

Symulacja ruchu drogowego: Symulacja ruchu samochodów na III Obwodnicy Krakowa.

Joanna Hankus, Konrad Kalita, Kamil Woźniak

Streszczenie

Celem poniższej pracy będzie problem zamodelowania i symulacji ruchu samochodów zarówno osobowych, jak i ciężarowych na III Obwodnicy miasta Krakowa. Ostateczna symulacja będzie dotyczyła analizy ruchu pojazdów, w momencie gdy nagle na drodze będzie znajdowało się dużo pojazdów, np. po zakończonym meczu piłkarskim.

Spis treści

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Wstęp | 2 |
| 1.1 | Opis problemu | 2 |
| 1.2 | Sposób realizacji w literaturze | 3 |
| | Model mikroskopowy | 3 |
| | Model makroskopowy | 5 |
| | Ograniczenia symulacji ruchu | 5 |
| 2 | Sposób realizacji | 6 |
| 2.1 | Architektura | 6 |
| 2.2 | Model Nagela-Schrekenberga | 6 |
| | Model Nagela-Schrekenberga dla naszych potrzeb | 7 |
| 2.3 | Algorytm | 7 |
| 2.4 | Opis techniczny | 9 |
| | Model N-Sch w kodzie | 9 |
| | Wizualizacja | 10 |
| 2.5 | Instrukcja obsługi | 10 |
| 3 | Wnioski z przeprowadzonej symulacji | 12 |
| 3.1 | Parametry symulacji | 12 |
| 3.2 | Wyniki | 12 |
| | Ilość pojazdów na obwodnicy | 12 |
| | Średnia prędkość pojazdów na obwodnicy | 13 |
| | Zależność między ilością pojazdów, a średnią prędkością | 13 |
| 3.3 | Wnioski | 14 |

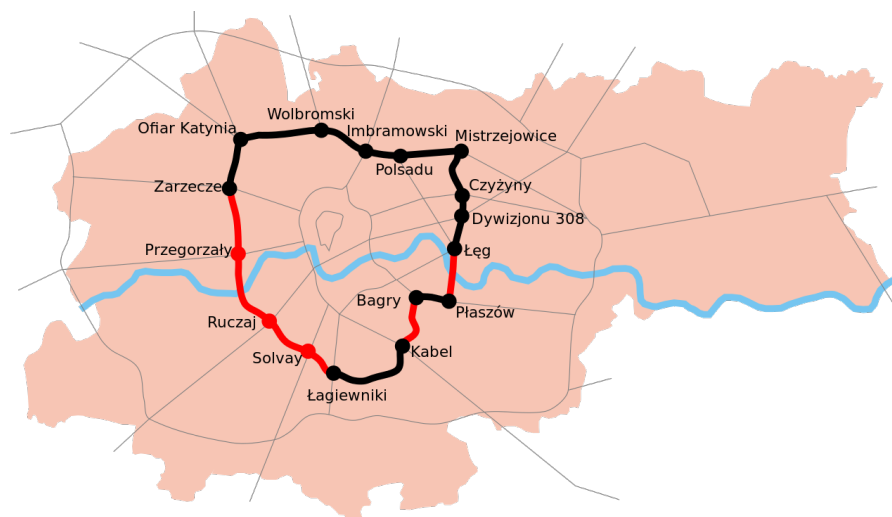
1 Wstęp

1.1 Opis problemu

W czasach kiedy pojazdy zmotoryzowane stały się najpopularniejszym środkiem transportu, a łatwość dostępu sprawiła, że statystycznie co drugi obywatel w Polsce ma swój samochód pojawiły się komplikacje, z którymi poprzednio nie trzeba było się mierzyć. Ilość ruchu zwiększa się nieproporcjonalnie do przepustowości dróg, dlatego problem korków i dużego natężenia jedynie się zwiększa. Jednym z rozwiązań jest wprowadzanie inteligentnych systemów sterowania ruchem, który analizując sytuację na drogach stara się kierować pojazdy w sposób jak najlepiej rozładowujący przeciążenia. Narzędziem praktycznie w tym niezbędnym są modele symulacji ruchu. Pozwalają nie tylko na zobrazowanie ogólnego poziomu ruchu w danym miejscu, ale również na przeprowadzenie eksperymentów niemożliwych lub trudnych do wykonania w rzeczywistości. Dzięki modelom można zaobserwować jak zamknięcie wybranych odcinków dróg wpłynie na przepływ pojazdów, gdzie pojawiają się przeciążenia, gdzie miejsca krytyczne. W razie konieczności umożliwia to wybranie odpowiedniego objazdu, dokonania odpowiednich modyfikacji w celu uniknięcia kumulacji ruchu. Celem poniższej pracy będzie problem zamodelowania i symulacji ruchu samochodów zarówno osobowych, jak i ciężarowych na III Obwodnicy miasta Krakowa tj. drodze otaczającej centrum Krakowa łącząca takie węzły jak: Rondo Ofiar Katynia, Mistrzejowice, Czyżyny. Aktualnie istnieje głównie północna część drogi, czyli mniej więcej połowa z zaprojektowanych ok. 30km obwodnicy.

Głównym problemem jest dopasowanie odpowiedniego modelu matematycznego oraz właściwe dobranie algorytmów takich jak sterowanie światłami. Modelowanie ruchu drogowego jest złożonym i skomplikowanym zadaniem. Model musi uwzględniać dynamikę pojazdów, rozróżnić typy samochodów oraz zamodelować ich trasę od początku do końca. Należy uwzględnić również takie czynniki jak losowe zachowania kierujących, wielkości odstępów między kolejnymi pojazdami oraz przykładowo warunki panujące na jezdni, czy też aktualne nasilenie ruchu. Model powinien zawierać zarówno wszystkie wjazdy i zjazdy z modelowanej drogi, istniejące skrzyżowania oraz powinien charakteryzować się określoną przepustowością na danych odcinkach. W skali mikroskopowej model powinien pokazać specyfikę ruchu różnych typów pojazdów, szerokość pasa ruchu oraz zmiany pasów ruchu przez pojazdy.

Naszym zadaniem jest stworzenie aplikacji z mapą Krakowa i naniesioną na niej symulacją obwodnicy. Dodatkowe informacje, które będzie dostarczać strona to średnia prędkość na obwodnicy, ilość pojazdów, przepustowość. Użytkownik powinien mieć możliwość zarządzania każdym czynnikiem. Będzie to pozwalało na przeprowadzenie teoretycznej symulacji zdarzenia i zobrazowanie jego konsekwencji – np.: zakorkowanie jednego z węzłów.



Rysunek 1. III Obwodnica Krakowa wraz z węzłami.

1.2 Sposób realizacji w literaturze

W tym rozdziale chcielibyśmy odnieść się do istniejących rozwiązań podobnych problemów. W wielu publikacjach istnieje wiele różnych rozwiązań i podejść do problemu modelowania ruchu. Modele symulacji ruchu zostały podzielone ze względu na szczegółowość i obejmowany obszar - mikroskopowe, makroskopowe i mezoskopowe, które łączą cechy dwóch poprzednich jak i ze względu na charakter obrazowanego ruchu – sterowanego światłami, bez sterowania, autostrada lub mieszanego. (Boxill i Yu 2000)

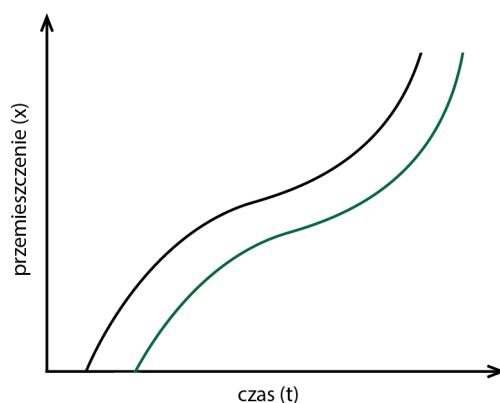
Model mikroskopowy

Model mikroskopowy opiera się na symulacji ruchu poszczególnych pojazdów występujących na drodze. Dotyczy jednostki indywidualnego kierowcy-pojazdu (ang. individual driver-vehicle unit – DVU). (Hoogendoorn 2010) Modele mikroskopowe służą do przetwarzania szczegółowych danych takich jak przepływ pojazdów, indywidualna prędkość pojazdu, czas podróży, opóźnienia, tworzenie się zatorów, miejsca przerwania ciągłości poruszania się, zużycie paliwa, przestrzeń między pojazdami wyrażana w czasie i odległości (ang. time-, distance- headways). W rzeczywistości obiekt – pojazd opisany jest trzema współzrędnymi, opisującymi jego konkretne położenie w trójwymiarowej przestrzeni. W modelach symulacji ruchu współzrędnym zwykle nie opisują dokładnie pozycji pojazdu, a jedynie jego względne położenie na drodze. Z tego wynika że X opisuje pozycję na długości drogi skierowaną zgodnie z kierunkiem ruchu, a Y na szerokości drogi – może się odnosić np.: do nr pasa ruchu, dla dróg wielopasmowych. (Hoogendoorn 2010)

Typowe techniki analityczne bazujące na mikroskopowych danych i teoriach to modelowanie zarządzaniem przestrzenią między pojazdami i modele symulacji mikroskopowych. W odróżnieniu od nich makroskopowe charakterystyki dotyczą właściwości przepływu ruchu jako całości – gęstość ruchu, średnia prędkość, czy średnia odległość między pojazdami. (Hoogendoorn 2010)

Poniżej przedstawione są wybrane modele mikroskopowe:

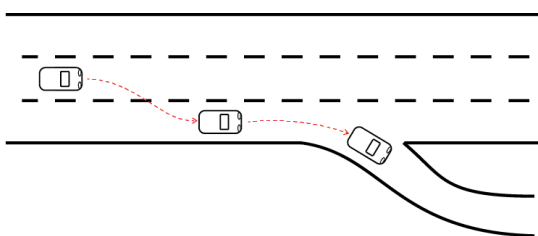
1. Model Newell'a (car-following model) – model zakłada, że pojazd będzie utrzymywać minimalną odległość i czas (ang. time-, distance- headways) do pojazdu znajdującego się bezpośrednio przed nim. Wynika z tego, że jeśli pojazd z przodu zmieni prędkość pojazd podążający również ją zmieni – z pewnym opóźnieniem przekazując i multiplikując w ten sposób zaburzenie – ang. traffic wave. (Wikipedia 2017)



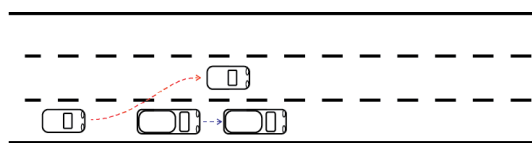
Rysunek 2. Schemat obrazujący model Newell'a.

Wykres pokazuje przemieszczenie się w czasie pojazdu przewodniego (kolor czarny) i przesunięty w czasie ruch naśladujący pojazdu podążającego (kolor zielony). Jest to sytuacja idealna, zwykle bowiem kierowcy podążającemu nie udaje się reagować na zmianę prędkości pojazdu z przodu identyczną zmianą – odległość między nimi może rosnąć lub maleć.

2. Model zmieniania pasów – symuluje podejmowanie decyzji kierowcy o zmianie pasa w wyznaczonym czasie. Konieczna zmiana pasa wynika z celu podróży i jest potrzebna by cel osiągnąć; np.: zjechać na odpowiedni wyjazd. Opcjonalna zmiana pasa, to taka, która nie jest konieczna, ale ułatwia i upłynnia jazdę; np.: umożliwia wyprzedzenie. (Nasuha 2018)

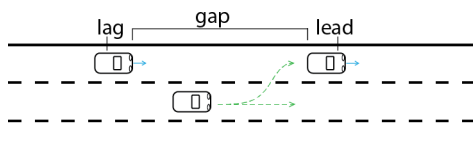


Rysunek 3. Konieczna zmiana pasa.



Rysunek 4. Opcjonalna zmiana pasa.

3. Gap acceptance model – luka to przestrzeń między pojazdem z przodu (ang. lead), a z tyłu (ang. lag) na sąsiednim pasie pojazdu którego zachowanie jest modelowane. Model ma za zadanie przybliżyć wystarczającą wielkość luki, aby kierowca podjął decyzję o bezpiecznym włączeniu się między dwa pojazdy. Parametrami ważnymi podczas symulacji są poszczególne prędkości pojazdów, widoczność, prędkość pożądana – taka jaką kierowca chce rozwinąć, czas manewru, przyspieszenie pojazdu zmieniającego pas. (Nasuha 2018)



Rysunek 5. Schemat momentu podjęcia decyzji o wjechaniu w lukę.

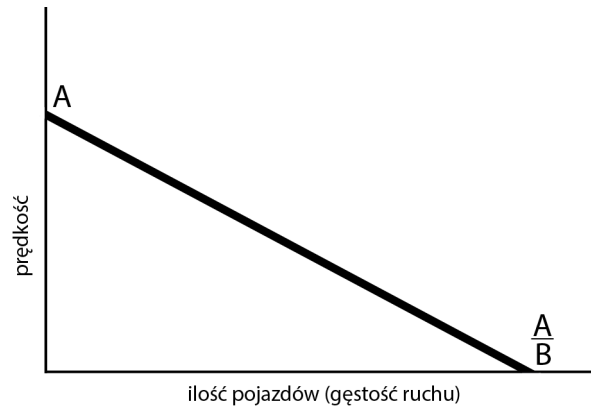
Model makroskopowy

Modele makroskopowe mają za zadanie obrazować ogólne informacje dotyczące ruchu – głównie przepływ, średnią prędkość, czy gęstość (ew. ilość) samochodów. Nie rozpatruje pojazdów indywidualnie, ale ruch drogowy jako całość. W wyniku badań powstały różne matematyczne modele uwzględniające wzajemne zależności między przepływem, prędkością a gęstością ruchu. Dwa z nich to model Greenshield'a oraz model Greenberg. (Nasuha 2018) Pierwszy z nich pokazuje, że zależność między prędkością a ilością pojazdów jest liniowa.

$$v = A - B * k$$

gdzie v = prędkość, A, B = stałe, k = gęstość

Stała A to prędkość niczym nie ograniczonych pojazdów, a A/B to gęstość korków.



Rysunek 6. Wykres Greenshielda.

Ograniczenia symulacji ruchu

(Smartest, 1997 – www.leeds.ac.uk)

1. Zatory w ruchu – większość modeli przetwarza tylko podstawowe zasady poruszania się; podążanie za pojazdem (following-car) oraz zmianę pasów. Przy zatorowanej drodze, przy dużym nasileniu ruchu może to nie wystarczyć by realistycznie oddać zachowanie kierowców.
2. Potrzeba zgodności z innymi modelami – Modele symulacji są często używane razem z innymi. Dzielą wspólne dane, np.: wejściowe, jednak mają zapisane je w różnych formatach co wymusza konwersję.
3. Ocena bezpieczeństwa – Zwykle modele są bardzo ubogie jeśli chodzi o uwzględnianie bezpieczeństwa na drodze. Ograniczają się do narzucenia pojazdom maksymalnej dopuszczalnej prędkości albo bezkolizyjną zmianę pasów, jednak nie biorą pod uwagę użytkowników najbardziej narażonych, takich jak pieszych lub rowerzystów.

2 Sposób realizacji

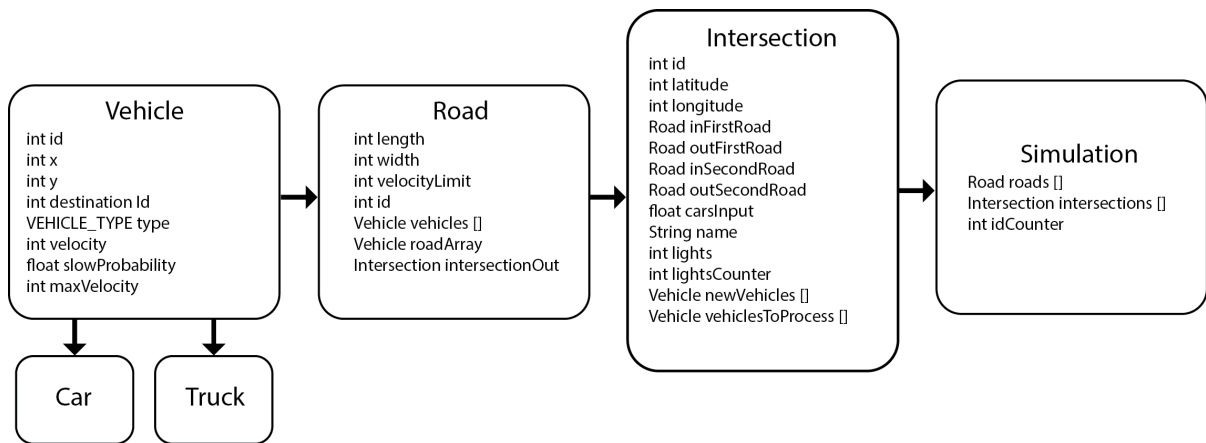
2.1 Architektura

Program oparty jest na kaskadowej architekturze. Każda z klas przechowuje obiekty klasy podrzędnej. Klasa **Vehicle** jest podstawową jednostką, a jej instancje obrazują komórki w modelu Nagela-Schreckenberga. Każdy pojazd ma swój numer identyfikacyjny oraz id celu, bieżącą i maksymalną prędkość oraz prawdopodobieństwo z jakim może zwalniać (imitacja nieprzewidywalnego zachowania kierowcy).

Klasa **Road** przechowuje tablicę pojazdów, które w danym momencie znajdują się na drodze. Funkcja **Road.update()** odpowiada za zmianę prędkości pojazdu, zmianę ich pozycji na drodze, oraz zapobieganiu kolizji. Klasa dostarcza również możliwości zmiany pasu ruchu na lewy lub prawy. Droga ma swój nr identyfikacyjny, szerokość (ilość pasów), długość, ograniczenie prędkości oraz info z jakim skrzyżowaniem jest połączona.

Klasa **Intersection** obrazuje skrzyżowanie dwóch dróg. Każde ze skrzyżowań ma swój numer, pozycje na mapie – długość i szerokość geograficzną i informację o drogach które do niego wchodzi oraz wychodzą. Funkcja **Intersection.update()** odpowiada za przetwarzanie pojazdów które znajdują się już na obwodnicy i przyjechały z drogi wchodzącej oraz przekierowanie ich na drogę wychodzącą lub usunięcie, jeśli pojazd osiągnął skrzyżowanie docelowe. Funkcja również generuje z określonym prawdopodobieństwem nowe pojazdy (symulacja wjeżdżania pojazdów na obwodnicę w tym miejscu). Steruje również światłami, co powoduje odpowiednio zatrzymanie lub wznowienie ruchu oraz tworzenia pojazdów.

Klasa **Simulation** ustawia całą symulację. Tworzy wszystkie instancje dróg oraz skrzyżowań. Funkcja **Simulation.update()** odpowiada za wywołanie funkcji **update** z klas podrzędnych **Road** oraz **Intersection** dla każdej istniejącej drogi i skrzyżowania. Zarządza również generowaniem pojazdów na każdym ze skrzyżowań.



Rysunek 7. Struktura programu.

2.2 Model Nagela-Schreckenberga

Model **Nagela-Schreckenberga** – jest to tzw. automat komórkowy, którego pierwotnym zastosowaniem było modelowanie ruchu pojazdów na autostradach, jednak jako baza do zadania modelowania ruchu na obwodnicy powinien jak najbardziej się nadać. Jest to model mikroskopowy co oznacza, że odwzorowuje ruch i zachowania poszczególnych pojazdów, np. takie jak zmiana pasa ruchu przez pojazd w celu optymalnego pokonania odcinka drogi, oraz zachowuje odpowiednie odległości między pojazdami.

W modelu Nagela-Schreckenberga każda komórka odpowiada długości $d = 7.5m$, natomiast prędkość każdego pojazdu definiujemy jako ilość komórek pokonanych przez pojazd w określonej jednostce czasu, a model jest

opisywany przez szereg reguł, które opisują przyspieszenie, hamowanie oraz odległości między pojazdami. (J.Wąs i inni 2009).

Model Nagela-Schreckenberga dla naszych potrzeb

Jak już wcześniej wspomnieliśmy model Nagela-Schreckenberga opisuje ruch pojazdów po autostradzie – na jego podstawie jednak powstała spora ilość modeli służących do opisu ruchu miejskiego, np. model Essena i Schreckenberga, który wprowadził regułę zmiany pasa ruchu na podstawie określenia ilości wolnego miejsca między kolejnymi pojazdami.

Podstawową wadą modelu Nagela-Schreckenberga jest jego niedokładność dla pojedynczych pojazdów. Ruch miejski rządzi się nieco innymi prawami, niż ruch autostradowy – w mieście cały czas dochodzi do hamowań i przyspieszeń – przeciwnie do autostrady, gdzie stale utrzymuje się podobną prędkość.

W udoskonalonym modelu przyspieszenie, jak i hamowanie pojazdu powinno przebiegać płynniej, tzn. przyspieszenie powinno przyjmować mniejsze wartości niż w modelu bazowym, gdzie właśnie ten parametr mógł znacznie odbiegać od rzeczywistości. Ponadto hamowanie powinno następować stopniowo przed przeszkodą i innymi pojazdami.

Proponowanym rozwiązaniem jest rozciągnięcie modelu pojazdu, na kilka kratek modelowanej drogi (J.Wąs i inni 2009). Ruch pojazdu symulowany poprzez przypisanie każdemu pojazdowi pojedynczej komórki oraz wartości odpowiadającej prędkości. Zmienianie pasa ruchu będzie obrazowane poprzez przeskoczenie do odpowiedniej komórki w bok (prawej lub lewej, prostopadłej do kierunku jazdy) oraz o odpowiednią ilość komórek do przodu – sama decyzja jest podejmowana przez odpowiedni algorytm bazujący na wolnych miejscach między kolejnymi pojazdami z określonym prawdopodobieństwem. Prawdopodobieństwo zmiany pasa ruchu powinno zależeć zarówno indywidualnie od pojazdu (wolniejsze przyspieszanie oraz dłuższa droga hamowania dla samochodów ciężarowych), ale także od prędkości pojazdu zmieniającego pas, prędkości pojazdu poprzedzającego znajdującego się na opuszczanym pasie, prędkości najbliższego pojazdu na pasie docelowym oraz odległości między pojazdami.

Uproszczeniem przyjętym w modelu będzie zmiana prędkości podczas przyspieszania co 1 w każdej sekundzie ruchu (7.5m/s), gdzie prędkość to liczba przebywanych komórek w sekundzie. W czasie hamowania zmiana prędkości może być większa bądź równa 1 – w rzeczywistości wartość przyspieszenia pojazdów maleje wraz ze wzrostem prędkości – w oryginalnym modelu Nagela-Schreckenberga przyspieszenie mogło osiągać bardzo wysokie, niemożliwe wartości.

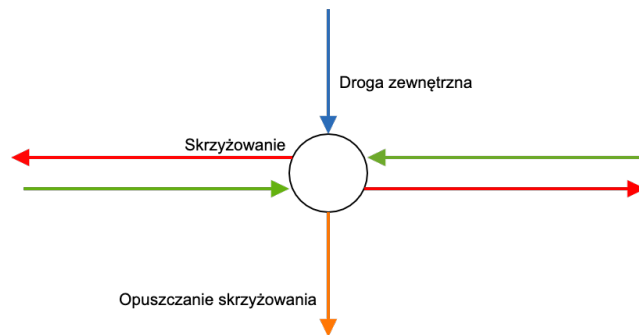
Prędkość maksymalna pojazdów w naszym modelu powinna uwzględniać wszelkie ograniczenia prędkości, prędkości pojazdów poprzedzających oraz każdą możliwą przeszkodę, np. zwężenie dróg oraz skrzyżowania. Zwalnianie pojazdu, czyli ich aktualną prędkość możemy opisywać jako funkcję odległości od przeszkody przed nim.

2.3 Algorytm

Najprościej sieć dróg możemy modelować jako graf - najlepiej jako graf skierowany, gdzie poszczególne krawędzie to jednokierunkowe odcinki drogi, natomiast wierzchołki grafu to nic innego jak skrzyżowania.

Będziemy definiować tylko odpowiednie wejścia i wyjścia ze skrzyżowań – oznacza to, że nie będziemy modelować ruchu pojazdów na skrzyżowaniu. Do poszczególnych skrzyżowań pojazdy będą napływać z drogi (krawędzi grafu) bezpośrednio podłączonej do wierzchołka oraz z dróg zewnętrznych – aby to symulować musimy ustalić

dla każdego węzła ilości generowania nowych pojazdów.



Rysunek 8. Schemat skrzyżowania.

Każdy pojazd znajdujący się wewnątrz grafu musi gdzieś jechać – musi mieć obrany cel, dlatego będziemy dla każdego samochodu na obwodnicy definiować z określonym prawdopodobieństwem jego cel podróży, czyli docelowe skrzyżowanie, na którym opuści obwodnicę. Pojazd, którego cel podróży będzie taki sam jak identyfikator wierzchołka, zostanie usunięty z grafu.

Algorytm ruchu sprowadzić można do sześciu podstawowych kroków:

1. [Podjęcie decyzji o zmianie pasa](#)
2. [Zmiana pasa na lewy](#)
3. [Zmiana pasa na prawy](#)
4. [Obliczenie prędkości](#)
5. [Uwzględnienie losowości](#)
6. [Ruch](#)

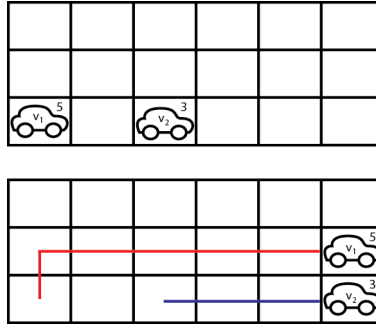
(J.Wąs i inni 2009).

Pojazd podejmuje decyzję o zmianie pasa na lewy (wyprzedzanie) jeżeli pojazd przed nim znajduje się w odległości $d_0 \leq v_1 - v_2$, gdzie $v_1 > v_2$. Zapobiega to kolizji w kolejnej turze ruchu. Po podjęciu decyzji następuje przeskok o jedną komórkę w lewo prostopadle do kierunku jazdy, i o odpowiadającą prędkości pojazdu ilość komórek do przodu. Tam następuje kolejne sprawdzenie czy nie wystąpi kolizja i ewentualne przedłużenie manewru na kolejny pas w lewo.

Jeśli pojazd znajduje się na skrajnie lewym pasie i ma możliwość (prawy pas jest pusty), w kolejnych iteracjach powróci na prawo. W domyśle pojazdy dążą do osiągnięcia maksymalnej dozwolonej prędkości na danym odcinku drogi, czyli ok. 80 km/h na III Obwodnicy.

Do hamowania dochodzi, jeżeli pojazd nie ma możliwości wykonania manewru zmiany pasa, a pojazd znajdujący się przed nim jedzie z mniejszą prędkością, pojazd zwolni zgodnie ze wzorem $v_k = v_1 - v_2 + d$, gdzie

$v_1 > v_2$, a d to ilość pustych komórek między pojazdami.



Rysunek 9. Wizualizacja manewru zmiany pasa, na podst. (J.Wąs i inni 2009)

Oprócz hamowania wynikającego z mechanizmu unikania kolizji, model uwzględnia również przypadkowe, nieuzasadnione zwalnianie, które może pojawić się w rzeczywistości, a jest spowodowane zachowaniem kierowcy. Uwzględnienie czynnika ludzkiego – zmęczenie, lęk przed dużą prędkością, uwarunkowanie psychiczne, rozproszenie uwagi, długi czas potrzebny na podjęcie decyzji – wymaga wprowadzenia czynnika losowego – zmiennej o zadanym prawdopodobieństwie zdarzenia. Sam ruch odbywa się na prostej zasadzie – prędkość pojazdu odzwierciedla ilość komórek przebywanych w czasie jednej iteracji, w projekcie – $l[s]$.

2.4 Opis techniczny

Model N-Sch w kodzie

Uproszczenie opisujące ruch pojazdu:

Decyzja o wyprzedzaniu:

```
1 Dla ( i = pojazd_poz_X + 1; i < dlugosc_drogi){
2   odleglosc = nast_pojazd_poz_X - pojazd_poz_X -1}
3 Jesli odleglosc != 0 i pojazd_predkosc > odleglosc - 1, to zmien_pas_na_lewy, jesli nie
   to zmien pojazd_predkosc = odleglosc -1;
4 Jesli pojazd w ruchu to zmien pas na prawy.
```

Zmiana pasa na lewy:

```
1 0 < pop_pojazd_poz_X < pojazd_poz_X oraz pop_pojazd_poz_Y = pojazd_poz_Y-1;
2 pojazd_poz_X < nast_pojazd_poz_X < dlugosc_drogi oraz nast_pojazd_Y = pojazd_poz_Y-1;
3 Jesli pop_pojazd_predkosc < pojazd_poz_X - pop_pojazd_poz_X -1
4 oraz Jesli pojazd_predkosc < nast_pojazd_poz_X - pojazd_poz_X -1, to zmien pas na Y-1 (
   lewy).
```

Zmiana pasa na prawy:

```
1 0 < pop_pojazd_poz_X < pojazd_poz_X oraz pop_pojazd_poz_Y = pojazd_poz_Y+1;
2 pojazd_poz_X < nast_pojazd_poz_X < dlugosc_drogi oraz nast_pojazd_Y = pojazd_poz_Y+1;
3 Jesli pop_pojazd_predkosc < pojazd_poz_X - pop_pojazd_poz_X -1
4 oraz Jesli pojazd_predkosc < nast_pojazd_poz_X - pojazd_poz_X -1, to zmien pas na Y+1 (
   prawy).
```

Wyliczenie prędkości:

```
1 Jesli pojazd_predkosc > limit_predkosci, to zmien pojazd_predkosc = limit_predkosci.
```

Uwzględnienie losowości:

```
1 Jesli pojazd_wsp_prawdop > Math.random(), to zwolnij.
```

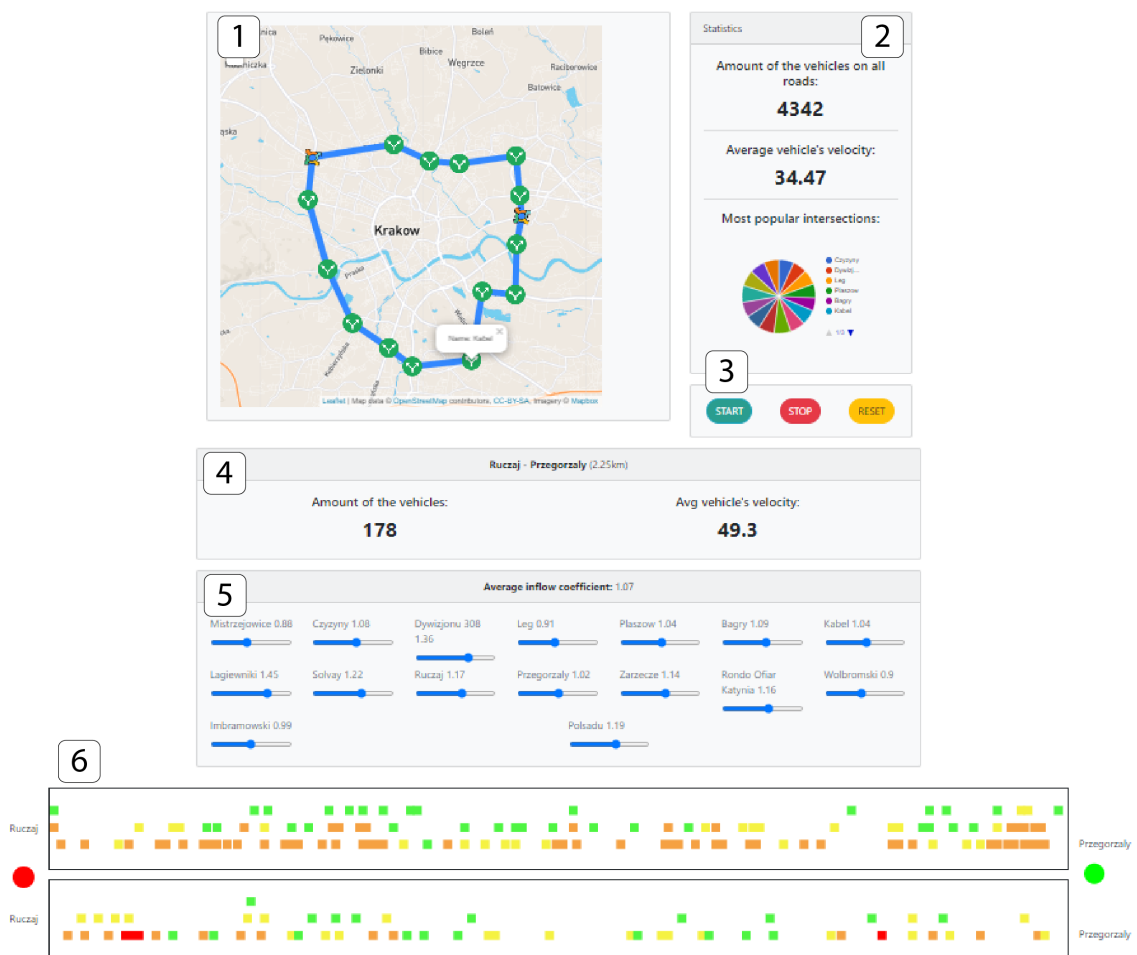
Ruch:

```
1 Dla (x = 0; x < dlugosc_drogi){  
2 pojazd_poz_X = pojazd_poz_X + pojazd_predkosc.}
```

Wizualizacja

Do wizualizacji obwodnicy osadzonej na mapie została użyta biblioteka <Leaflet>. Do dokładnego naniesienia węzłów zostały użyte ich współrzędne geograficzne. Każda droga została wygenerowana jako odcinek, którego początek i koniec to odpowiednie węzły. Taka interpretacja dróg pozwoliła na przedstawienie jeszcze nie istniejących fragmentów Obwodnicy. Do symulacji ruchu na konkretnej drodze użyliśmy <Canvas API>. Obiekty są rysowane na podstawie wartości w tablicach przechowujących pozycje pojazdów na konkretnej wybranej drodze.

2.5 Instrukcja obsługi



Rysunek 10. Zrzut ekranu okna symulacji.

Okno symulacji zawiera sześć głównych elementów.

1. Interaktywna mapa Krakowa z zaznaczonym schematem III Obwodnicy wraz z wyróżnionymi węzłami i rondami – pozwala na przybliżanie i oddalanie oraz podstawową nawigację na mapie, po kliknięciu w wybrany

fragment dostępne są jego statystyki.

2. Informacje ogólne – ilość pojazdów na całej obwodnicy, średnia prędkość oraz diagram kołowy przedstawiający udział poszczególnych węzłów w ruchu.
3. Podstawowe sterowanie symulacją – przyciski START, STOP, RESET.
4. Statystyki wybranego odcinka – liczba pojazdów oraz średnia prędkość.
5. Szczegółowe sterowanie symulacją – szesnaście suwaków zmieniających *inflow coefficient* - współczynnik generowania samochodów - na konkretnym węźle.
6. Schematyczna wizualizacja ruchu na wybranym odcinku obwodnicy – Jedna zakolorowana kratka odpowiada jednemu pojazdowi. Kolory oznaczają trzy prędkości. Zielony – 3 kratki na sekundę (81 km/h), żółty – 2 kratki/s (54 km/h), pomarańczowy 1 kratkę/s (27 km/h), czerwony – 0 kratek/s; postój. Z boków dwa symboliczne sygnalizatory świetlne. Pracują automatycznie, jednak jest możliwa manualna zmiana światła poprzez kliknięcie w wybraną ikonę.

3 Wnioski z przeprowadzonej symulacji

Symulacja miała na celu analizę ruchu pojazdów, w momencie gdy nagle na drodze znajdzie się dużo pojazdów. Symulowana sytuacja to przykładowe zachowanie się pojazdów po zakończonym wydarzeniu na Tauron Arenie w Krakowie przy ulicy Stanisława Lema – większość samochodów uda się zapewne na węzły Czyżyny i Rondo Dywizjonu 308. Analiza wyników została przeprowadzona w środowisku Jupyter przy użyciu takich narzędzi jak pandas, numpy oraz seaborn.

3.1 Parametry symulacji

Początkowo współczynnik `inflow coefficient` został ustawiony dla każdego węzła na wartość 0.25 w celu stopniowego i równomiernego rozmieszczenia niewielkiej ilości pojazdów na całej drodze – etap 1. Taka wartość obowiązywała do chwili przekroczenia wartości 1000 pojazdów poruszającej się na całej obwodnicy. W tym momencie wartość `inflow` została podniesiona do maksymalnego poziomu 2.0 na węzle Czyżyny i Rondo Dywizjonu 308, co w efekcie dla całej obwodnicy dało wartość `inflow coefficient` równą 0.47 – etap 2.

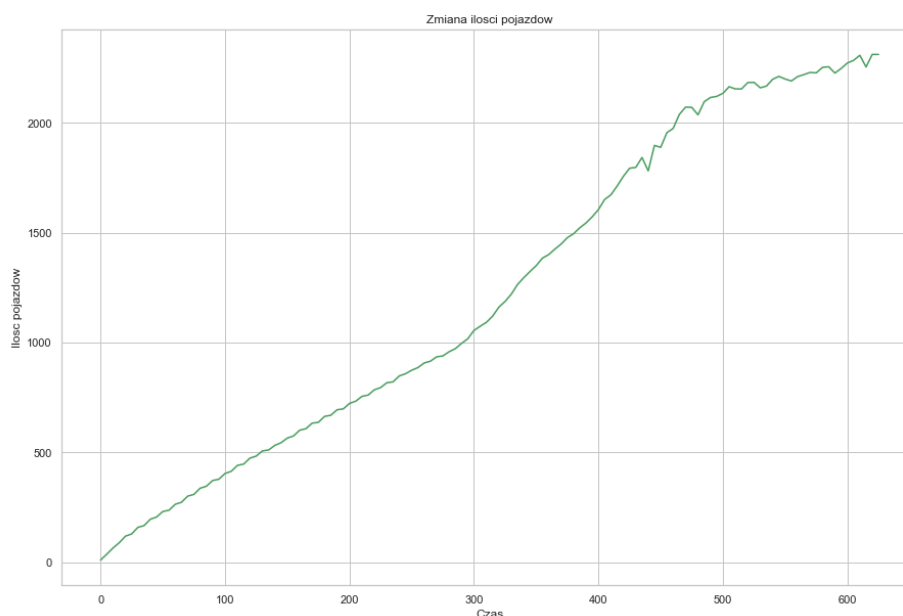
Takie parametry były utrzymywane następnie przez około 150 iteracji modelu – co miało symulować nagłe zwiększenie ruchu w tym rejonie miasta, a następnie z powrotem obniżone do bazowego poziomu 0.25 – etap 3. W efekcie liczba pojazdów na całej obwodnicy wzrosła niemalże dwukrotnie przekraczając pułap 2000, a kolejne pojazdy stale napływały do ruchu.

3.2 Wyniki

W wyniku przeprowadzonej symulacji otrzymaliśmy wartości średniej prędkości i ilości pojazdów na III Obwodnicy Krakowa, w modelowanej sytuacji możemy zaobserwować nagły wzrost liczby pojazdów i stopniowy spadek prędkości.

Ilość pojazdów na obwodnicy

Ilość pojazdów w pierwszym etapie symulacji rosła powoli aż do momentu zwiększenia `inflow coefficient` na wyróżnionych węzłach. Na poniższym wykresie możemy zaobserwować zmianę nachylenia wykresu ilości pojazdów od czasu:



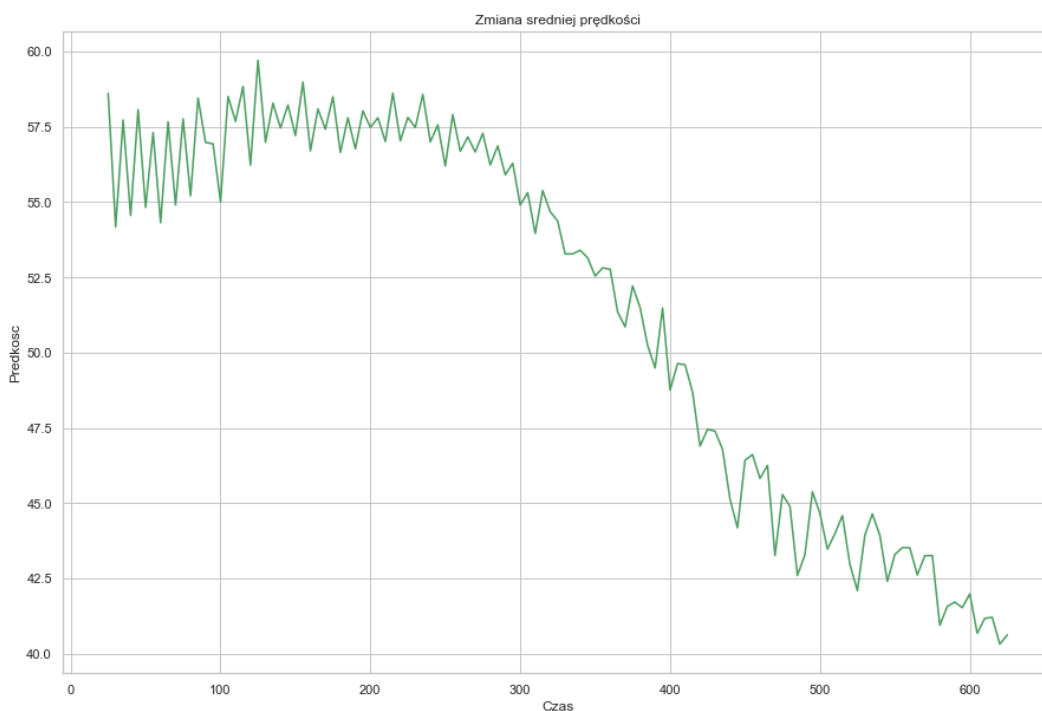
Rysunek 11. Zmiana ilości pojazdów na III Obwodnicy Krakowa.

Na powyższym wykresie widzimy, że po przekroczeniu wartości 1000 pojazdów na obwodnicy nachylenie wykresu widocznie się zmienia – widać, że współczynnik *inflow coefficient* musiał widocznie ulec zmianie co idealnie możemy zaobserwować.

Ciekawe jest zachowanie pojazdów po powrocie do parametrów początkowych (etap 3). Mimo zmiany *inflow coefficient* na wartość 0.25 to zakolejkowane pojazdy nadal wjeżdżały na skrzyżowania, przez co ilość pojazdów mogła nadal w sporym tempie wzrastać – możemy to ilustrować jako zakorkowane skrzyżowania. Natomiast po około 500 iteracjach niektóre pojazdy osiągnęły już swój punkt docelowy i opuściły modelowaną drogę, dlatego też zaczęły pojawiać się niewielkie oscylacje w ilości pojazdów.

Średnia prędkość pojazdów na obwodnicy

Na początek przyjrzymy się wykresowi jak w czasie wraz ze zmianami etapów symulacji zmieniała się średnia prędkość pojazdów:



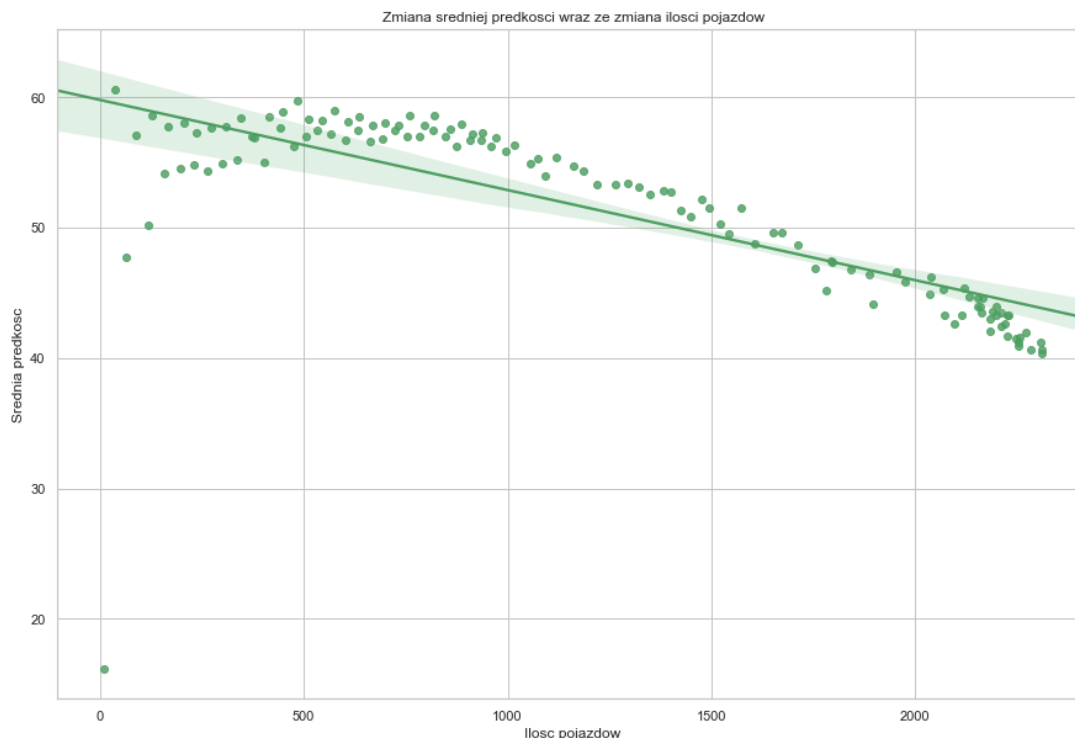
Rysunek 12. Zmiana średniej prędkości pojazdów na III Obwodnicy Krakowa.

Na powyższym wykresie możemy zaobserwować, że w pierwszym etapie ze względu na początkową niewielką ilość samochodów wariacje średniej prędkości są spore, jednakże mają trend spadkowy. W kolejnym etapie, gdzie zwiększamy współczynnik *inflow coefficient* widzimy, że średnia prędkość gwałtownie zaczyna spadać – pojawiają się pierwsze korki, na drogach bezpośrednio przyległych do *Czyżyn* i *Ronda Dywizjonu 308* pojawia się coraz więcej pojazdów, a co za tym idzie średnia prędkość musi zacząć spadać. Cała ta sytuacja ma wpływ w trzecim etapie. Średnia prędkość spada oddziałując kaskadowo na kolejne drogi, jednak ten proces nie już tak szybki jak to było w drugim etapie.

Zależność między ilością pojazdów, a średnią prędkością

Wedle założenia średnia prędkość powinna spadać liniowo wraz z ilością pojazdów. W modelowanej sytuacji wraz z nagłym wzrostem ilości pojazdów na dwóch węzłach komunikacyjnych proces spadku prędkości będzie nieco opóźniony. Zakorkują się drogi bezpośrednio do nich przyległe, na których prędkość drastycznie spadnie,

a dopiero później korki przeniosą się na kolejne ulice:



Rysunek 13. Zmiana średniej prędkości pojazdów wraz ze zmianą ilości pojazdów.

Na powyższym wykresie możemy zauważyć trend spadkowy zgodny z założeniem. Średnia prędkość spada, jednakże widzimy, że po przekroczeniu pułapu 2000 pojazdów (czyli w trzecim etapie) prędkość, jak i ilość pojazdów zaczyna się lekko normować – niektóre pojazdy opuszczają już drogę, dlatego też ich ilość nie rośnie ale czasami jak mogliśmy się wcześniej przekonać nawet spada.

Obie wartości, prędkości i ilości pojazdów są ze sobą, tak jak widać w dosyć dużym stopniu skorelowane – współczynnik korelacji wynosi niemalże 74%, co prawda nie jest to liniowa zależność, ale można zauważyć tutaj związek między tymi dwoma parametrami.

3.3 Wnioski

Dla przeprowadzonej symulacji i wprowadzonych parametrów otrzymaliśmy satysfakcjonujące rezultaty pokazujące zachowanie się pojazdów w makroskali w chwili nagłego obciążenia drogi oraz udało nam się zaobserwować zależności między ilością pojazdów, a ich średnią prędkością.

Dodatkowo, analizując wartości średniej prędkości i ilości pojazdów na kolejnych odcinkach dróg, doszliśmy do wniosku, obciążenie dróg rozkłada się stopniowo na całej długości obwodnicy w chwili jej nagłego obciążenia.

Bibliografia

Boxill, S. A., i L. Yu. 2000. "An Evaluation of Traffic Simulation Models for Supporting ITS Development".

Hoogendoorn, S. P. 2010. "Traffic Flow Theory and Simulation".

J.Wąs, R.Bieliński, B.Gajewski i P.Orzechowski. 2009. "Problematyka modelowania ruchu miejskiego z wykorzystaniem automatów komórkowych".

Nasuha, N. 2018. "Overview Of Application Of Traffic Simulation Model".

Wikipedia. 2017. "en.wikipedia.org/wiki/Newell".