

Grzegorz KARON¹, Renata ŻOCHOWSKA²

KONCEPCJA DYNAMICZNEGO WYZNACZANIA PRZEPUSTOWOŚCI SKRZYŻOWAŃ I OCENY WARUNKÓW RUCHU

Streszczenie. Artykuł prezentuje koncepcję dynamicznego gromadzenia danych o ruchu na skrzyżowaniach. Opierając się na aktualnych metodach obliczania przepustowości skrzyżowań, zaproponowano wykorzystanie modelu strumieniowego baz danych do gromadzenia danych oraz dynamicznego wyznaczania przepustowości wraz z oceną warunków ruchu.

CONCEPTION OF REAL-TIME ESTIMATION OF INTERSECTIONS CAPACITY AND TRAFFIC CONDITIONS

Summary. The conception of real-time traffic data collection at the intersections is a subject of the article. The actual methods of capacity and traffic condition estimation for three types of intersections have been described. The data stream system DSMS has been proposed for data collection and traffic characteristics estimation.

1. WPROWADZENIE

Zasada informacji, podejścia systemowego do rozwiązywania problemów transportowych głosi, że dostępność wysokiej jakości informacji (wiedzy) w czasie rzeczywistym umożliwia znaczną poprawę efektywności systemu transportowego. Posiadanie danych i wiedzy eksperckiej dla rozwiązywania problemów planowania, projektowania, zarządzania, nadzoru i sterowania jest warunkiem koniecznym dla zapewnienia wysokiej jakości tych rozwiązań [1]. Dostępność w czasie rzeczywistym dynamicznych danych (pomiarów natężenia i gęstości ruchu, zajętości odcinków, długości kolejek pojazdów, incydentów ruchowych, prac drogowych) daje korzyści dla działania systemu transportowego. Poprzez możliwość oceny aktualnych i predykcji [1, 19] przyszłych strumieni ruchu w sieci – uzyskuje się dynamiczny obraz rozkładu strumieni ruchu na dostępne w sieci trasy z możliwością oceny czasów podróży, współczynników obciążenia tras oraz innych miar jakości usług transportowych.

Właściwe zorganizowanie zebranych danych – czy to pochodzących z „pomiarów ręcznych”, czy też z pomiarów otrzymanych z urządzeń rejestrujących ruch pojazdów w sposób automatyczny [por. 1, 2, 6, 8, 14, 15] – jest niezbędne do wykorzystania ich w procesie modelowania systemów i procesów transportowych. Celem takiego modelowania jest między innymi opracowywanie nowych i modyfikacja już istniejących metod obliczania parametrów skrzyżowań i oceny warunków ruchu na nich panujących. Obecne metody zawierają dużą liczbę współczynników i charakterystyk [zob. 5, 17, 18], umożliwiających

¹ Wydział Transportu, Politechnika Śląska, Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, grzegorz.karon@polsl.pl

² Wydział Transportu, Politechnika Śląska, Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, renata.zochowska@polsl.pl

dostrojenie metody i wykorzystanego w niej modelu do zmiennych warunków ruchu panujących w otoczeniu oraz na samym, analizowanym, modernizowanym lub projektowanym skrzyżowaniu.

2. POPULARNE SPOSOBY GROMADZENIA DANYCH

Większość współczynników i charakterystyk oraz ich wartości wyznaczone są na etapie budowy modelu i opracowywania metody w oparciu o badania i pomiary ruchu. Po opracowaniu metody ponownie należy przeprowadzić badania ruchu w celu weryfikacji metody i zastosowanego w niej modelu. Zmienne warunki ruchu wymuszają również okresową weryfikację, co skutkuje wykonywaniem następnych pomiarów. Oprócz empirycznego wyznaczania parametrów i charakterystyk wykorzystuje się także symulację komputerową, która częściowo pozwala wyeliminować kosztowne badania ruchu drogowego. Niemniej modele symulacyjne również wymagają weryfikacji i dostrajania do zmieniających się warunków ruchu. Tak więc gromadzenie i analiza danych o ruchu drogowym jest i będzie podstawowym i niezbędnym elementem modelowania systemów i procesów transportowych. Dlatego istotne jest właściwe gromadzenie danych, a przy dużej ich liczbie równie ważne jest odpowiednie ich zorganizowanie w postaci bazy danych, która umożliwi efektywne i szybkie ich przetwarzanie w wiedzę użyteczną na potrzeby modelowania.

Powszechnie do tego celu wykorzystuje się popularne arkusze kalkulacyjne, które są przyjazne w użyciu i dają względnie duże możliwości obróbki i prezentacji danych poprzez stosowanie odpowiednich formuł. Niestety, arkusze sprawdzają się dobrze tylko w przypadku stosunkowo niedużej liczby danych (np. popularny arkusz MS Excel umożliwia przechowywanie tylko 65536 wierszy danych podzielonych na 256 kolumn; dodatkowo komórki arkusza mają jeszcze ograniczenia związane z typem przechowywanych danych).

Do gromadzenia znacznie większej liczby danych wykorzystywane są relacyjne bazy danych³. Bazy tworzone są w specjalnych systemach, których zasadniczym elementem jest relacyjny system zarządzania bazą danych RDBMS (*Relational DataBase Management System*). Dane przechowywane są w tabelach (relacjach), składających się z rekordów (wierszy), inaczej zwanych krotkami, i pól (kolumn), zwanych też atrybutami. Zbiór połączonych ze sobą tabel tworzy określoną bazę danych, którą zarządza RDBMS, a dostęp do nich – ich definiowanie, modyfikacja (dodawanie, usuwanie) i przetwarzanie (sortowanie, wyszukiwanie, zestawianie, wykonywanie obliczeń) – jest możliwy za pomocą wykonywania przez RDBMS zapytań w języku SQL (*Structured Query Language*). RDBMS realizuje wysłane przez użytkownika bazy zapytania SQL – przeszukuje dane, zgodnie z warunkami zapisanymi w zapytaniach oraz wykonuje zadane w zapytaniach obliczenia – i zwraca ich wynik w postaci tabelarycznych zestawień oraz wyników obliczeń, które można dalej przetwarzać. Główną zaletą języka SQL jest prosta składnia wymagająca właściwego zapisania warunków, jakie mają spełniać poszukiwane dane. Natomiast decyzje o sposobie przechowywania i pobrania danych pozostawia się RDBMS. Jego zadaniem jest optymalizacja zapytań SQL oraz odpowiednie przygotowanie danych do jak najszybszego przeszukania i zwrócenia żądanych wyników w jak najkrótszym czasie, co przy bardzo dużej liczbie danych i tabel tworzących konkretną bazę nie jest bez znaczenia.

³ W latach 70. i 80. XX wieku najbardziej znane były DB2 i SQL/DS firmy IBM oraz Oracle firmy Oracle Co. Obecnie rynek oferuje dziesiątki produktów począwszy od produktów mniejszych, przeznaczonych na komputery klasy PC, przykładowo: Access i FoxPro firmy Microsoft, Paradox firmy Corel, InterBase, czy BDE firmy Borland, do dużych przeznaczonych dla komputerów klasy mainframe, przykładowo: Oracle, DB2, Informix, Sybase, Microsoft SQL Server. Oprócz produktów komercyjnych dostępnych jest również dużo systemów freeware, na przykład MySQL, PostgreSQL czy Kexi. Wspólną cechą jest ten sam język dostępu i przetwarzania danych SQL obecnie w standardzie SQL92.

Arkusze kalkulacyjne oraz relacyjne bazy danych⁴ są obecnie najbardziej rozpowszechnionym sposobem gromadzenia i przetwarzania danych w wiedzę na temat badanych procesów i zjawisk, w tym również systemów i procesów transportowych. Ograniczeniem ich wykorzystania jest zasada działania RDBMS zakładająca jednorazowe wykonywanie konkretnego zapytania na skończonych, statycznych danych.

3. GROMADZENIE I PRZETWARZANIE INFORMACJI W STRUMIENIOWYCH BAZACH DANYCH

Na początku XXI wieku powstała koncepcja systemów baz danych, do których dane - w przeciwieństwie do RDBMS - napływałyby w sposób ciągły. Opracowano kilka projektów tzw. systemów strumieniowych DSMS⁵ (*Data Stream Management System*), które wykorzystują język CQL (*Continuous Query Language*). Założeniem systemów DSMS jest przetwarzanie i gromadzenie danych napływających do bazy w postaci ciągłego, nieograniczonego, zmiennego w czasie, dynamicznego strumienia danych. Strumień ten może być filtrowany zapytaniami CQL i przekształcany na relacje (tabele) i na kolejne strumienie za pomocą odpowiednich operatorów. Dużą zaletą modelu strumieniowego danych jest fakt, że opiera się na modelu relacyjnym i języku SQL, dzięki czemu jest łatwy w implementacji. Podstawowa różnica między bazami relacyjnymi a strumieniowymi polega na tym, że w relacyjnej bazie zapytanie wykonuje się jednokrotnie na skończonym zbiorze danych, natomiast baza strumieniowa umożliwia ciągłe wykonywanie konkretnego zapytania na ciągłym nieograniczonym strumieniu napływających danych [3, 4].

Podstawowe pojęcia strumieniowej bazy danych [3, 4]

Strumień S to ciąg elementów o postaci $\langle s, \tau \rangle$ uporządkowanych względem wartości τ , gdzie s jest krotką, a $\tau \in T$ jest czasem (*timestamp*) pojawienia się krotki s w strumieniu S .

Relacja R to zbiór krotek w chwili $\tau \in T$. Jest to funkcja odwzorowująca czas na zbiór krotek w chwili $\tau \in T$. Oznaczenie $R(\tau)$ to relacja (tabela krotek) w chwili τ .

Poniżej przedstawiono operatory przekształcające wzajemnie wyżej wymienione struktury danych.

Operatory **strumień** \rightarrow **relacja** generują na podstawie strumienia S relację $R(\tau)$, bazując na idei przesuwającego się okna (*sliding window*), która polega na analizie tylko danych znajdujących się w określonym przedziale:

- **operator ruchome okno czasowe** (*time-based sliding window*):
 - $S[\text{Range } \varpi]$ - generuje ze strumienia S w chwili τ relację $R(\tau)$, zawierającą wszystkie krotki strumienia S , które pojawiły się od chwili $\tau - \varpi$ do τ ,
 - $S[\text{Now}]$ - generuje ze strumienia S w chwili τ relację $R(\tau)$, zawierającą wszystkie krotki strumienia S , które pojawiły się w chwili τ ,
 - $S[\text{Range Unbounded}]$ - generuje ze strumienia S w chwili τ relację $R(\tau)$, zawierającą wszystkie krotki, które pojawiły się kiedykolwiek w strumieniu,

⁴ W tym również bazy obiektowo-relacyjne oraz hurtownie danych.

⁵ Projekty: STREAM: The Stanford Data Stream Management System; Niagara (University of Wisconsin-Madison, the Oregon Health & Science University); Aurora (Brandeis University, Brown University, and MIT); Telegraph (UC Berkeley's Computer Science Division); MonaCQ (Instytut Techniki i Aparatury Medycznej, Zabrze).

- **operator ruhome okno krotek** (*tuple-base sliding window*):
 - $S[\text{Rows } N]$ – generuje ze strumienia S w chwili τ relację $R(\tau)$, zawierającą N krotek strumienia S , które pojawiły się do chwili τ ,
- **operator ruhome okno podzielone** (*partitioned sliding window*):
 - $S[\text{Partition By } A_1, \dots, A_k \text{ Rows } N]$ – strumień S dzielony jest na podstrumienie, zawierające elementy o identycznych wartościach atrybutów A_1, \dots, A_k , następnie z tych podstrumieni wybieranych jest N najnowszych elementów i tworzona jest relacja wynikowa $R(\tau)$.

Operatory **relacja**→**relacja** – wywodzą się z języka SQL, a ich działanie w języku CQL jest analogiczne, przy czym operują one na relacjach (n - elementowym zbiorze relacji) tylko w tych samych chwilach τ . W każdej chwili τ relacja $R(\tau)$ obliczana jest ze zbioru dostępnych relacji $R_1(\tau), \dots, R_n(\tau)$.

Operatory **relacja**→**strumień** – generują na podstawie relacji $R(\tau)$ strumień S o takim samym schemacie jak relacja:

- **operator strumień elementów dodanych**:
 - $IStream$ – tworzy na podstawie relacji $R(\tau)$ strumień, który w chwili τ zawiera elementy o postaci $\langle s, \tau \rangle$, gdzie s należy do zbioru elementów dodanych do relacji $R(\tau)$ w chwili τ ,
- **operator strumień elementów usuniętych**:
 - $DStream$ – tworzy na podstawie relacji $R(\tau)$ strumień, który w chwili τ zawiera elementy postaci $\langle s, \tau \rangle$, gdzie s należy do zbioru elementów usuniętych z relacji $R(\tau)$ w chwili τ ,
- **operator strumień elementów relacji**:
 - $RStream$ tworzy na podstawie relacji $R(\tau)$ strumień, który w chwili τ zawiera elementy postaci $\langle s, \tau \rangle$, gdzie s należy do relacji $R(\tau)$.

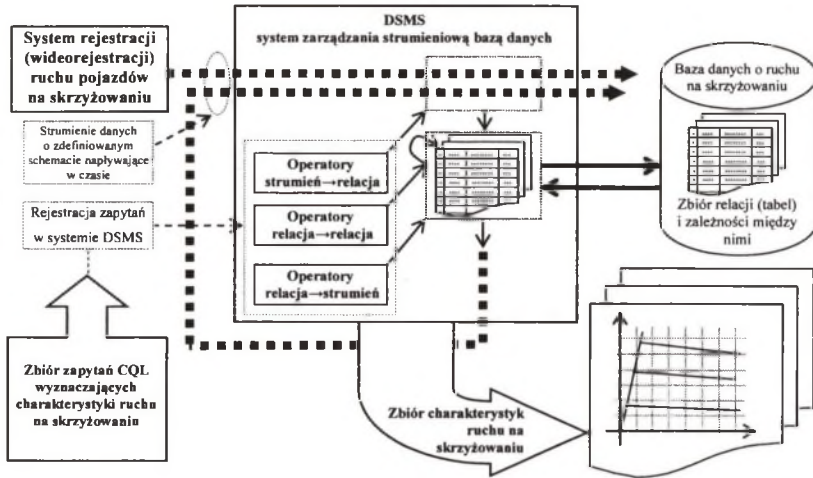
Jak pokazano w opracowaniach [9, 10, 11], wykorzystując przedstawione pojęcia systemów DSMS, istnieje możliwość efektywnego przetwarzania danych, napływających strumieniem na potrzeby systemów transportowych.

4. PRZEPUSTOWOŚCI SKRZYŻOWAŃ I MIERNIKI WARUNKÓW RUCHU MOŻLIWE DO WYZNACZENIA METODĄ PRZETWARZANIA STRUMIENIOWEGO

Koncepcja metody rejestracji i przetwarzania danych w strumieniowej bazie oraz dynamicznego wyznaczania parametrów ruchu istotnych z punktu widzenia aktualnych metod obliczania przepustowości skrzyżowań i oceny warunków ruchu (zawartych w instrukcjach [5, 17, 18]) wykorzystuje podstawową zaletę modelu strumieniowego [3, 4] – przetwarzanie informacji napływających w sposób ciągły poprzez ciągłe wykonywanie zapytań filtrujących i przetwarzających dane. Niemniej model strumieniowy może być wykorzystany do opracowania metod obliczania przepustowości i oceny warunków ruchu stosujących symulację komputerową lub jedynie do efektywnego zbierania danych pomiarowych.

Na rysunku 1 przedstawiono schemat systemu dynamicznego wyznaczania charakterystyk ruchu wykorzystującego strumieniową bazę danych. Zakłada się wykorzystanie istniejących lub opracowywanych i coraz szerzej stosowanych metod detekcji pojazdów, między innymi wideodetekcje, bez wskazania konkretnego rozwiązania [1, 2, 8,

12, 13]. Istotne jest dostarczenie przez system identyfikacji pojazdów danych w określonym formacie (na przykład [9]), napływających w sposób ciągły – danych dostarczanych strumieniem S . Odpowiedni model strumieniowy (baza danych DSMS wraz ze zbiorem zapytań CQL) jest warstwą programową (system detekcji pojazdów stanowi warstwę sprzętową rozwiązania) z opracowaną logiką przetwarzania danych ukierunkowaną na otrzymanie charakterystyk i parametrów zdefiniowanych w metodach [5, 17, 18].



Rys. 1. Schemat systemu dynamicznego wyznaczania charakterystyk ruchu wykorzystującego strumieniową bazę danych

Fig. 1. Scheme of the stream database system DSMS proposed for computation of traffic characteristics dynamically

Źródło: Opracowanie własne

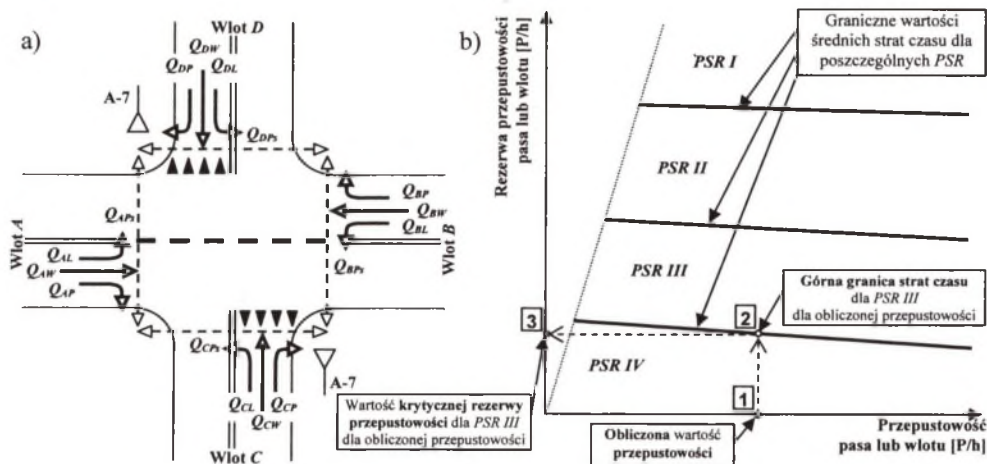
W dalszej części opracowania wymieniono tylko podstawowe charakterystyki i parametry skrzyżowań – bez uwzględniania przypadków szczególnych – które można wyznaczać dynamicznie podczas pomiarów ruchu drogowego z wykorzystaniem modelu strumieniowego. Wszystkie obecne metody obliczeniowe (por. [5,17,18]) wymagają znajomości danych geometrycznych skrzyżowania (między innymi: wymiarów geometrycznych, liczby wlotów, liczby pasów ruchu, lokalizacji skrzyżowania), co jest oczywiste. Pozostałe charakterystyki i parametry ruchu są związane z typem skrzyżowania, organizacją ruchu oraz założeniami określonej metody obliczeniowej.

Skrzyżowania bez sygnalizacji świetlnej

Ruch pojazdów na skrzyżowaniach bez sygnalizacji świetlnej (rys. 2a – z wlotami podporządkowanymi znakami A-7 „ustąp pierwszeństwa” i/lub B-20 „stop”) odbywa się na zasadzie wykorzystania przez pojazdy podporządkowane – na wlotach C i D – odstępów czasu między pojazdami w potoku nadrzędnym – na wlotach A i B . Przepustowość relacji⁶, pasów ruchu i wlotów podporządkowanych (C i D) oraz pasów na wlotach nadrzędnych z relacjami skrętu w lewo (relacje AL i BL) obliczana jest w oparciu o znajomości natężeń relacji Q_r ($r \in \{AL, AW, AP, BL, BW, BP, CL, CW, CP, DL, DW, DP\}$) oraz struktury rodzajowej ruchu na wlotach. Przepustowość całego skrzyżowania – suma natężeń na wlotach –

⁶ Należy rozróżniać odmienne znaczenia pojęcia relacja – relacja jako tabela w bazie danych oraz relacja ruchu na skrzyżowaniu.

wyznaczana jest w chwili, gdy na jednym z wlotów natężenie ruchu osiągnęło wartość jego przepustowości. Następnie warunki ruchu, na poszczególnych pasach i wlotach podporządkowanych, opisywane są poziomami swobody ruchu⁷ (*PSR* – rys. 2b), ustalonymi na podstawie średnich strat czasu ponoszonych przez pojazdy – dodatkowym czasem związanym z opóźnieniem przy dojeździe pojazdów do kolejki i oczekiwaniem w niej na przejazd.



Rys. 2. Skrzyżowanie bez sygnalizacji świetlnej a) natężenia na wlotach, b) poziomy swobody ruchu
Fig. 2. Unsignalized intersection: a) arrival flows at the intersection, b) level of service

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [5]

Granice między poszczególnymi *PSR* wyznaczają tzw. natężenia krytyczne, będące wartościami progowymi względem natężeń panujących na wlotach. Natomiast natężenie krytyczne wyznaczone jest jako różnica między przepustowością (rys. 2b, p.1) a jej krytyczną rezerwą (rys. 2b, p. 3) odpowiadającą granicznej wartości średnich strat czasu (rys. 2b, p. 2) dla poszczególnych *PSR*. Metoda analizy przepustowości i oceny warunków ruchu [5] wymaga znajomości:

- wartości natężeń relacji nadrzędnych⁸ oraz relacji dławiących⁹, wyznaczanych na podstawie zmierzonych lub prognozowanych natężeń na poszczególnych wlotach,
- struktury rodzajowej i kierunkowej ruchu na wlotach,
- granicznego odstępu czasu, który określa minimalny akceptowalny odstęp między pojazdami na wlotach głównych,
- odstępu czasu między pojazdami podporządkowanymi wjeżdżającymi z kolejki na skrzyżowanie, na wlotach podporządkowanych.

⁷ *PSR I* – najlepsze warunki ruchu, najmniejsze straty czasu, *PSR IV* – najgorsze warunki ruchu, największe straty czasu.

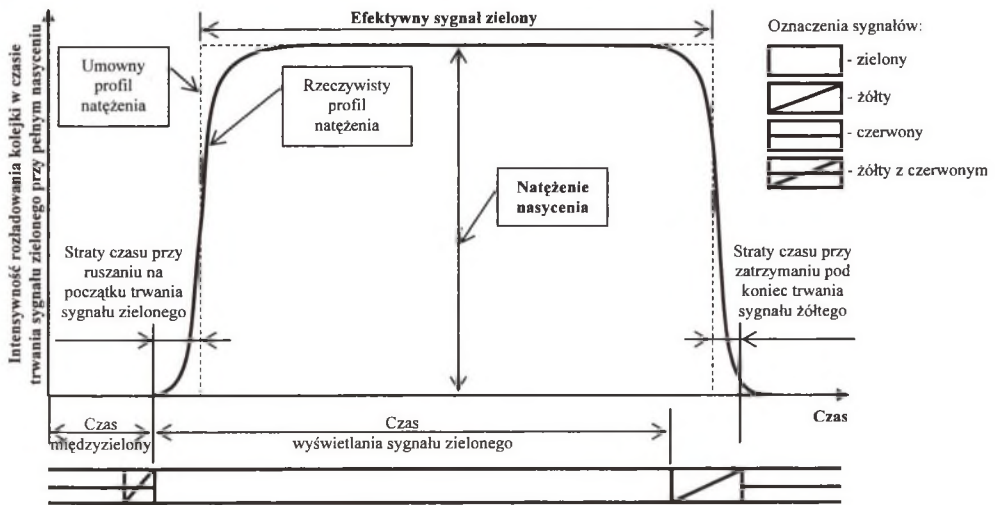
⁸ Suma natężeń wszystkich relacji mających pierwszeństwo i równocześnie kolidujących z daną relacją podporządkowaną, bądź relacji wyraźnie oddziałujących na reakcje kierujących pojazdami relacji podporządkowanych; na przykład dla relacji *CP* relacjami nadrzędnymi są: *AW*, *CPs*, *BP*s oraz *AP* jako relacja wyraźnie oddziałująca na reakcję kierowców relacji *CP* – uwzględnia zasadę ograniczonego zaufania.

⁹ Suma natężeń tych relacji z wlotów nadrzędnych i podporządkowanych, które, mając pierwszeństwo przed daną relacją, są równocześnie podporządkowane innym relacjom nadrzędnym; dla relacji *CW* i *DW* relacjami dławiącymi są relacje *AL* oraz *BL*; dla relacji *CL* i *DL* odpowiednio: *AL*, *BL*, *DW*, *DP* i *AL*, *BL*, *CW*, *CP*.

Skrzyżowania z sygnalizacją świetlną

Analiza przepustowości i warunków ruchu na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną sprowadza się do wyznaczenia przepustowości [18]: relacji (natężeń nasycenia), pasów, obliczeniowych grup pasów, a następnie przepustowości wlotów i całego skrzyżowania oraz obliczenia stopni obciążenia dla grupy pasów, wlotów oraz skrzyżowania.

Punktem wyjścia jest wyznaczenie natężenia nasycenia – podstawowego parametru determinującego przepustowość – definiowanego jako maksymalne natężenie strumienia pojazdów, które mogą przejechać linię zatrzymań określonego pasa ruchu lub grupy pasów (tzw. obliczeniowej grupy pasów), przy danych warunkach ruchowych i drogowych, w okresie godziny efektywnego sygnału zielonego (rys. 3). Natomiast efektywny sygnał zielony to długość ekwiwalentnego czasu, w którym pas ruchu jest w pełni wykorzystany przez strumień pojazdów – mających zezwolenie na wjazd – o natężeniu równym natężeniu nasycenia podczas utrzymującej się kolejki na wlocie, a następnie, po rozładowaniu kolejki, o natężeniu równym natężeniu nadjeżdżających pojazdów.



Rys. 3. Natężenie nasycenia i efektywny sygnał zielony

Fig. 3. Saturation flow rate and effective green time

Źródło: Opracowanie na podstawie [18]

Wyznaczenie przepustowości wymaga więc następujących danych:

- wielkości ruchu na wlotach: natężeń potoków pojazdów, struktury rodzajowej, struktury kierunkowej, natężeń potoków pieszych,
- natężeń nasycenia dla poszczególnych relacji na wlotach (maksymalnego możliwego dopływu pojazdów z kolejki na pasie ruchu w czasie sygnału zielonego),
- programu sygnalizacji.

Po obliczeniu przepustowości określone są miary warunków ruchu na skrzyżowaniu: straty czasu, liczby i wskaźniki zatrzymań, długości kolejki maksymalnej oraz pozostającej.

Straty czasu rozumiane są tak jak w poprzedniej metodzie, ale mogą również uwzględniać tzw. straty geometryczne związane z wydłużeniem drogi jazdy przez skrzyżowanie (np. przejazd przez skrzyżowanie z wyspą centralną). Ponadto, nie wszystkie pojazdy, które ponoszą straty czasu związane z opóźnieniem, a następnie przyspieszeniem muszą się zatrzymać. Dlatego dla uściślenia warunków ruchu wyznacza się liczbę zatrzymań – jako wartość średnią przypadającą na jeden pojazd lub łączną dla wszystkich pojazdów –

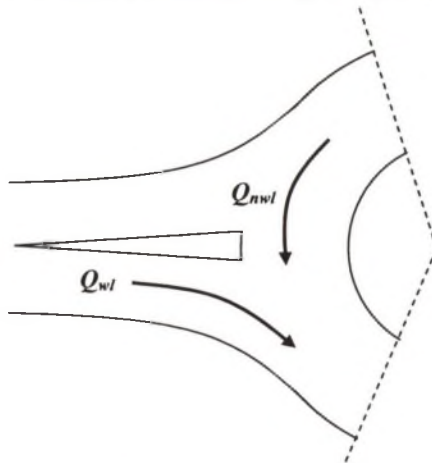
z uwzględnieniem zatrzymań wielokrotnych, oraz udział pojazdów zatrzymanych w ogólnej liczbie pojazdów przejeżdżających skrzyżowanie. Z zatrzymaniami oraz faktem, że ruchem na skrzyżowaniu steruje sygnalizacja, związane jest powstawanie kolejek na wlotach: kolejki maksymalnej na początku sygnału zielonego (nawet już po rozpoczęciu wyświetlania sygnału zielonego kolejka może zwiększyć się o dojeżdżający w tym czasie pojazd) oraz kolejki pozostającej – na końcu sygnału zielonego. Kolejki maksymalne determinują wielkość stref akumulacji dodatkowych pasów ruchu oraz wpływają na projekt koordynacji skrzyżowań z sygnalizacją, natomiast kolejki pozostające obrazują przeciążenie wlotów.

Od wymienionych miar zależą średnie ogólne straty czasu przypadające na pojazd, których przyjęte wartości graniczne wyznaczają poszczególne poziomy swobody ruchu *PSR*, klasyfikujące jakościowo warunki ruchu na skrzyżowaniu.

Skrzyżowania z ruchem okrężnym - ronda

Ponieważ organizacja ruchu na rondach ustala jako potoki podporządkowane te, które dopływają do ronda (na wlotach znajdują się znaki „ustęp pierwszeństwa” A-7 i „ruch okrężny” C-12), wobec tego przepustowość wlotów zależy – podobnie jak dla skrzyżowań bez sygnalizacji świetlnej – od granicznego odstępu czasu między pojazdami potoku nadrzędnego (wokół wyspy centralnej), odstępu czasu między pojazdami wjeżdżającymi z wlotów, oraz od natężeń na wlotach i wokół wyspy centralnej (z uwzględnieniem struktury rodzajowej i kierunkowej) [17].

Wartości natężeń ruchu na wlotach Q_{wl} (rys. 4) pozwalają wyznaczyć przepustowość możliwą poszczególnych wlotów, czyli maksymalny potok z danego wlotu przy założonych natężeniach na pozostałych wlotach tworzących potok nadrzędny Q_{nwl} dla analizowanego wlotu. Na podstawie przepustowości możliwych obliczane są (iteracyjnie) przepustowości rzeczywiste wlotów – natężenia ruchu występujące na wlotach, w sytuacji gdy przy równomiernych wzrostach natężeń na wszystkich wlotach (przy zachowaniu struktury kierunkowej i proporcji natężeń pomiędzy wlotami) wyczerpie się przepustowość jednego z nich. Suma tych natężeń daje przepustowość rzeczywistą ronda. Dalszy wzrost obciążenia powoduje zmianę proporcji natężeń między wlotami a następnie nasycenie ronda – powstają kolejki na wszystkich wlotach (suma natężeń daje przepustowość maksymalną ronda).



Rys. 4. Potoki ruchu na wlocie ronda

Fig. 4. Traffic flows at the roundabout

Źródło: Opracowanie na podstawie [17]

Do obliczania przepustowości niezbędne jest więc określenie:

- natężeń nadrzędnych Q_{nwl} (wokół wyspy) dla każdego wlotu wl (rys. 4),
- granicznego odstępu czasu pomiędzy pojazdami potoku nadrzędnego, który jest minimalną wartością wykorzystywaną na włączenie się do ruchu przez pojazdy na wlotach,
- odstępu czasu między pojazdami wjeżdżającymi na rondo z oczekującej kolejki, mierzonego w sytuacji, gdy do ruchu włącza się więcej niż jeden pojazd,
- struktury rodzajowej i kierunkowej na wlotach.

Ocena warunków ruchu na rondzie polega na wyznaczeniu średnich strat czasu przypadających na pojazd, wynikających z opóźnienia pojazdu przy dojeździe do kolejki na wlocie oraz oczekiwania w niej na wjazd. Podobnie jak dla poprzednio omówionych skrzyżowań, ocena warunków ruchu jest przedstawiana opisowo poprzez cztery poziomy *PSR*, którym przypisane są natężenia krytyczne jako wartości progowe dla natężeń panujących na wlotach. Natężenia krytyczne wyznaczone są na podstawie przepustowości możliwych wlotów i krytycznych wartości rezerw przepustowości możliwych – odpowiadających granicznym wartościom średnich strat czasu dla poszczególnych *PSR* (podobnie jak na rysunku 2b).

5. PODSUMOWANIE

Wymienione podstawowe charakterystyki skrzyżowań, otrzymane obecnie stosowanymi metodami [5,17,18], można spróbować wyznaczyć w sposób dynamiczny wykorzystując model strumieniowej bazy danych (rys. 1). Niezbędne do tego celu jest zdefiniowanie schematu danych, zaprojektowanie strumieniowej bazy danych (zdefiniowanie tabel i strumieni) oraz przygotowanie procedur – zdefiniowanie zapytań w języku CQL, które ciągle przetwarzane przez DSMS na strumieniach danych napływających z detektorów wykonywałyby niezbędne obliczenia (por. [9,10,11]) (rys. 1).

Podstawową zaletą takiej metody jest dostępność on-line informacji o warunkach ruchu na potrzeby sterowania ruchem, modelowania ruchu, weryfikacji projektów oraz analizy zmian zachodzących w systemach transportowych. Jak już wspomniano, zarejestrowanie danych w bazie strumieniowej umożliwia wielokrotne ich wykorzystanie. W tradycyjny statyczny¹⁰ sposób – przetwarzając zapytaniami SQL obsługiwany również przez bazę strumieniową lub przez tradycyjną relacyjną bazę danych, w arkuszu kalkulacyjnym (np. Excel), czy też w sposób dynamiczny – strumieniowy – przetwarzając zapytania CQL.

Dodatkowo, dane przekształcone ze strumienia w relacje (operatory strumień→relacja) i zapisane w bazie w postaci tabel mogą być w każdej chwili ponownie przekształcone w strumień wejściowy (operatory relacja→strumień) (zob. rys. 1). Umożliwia to odtworzenie przebiegu ruchu pojazdów uprzednio zarejestrowanych w analizowanym okresie poprzez ponowne wysyłanie strumienia (już nie w czasie rzeczywistym, ale w trybie off-line) i ponowne przetwarzanie na potrzeby innych analiz zamodelowanych zestawem odpowiednio sformułowanych zapytań CQL.

Trudnością jest obecny brak elastycznych narzędzi programistycznych (systemów DSMS) umożliwiających weryfikację zaproponowanej metody. Dostępny na serwerach Uniwersytetu Stanford niekomercyjny, demonstracyjny system STREAM jest mało elastyczny i umożliwia sprawne przygotowanie i testowanie jedynie prostych projektów baz danych [9,10,11].

¹⁰Zob. np. systemy wspomagania decyzji oparte na bazach danych z nowym językiem SimQL (*simulation access language*) opracowanym w celu podejmowania decyzji na podstawie danych zgromadzonych w przeszłości oraz danych otrzymanych z symulacji i prognozowania stanów systemu w przyszłości [19]).

Literatura

1. Adamski A.: *Inteligentne systemy transportowe: sterowanie, nadzór i zarządzanie*. Wydawnictwo AGH. Kraków 2003.
2. Achler O., Trivedi M.M.: *Real-Time Traffic Flow Analysis using Omnidirectional Video Network and Flatplane Transformation*. Computer Vision and Robotics Research Laboratory, University of California, San Diego.
3. Arasu A., Babcock B., Babu S., Cieślewicz J., Datar M., Ito K., Motani R., Srivastava U., Widom J.: *STREAM: The Stanford Data Stream Management System*. Stanford University 2004.
4. Babu S.: *Adaptive Query Processing in Data Stream Management Systems*. Department of Computer Science. Stanford University. September 2005.
5. Chodur J., Gaca S., Gondek S. i inni.: *MOP-SBS-04. Metoda obliczania przepustowości skrzyżowań bez sygnalizacji świetlnej*. GDDKiA, Warszawa 2004.
6. Dailey D.J., Cathey F.W., Pumrin S.: *An Algorithm to Estimate Mean Traffic Speed Using Uncalibrated Cameras*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 1, no. 2, June 2000.
7. Hammad M.A., Aref W.G., Elmagarmid A.K.: *Stream Window Join: Tracking Moving Objects in Sensor-Network Databases*. Proceedings of the 15th International Conference on Scientific and Statistical Database Management (SSDBM'03). 2003 IEEE.
8. Kanhere N.K., Birchfield S.T., Sarasua W.A.: *Vehicle Segmentation and Tracking in the Presence of Occlusions*. TRB Paper Number: 06-2943. Nov 14, 2005.
9. Karoń G., Pawlicki J.: *Systemy poboru zmiennej opłaty – wykorzystanie systemów strumieniowych DSMS*. III Konferencja Naukowo-Techniczna nt.: *Systemy Transportowe – Teoria i Praktyka*, Katowice, 7 września 2005.
10. Karoń G., Żochowska R.: *Przetwarzanie informacji w systemach transportowych – strumieniowe bazy danych*. III Konferencja Naukowo-Techniczna nt.: *Systemy Transportowe – Teoria i Praktyka*, Katowice, 7 września 2005.
11. Karoń G., Żochowska R.: *Zastosowanie strumieniowych baz danych w systemach transportowych*. III Konferencja Naukowo-Techniczna nt.: *Systemy Transportowe – Teoria i Praktyka*, Katowice, 7 września 2005.
12. Leško M., Guzik J.: *Sterowanie ruchem drogowym. Sterowniki i systemy sterowania i nadzoru ruchu*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000.
13. Leško M., Guzik J.: *Sterowanie ruchem drogowym. Sygnalizacja świetlna i detektory ruchu pojazdów*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000.
14. Li Michael Z.F.: *Estimating congestion toll by using traffic count data – Singapore's area licensing scheme*. Transportation Research Part E 35 (1999) 1-10.
15. Mason S.J., Ribera P.M., Farris J.A., Kirk R.G.: *Integrating the warehousing and transportation functions of the supply chain*. Transportation Research Part E 39. 2003.
16. Plageman T., Goebel Vera at all.: *Using Data Stream Management Systems for Traffic Analysis. A Case Study*. Institut Eurecom, Corporate Communications. France.
17. Tracz M., Chodur J., Gaca S., Gondek S. i inni.: *MOP-R-04. Metoda obliczania przepustowości rond*. GDDKiA, Warszawa 2004.
18. Tracz M., Chodur J., Gaca S., Gondek S. i inni.: *MOP-SZS-04. Metoda obliczania przepustowości skrzyżowań z sygnalizacją świetlną*. GDDKiA, Warszawa 2004.
19. Wiederhold G.: *Information Systems that Really Support Decision-Making*. Journal of Intelligent Information Systems, 14, 85–94, 2000 Kluwer Academic Publishers.