PK.

### 2.2. Generatory liczb losowych [12]

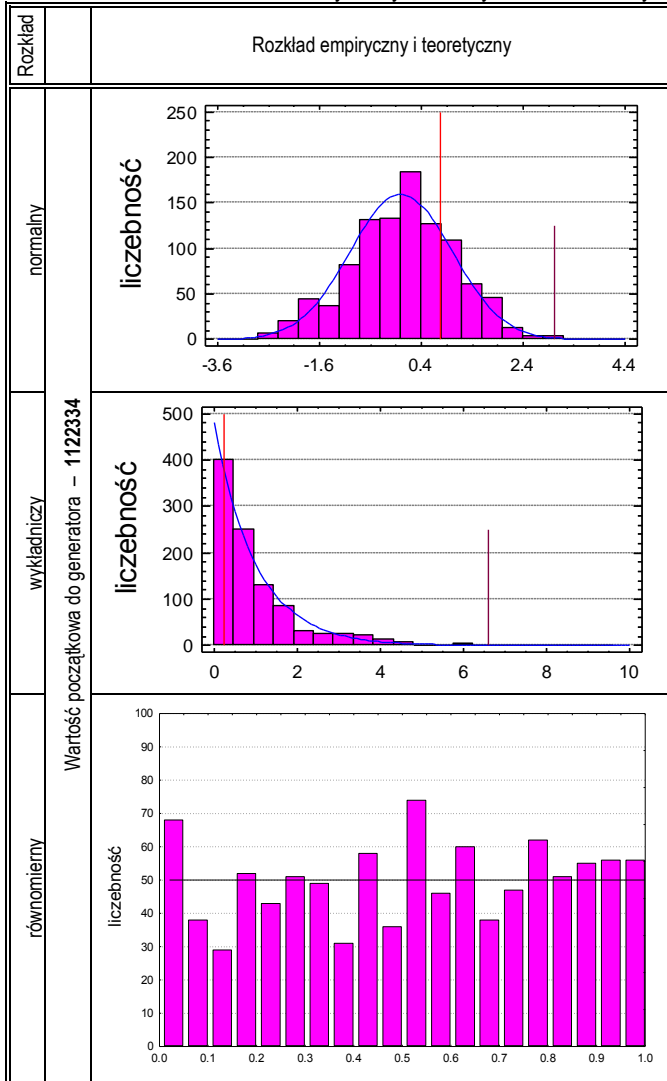
Istotnym elementem modelu jest odwzorowanie losowości procesów ruchu na zwężeniu drogowym, co wiąże się z wykorzystaniem generatorów liczb losowych w programie komputerowym. Razem z kompilatorem języka Compaq Visual Fortran zakupiono biblioteki zawierające bogaty zestaw procedur do obliczeń matematyczno-statystycznych, w tym generatory liczb losowych o różnych rozkładach prawdopodobieństwa. Ostatecznie w programie ZWEZ\_D2P wykorzystano bibliotekę IMSL. Ważnym parametrem, poza parametrami żadanego rozkładu prawdopodobieństwa, jest wartość początkowa do generatora, od której zależy ciąg liczb uzyskanych z generatora oraz uzyskany rozkład.

Dla sprawdzenia zgodności rozkładów zadanych i wygenerowanych liczb losowych przeprowadzono testowanie generatorów przy różnych wartości początkowych. Obejmowały one rozkłady wykorzystywane w modelu matematycznym: normalny, wykładniczy i równomierny. Dobierając odpowiednio wartości początkowe do generatorów liczb losowych dla danych rozkładów uzyskano zestaw wyników odzwierciedlający najlepsze dopasowanie rozkładu dla zadanych wartości początkowych. Zestaw wartości początkowych dających najlepsze dopasowanie rozkładów został zastosowany w programie. Testowanie generatorów objęło zarówno testy parametryczne (test średniej, wariancji i momentów), testy zgodności (Kolmogorowa i chi-kwadrat) jak i testy widmowe (pozwalające wykrywać zależności pomiędzy sąsiednimi elementami ciągu, które nie mają charakteru losowego). W tabl. 1 zamieszczono fragment wyników uzyskanych z testów przy założeniu liczebności próby równej 1000 liczb i 20 przedziałów klasowych oraz znormalizowanych jednostkowych parametrów dla rozkładów.

W programie ZWEZ\_D2P generatory liczb losowych zostały wykorzystane do modelowania:

- procesu zgłoszeń pojazdów (generowanie odstępów czasu pomiędzy kolejnymi pojazdami w przekroju generacji):
  - rozkład wykładniczy przesunięty przy generacji potoku na jednym pasie ruchu,
  - parametry do rozkładu:
    - NAT – natężenie ruchu generowanego potoku,
    - DMIN – minimalny bezpieczny odstęp czasu, jaki może wystąpić między kolejnymi pojazdami jadącymi po jednym pasie ruchu,
    - zmienność natężeń strumieni dopływających w postaci relatywnych intensywności zgłoszeń w zadanych interwałach czasu,
    - IPGW – wartość początkowa do generatora,

**Tab. 1.** Fragment wyników testowanych generatorów liczb losowych o rozkładach: normalnym, wykładniczym i równomiernym



- struktury rodzajowej pojazdów (generowanie rodzaju dla każdego wygenerowanego pojazdu w przekroju generacji – samochód osobowy lub pojazd ciężki):
  - rozkład równomierny z przedziału [0, 1],
  - parametry do rozkładu:
    - C – liczba niemianowana określająca udział pojazdów ciężkich w całkowitym potoku ruchu na danym wlocie,
    - IPGR – wartość początkowa do generatora.
- granicznych odstępów czasu dla kierunku podporządkowanego (generowanie wartości granicznego odstępu czasu dla każdego wygenerowanego pojazdu z kierunku podporządkowanego przy regulacji za pomocą znaków drogowych na zężeniu drogowym):
  - rozkład normalny  $N[\mu, \sigma]$ ,
  - parametry do rozkładu:
    - $\mu$  – wartość średnia granicznego odstępu czasu,
    - $\sigma$  – odchylenie standardowe granicznego odstępu czasu,
    - IPGG – wartość początkowa do generatora.
- czas obsługi pojazdów (generowanie czasów zjazdu pojazdów w przekrojach obsługi – linie zatrzymań):
  - rozkład normalny dla procesu obsługi pierwszych pojazdów zjeżdżających na początku sygnału zielonego,
  - rozkład normalny dla procesu obsługi kolejnych pojazdów zjeżdżających w czasie sygnału zielonego,

- parametry do rozkładu:
  - odpowiednie parametry do rozkładów z uwzględnieniem struktury rodzajowej,
  - IPGTB – wartość początkowa do generatora.

### 2.3. Organizacja programu komputerowego

W implementacji komputerowej wydzielono program główny odpowiedzialny za deklaracje zmiennych, ustawienie wartości początkowych i sterujących oraz współpracę pomiędzy opracowanymi podprogramami odpowiadającymi modułom modelu matematycznego. Moduły modelu zostały zapisane w blokach typu SUBROUTINE i FUNCTION, które komunikują się z programem głównym i między sobą za pomocą parametrów aktualnych. Do generowania liczb losowych wykorzystano generatory znajdujące się w bibliotece matematycznej IMSL. Generowanie odstępów czasu dla pojazdów oraz ich atrybutów dokonuje się na początku symulacji i przechowuje się je w tablicach. Informacje te są wykorzystywane w trakcie symulacji i na bieżąco są one uzupełniane o czasy zgłoszeń na detektorze oraz czasy dojazdu i zjazdu z przekrojów decyzji.

Z uwagi na dużą liczbę parametrów, które należy wczytać do programu, zdecydowano się na ich umieszczenie na dysku w postaci pliku ASCII o rozszerzeniu TXT. Program po uruchomieniu prosi o podanie nazwy pliku z danymi (bez rozszerzenia), wczytuje te dane i przystępuje do obliczeń symulacyjnych.

Wyniki obliczeń zapisywane są do pliku o takiej samej nazwie jak plik z danymi wejściowymi (zadeklarowanej przy uruchomieniu programu) i rozszerzeniu WYN. Postacią i zakresem wyników można sterować. W zależności od podanej wartości parametru IWY w zbiorze danych wejściowych dotyczącej rodzaju wydruku możemy otrzymać wyniki w wersji pełnej i skróconej

### 2.4. Testowanie modelu i programu komputerowego

Dla sprawdzenia poprawności przyjętych założeń do modelu matematycznego i opracowanego programu komputerowego przygotowywane są testy numeryczne. Należy podkreślić, że przy ich przygotowywaniu należy zadbać o to, aby wszystkie możliwe sytuacje ruchu i sterowania były w nich uwzględnione. Kolejnym krokiem będzie wykonywanie ręcznego testowania modelu i programu komputerowego. Napotkane błędy będzie należało zidentyfikować, jako modelowe lub programowe, po czym wprowadzić odpowiednie korekty do modelu/programu oraz ponownie przeprowadzić proces testowania. Proces testowania zostanie zakończony, gdy wszystkie testy będą wykonane a wyniki uzyskane z opracowanych testów i z programu komputerowego będą identyczne.

Etap testowania jest najdłuższy i obecnie trudno przewidzieć, kiedy będzie można przeprowadzić zaplanowane analizy efektywności działania zężenia drogowego.

### 2.5. Weryfikacja modelu

Jakkolwiek skonstruowany model matematyczny dotyczący zężeń drogowych opracowany został na podstawie wnikliwej obserwacji oraz szczegółowych badań ruchu w warunkach rzeczywistych, to aby mieć pełne zaufanie do uzyskiwanych z obliczeń symulacyjnych wyników, niezbędna jest również weryfikacja uzyskiwanych wyników z wynikami weryfikacyjnych badań empirycznych.

Biorąc pod uwagę złożoność, stochastyczny i niestacjonarny charakter oraz wzajemne powiązania procesów ruchu na modelowanym zężeniu zdecydowano się na przeprowadzenie weryfikacji procesów cząstkowych (tzn. elementów procesu zgłoszeń i procesu obsługi) oraz dokonanie porównania najistotniejszych wyników końcowych symulacji (straty czasu, kolejki, zatrzymania) z danymi empirycznymi, wynikami obliczeń według formuł stanowiących podstawę powszechnie stosowanych metod zagranicznych oraz z wynikami badań symulacyjnych innych autorów.



## 2.6. Badania czułości

Badania czułości modelu polegają na sprawdzeniu jak zmiany poszczególnych parametrów wpływają na wyniki obliczeń – zmienia się wartość analizowanego parametru przy stałych wartościach pozostałych. Analizy pozwalają sprawdzić, które z parametrów ruchowych i sterowania mają decydujący wpływ na efektywność sterowania na zwichnięciu drogowym. Pozwalają również stwierdzić, które parametry mają niewielki wpływ na sprawność zwichnięcia. Po etapie testowania planowane jest wykonanie badania wpływu wybranych parametrów sterowania na miary efektywności zwichnięcia (straty czasu, zatrzymania, kolejki).

## 3. BADANIA EMPIRYCZNE

Przeprowadzone badania empiryczne dotyczą zachowania uczestników ruchu na zwichnięciu drogowym sterowanym sygnalizacją świetlną [13, 14 i 15]. Głównym celem tych badań był pomiar czasów wjazdu kolejnych pojazdów na zwichnięcie (przejazd tyłu pojazdu przez linię zatrzymań przed sygnalizatorem) po rozpoczęciu nadawania sygnału zielonego z uwzględnieniem struktury rodzajowej ruchu oraz rejestracja momentów zmian sygnałów świetlnych na sygnalizatorach. Dodatkowo wykonywano pomiar natężeń ruchu dojeżdżających do zwichnięcia oraz kolejek maksymalnych i pozostających dla obu kierunków ruchu.

Pomiary empiryczne pozwoliły oszacować natężenie nasycenia występujące na poligonach badawczych na podstawie analizy zmienności odstępów czasu pomiędzy pojazdami w czasie nadawania sygnału zielonego w celu wyłonienia tzw. przedziału środkowego, w którym następuje stabilizacja średnich odstępów czasu między pojazdami. Natężenia nasycenia zostały ustalone w oparciu o uśredniony odstęp czasu w przedziale środkowym. W celu wyznaczenia przedziału środkowego wprowadzono zmienną liczbę odrzuconych odstępów czasu między pojazdami w przedziale początkowym sygnału zielonego oraz w przedziale końcowym. Początek i koniec przedziału środkowego ustalony został na podstawie analiz porównawczych sąsiadujących ze sobą odstępów czasu kolejnych pojazdów przejeżdżających linię zatrzymań z wykorzystaniem testu parametrycznego  $t$ -Studenta na poziomie istotności  $\alpha = 0.05$ . Natężenie nasycenia w pojedynczym cyklu sygnalizacyjnym wyznaczone zostało z ilorazu  $3600/t_{n,s}$ , gdzie  $t_{n,s}$  oznacza średni odstęp czasu analizowanych par pojazdów w przedziale środkowym sygnału zielonego. Z przeprowadzonych analiz dla poligonu w Białym Dunajcu uzyskano przeciętną wartość natężenia nasycenia równą 1537 E/hz przy czym do projektu sygnalizacji świetlnej na tym poligonie przyjęto wartość 1100 E/h [14]. Natomiast dla poligonu w Krakowie natężenie nasycenia wyniosło 1637 E/hz [15]. W trakcie badań zauważono, że program sygnalizacji nie został poprawnie zaprojektowany, bo występowały okresy sygnału zielonego, podczas którego brak było pojazdów a na drugim kierunku oczekiwała kolejka pojazdów.

Uzyskane w pomiarach odstępy czasu pomiędzy pojazdami będą podstawą do wyznaczenia parametrów rozkładu normalnego, z którego będą generowane kolejne odstępy w modelu symulacyjnym z uwzględnieniem pozycji w kolejce oraz struktury rodzajowej ruchu.

W ramach programu RID-I/50 w roku 2017 będą prowadzone dalsze badania empiryczne pozwalające na weryfikację wybranych parametrów do modelu symulacyjnego.

## PODSUMOWANIE

Opracowany model matematyczny i jego implementacja komputerowa – program ZWEZ\_D2P będzie użytecznym narzędziem do badania sprawności zwichnięcia drogowego o ruchu wahadłowym regulowanym

znakami drogowymi oraz sygnalizacją świetlną (stałoczasową i akomodacyjną). Pozwoli on na określenie warunków ruchu (straty czasu, kolejki, zatrzymania) dla pojazdów w zależności od zadawanych natężeń, organizacji ruchu, struktury kierunkowej i parametrów ruchu.

Przy pomocy programu ZWEZ\_D2P można prowadzić wielokierunkowe analizy mające na celu:

- zbadanie wpływu różnych strategii sterowania na sprawność zwichnięcia z akomodacyjną sygnalizacją świetlną oraz wybór tej, która daje największe efekty w postaci redukcji strat czasu, kolejek i zatrzymań,
- określenie zależności pomiędzy wybranymi czynnikami wpływającymi na funkcjonowanie zwichnięcia (m.in. zmienność potoków dopływających, stopień obciążenia czy cechy geometryczne zwichnięcia) a efektywnością sterowania akomodacyjnego dla wyznaczenia progu, powyżej którego sterowanie stałoczasowe daje podobne wyniki jak sterowanie akomodacyjne,
- zbadanie zależności pomiędzy podstawowymi parametrami sterowania (minimalna długość sygnału zielonego  $G_{min}$ , maksymalna długość sygnału zielonego  $G_{max}$ , długość jednostkowego wydłużenia sygnału zielonego  $\Delta t_{max}$  i minimalna długość sygnału czerwonego  $R_{min}$ ) oraz strategią sterowania (all red, preference czy pozostawienie fazy ostatnio realizowanej) a efektywnością działania zwichnięcia drogowego,

Wszystkie z wymienionych powyżej analiz będą prowadzić do racjonalnego projektowania zwichnięć drogowych oraz wyboru efektywnej regulacji ruchu na zwichniętym odcinku drogi o ruchu wahadłowym.

Można założyć, że praktycznymi efektami projektu badawczego będzie:

- przedstawienie porównania efektywności różnych strategii sterowania,
- opracowanie metody doboru parametrów sterowania i oceny efektywności zwichnięć.

Wynikami pracy powinny być zainteresowane następujące podmioty:

- uczelnie techniczne ze specjalnością budownictwo drogowe, inżynieria komunikacyjna, itp.,
- komunalne biura projektowe i konsultacyjne,
- administracja drogowa.

Przewiduje się upowszechnienie wyników projektu badawczego i obszernych analiz z wykorzystaniem opracowanego programu symulacyjnego ZWEZ\_D2P poprzez publikacje naukowe oraz referaty na konferencjach krajowych i zagranicznych.

W ramach projektu „**Nowoczesne metody obliczania przepustowości i oceny warunków ruchu dla dróg poza aglomeracjami miejskimi, w tym dla dróg szybkiego ruchu**” realizowanego w programie RID-I/50 powstanie instrukcja projektowania tymczasowej sygnalizacji świetlnej przy prowadzeniu robót drogowych mająca na celu eliminację niekorzystnego wpływu miejsc występowania LOP (czasowe zwichnięcia jezdni, roboty drogowe) na przepustowość i warunki ruchu pojazdów. Z instrukcji wynikać będą również wskazania, co do potrzeb wprowadzania objazdów.

## BIBLIOGRAFIA

1. Katalog urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego. Wydanie I. Warszawa, grudzień 1995 r. (PROFIL).
2. Chodur J.: Ruch na zwichnięciach dwupasowych dróg, Drogownictwo Nr 6/1978, s. 184–189.
3. Chodur J., Gondek S.: Zwichnięcia dwupasowych dróg dwukierunkowych. Książka Biblioteki Drogownictwa pt. „Symulacja potoków pojazdów”, Jamroz K. (redaktor), WKiŁ, Warszawa 1980, s. 38 +

- 50.
4. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 3 lipca 2003 roku w sprawie szczegółowych warunków technicznych dla znaków i sygnałów drogowych oraz urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego i warunków ich umieszczania na drogach. Dz. U. nr 220, poz. 2181 z dnia 23 grudnia 2003 r. oraz późniejsze zmiany.
5. Chodur J., Gaca S., Gondek S., Tracz M., Kieć M., Ostrowski K.: Metoda obliczania przepustowości skrzyżowań z sygnalizacją świetlną. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa 2004 r.
6. Traffic Safety Measures and Signs for Road Works and Temporary Situations, Part 1: Design, Department for Transport, London 2009.
7. Bielecki J.: Fortran 77. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1988.
8. Chodur J., Gondek S.: Stochastyczny model symulacyjny skrzyżowania z sygnalizacją cykliczną stałoczasową. Zeszyt Naukowy "Modelowanie procesów ruchu", CPBP, Kraków, 1990.
9. Gaca S., Suchorzewski W., Tracz M.: Inżynieria ruchu drogowego – teoria i praktyka. WKŁ, Warszawa, 2008.
10. Bąk R., Splawińska M.: Funkcjonowanie zwożeń odcinków dróg z sygnalizacją zmiennoczasową. Logistyka Nr 4/2015, w wersji elektronicznej na dysku CD, s. 2442 ÷ 2451.
11. Katalog typowych schematów oznakowania robót prowadzonych w pasie drogowym. Załącznik do zarządzenia Nr 52 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 12.11.2013 r., Warszawa, listopad 2013 r.
12. Zieliński R.: Generatory liczb losowych. WNT, Warszawa, 1975
13. Gondek S., Ostrowski K.: Analiza funkcjonowania zwożenia na drodze krajowej. Logistyka Nr 3/2015, w wersji elektronicznej na dysku CD, s. 1524 ÷ 1533.
14. Gryglak I., Badanie przepustowości zwożenia drogowego z sygnalizacją na moście w Białym Dunajcu. Politechnika Krakowska, Kraków 2015 (praca dyplomowa).
15. Winiarska D., Analiza funkcjonowania zwożenia drogi. Politechnika Krakowska, Kraków 2016 (praca dyplomowa).

## The simulation model of a two-way highway narrowing

*In case one lane is impassable on a two-way highway, alternating one-way traffic is usually introduced allowing vehicle passage in turns on the narrow stretch of the road. In order to ensure smooth and safe passage, the road narrowing is marked with road signs or traffic lights (constant or accommodative cycle length). Selected way of traffic control at the road narrowing should provide adequate bandwidth and minimal loss in vehicle travel times. A useful tool in the research on the optimal traffic control at the road narrowing is a simulation model. The paper presents a mathematical model, its implementation and the preliminary results of empirical research of saturation flow rate. It presents in details elements of the following processes in the simulation model: arrival process, service process and queue discipline, and describes conditions of traffic control at the road narrowing. The paper also shows the way of traffic flow randomness mapping in the model through the use of random number generators. A computer program is currently in the testing phase. The simulation model will be used to analyse the efficiency of the road narrowing in order to develop methodological recommendations for traffic control on a reversible lane, as part of the project executed by a consortium of several universities in the RID-1/50 program.*

Autor:

dr inż. **Stanisław Gondek** – Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Inżynierii Drogowej i Kolejowej, Katedra Budowy Dróg i Inżynierii Ruchu, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, e-mail: sgondek@pk.edu.pl, tel.: (12) 628-38-39