VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ
FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

RIADENIE SEMAFÓROV NA SKUPINE KRIŽOVATIEK

TRAFFIC LIGHT CONTROL FOR A GROUP OF CROSSROADS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE RADOSLAV KALETA
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. JAROSLAV ROZMAN, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2016

Vysoké učení technické v Brně - Fakulta informačních technologií

Ústav inteligentních systémů Akademický rok 2015/2016

Zadání bakalářské práce

Řešitel: **Kaleta Radoslav**
Obor: Informační technologie
Téma: **Řízení semaforů na skupině křižovatek**
Traffic Light Control for a Group of Crossroads
Kategorie: Umělá inteligence

Pokyny:

1. Seznamte se s pravidly pro řízení křižovatek a s různými typy detektorů vozidel. Nastudujte problematiku synchronizace řízení jednotlivých křižovatek.
2. Navrhněte program pro synchronizované řízení křižovatek. Berte v úvahu počty vozidel detekované pomocí detektorů a zakomponujte synchronizaci i do křižovatek bez detektorů.
3. Navržený program implementujte. Využijte již hotový Simulátor MHD linek v Brně.
4. Program otestujte a navrhněte další vylepšení.

Literatura:

- František Němec: Simulátor MHD linek v Brně, bakalářská práce, Brno, FIT VUT v Brně, 2014

Pro udělení zápočtu za první semestr je požadováno:

- První dva body zadání.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování bakalářské práce naleznete na adrese http://www.fit.vutbr.cz/info/szz/

Technická zpráva bakalářské práce musí obsahovat formulaci cíle, charakteristiku současného stavu, teoretická a odborná východiska řešených problémů a specifikaci etap (20 až 30% celkového rozsahu technické zprávy).

Student odevzdá v jednom výtisku technickou zprávu a v elektronické podobě zdrojový text technické zprávy, úplnou programovou dokumentaci a zdrojové texty programů. Informace v elektronické podobě budou uloženy na standardním nepřepisovatelném paměťovém médiu (CD-R, DVD-R, apod.), které bude vloženo do písemné zprávy tak, aby nemohlo dojít k jeho ztrátě při běžné manipulaci.

Vedoucí: **Rozman Jaroslav, Ing., Ph.D.**, UITS FIT VUT
Datum zadání: 1. listopadu 2015
Datum odevzdání: 18. května 2016

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta informačních technologií
Ústav inteligentních systémů
612 66 Brno, Božetěchova 2

L.S.

doc. Dr. Ing. Petr Hanáček
vedoucí ústavu

Abstrakt

Práca je zameraná na riadenie skupiny križovatiek pomocou svetelnej signalizácie. Táto skupina obsahuje niekoľko križovatiek so senzormi, ktoré sú následne schopné riadiť aj susedné križovatky so SSZ. Riadnie je založené na systéme TAPIOCA, ktorý spadá pod systémy dynamického riadenia. Tento systém je implementovaný do existujúceho dopravného simulátoru, ktorý bol vytvorený ako bakalárska práca na FIT VUT v Brne.

Abstract

This thesis is focused on the control of intersections with traffic lights. These group of intersections include several crossroads with sensors, which are able to conrol the adjacent intersections. Control is based on a system called TAPIOCA that falls under dynamic systems. The control system is implemented into existing traffic simulator, which was created as a bachelor thesis at FIT BUT.

Klíčová slova

riadenie dopravy, svetelné signalizačné zariadenie, telematika, TAPIOCA, dopravný senzor

Keywords

traffic control, traffic light, telematics, TAPIOCA, traffic sensor

Citace

KALETA, Radoslav. *Riadenie semafórov na skupine križovatiek.* Brno, 2016. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Rozman Jaroslav.

Riadenie semafórov na skupine križovatiek

Prohlášení

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne pod vedením pana Ing. Jaroslava Rozmana, Ph.D. Uviedol som všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.

. . . . . .
Radoslav Kaleta
17. května 2016

Poděkování

Za pomoc pri tvorbe bakalárskej práce by som chcel poďakovať pánu Ing. Jaroslavovi Rozmanovi, Ph.D. za kozultácie a konštruktívne pripomienky. Ďalej chcem poďakovať Františkovi Němcovi za konzultácie ohľadne implementácie simulátoru, do ktorého som implementoval riadenie svetelnej signalizácie.

© Radoslav Kaleta, 2016.
Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.

Obsah

1 Úvod **3**

2 Riadenie dopravy **4**
2.1 Inteligentný dopravný systém 4
2.1.1 Informovanie vodičov 5
2.1.2 Park & Ride 5
2.2 Technické prostriedky 5
2.2.1 Senzory 6
2.2.2 Aktívne prvky - aktory 7
2.3 Riadenie dopravného (cestného) uzlu 7
2.4 Riadenie dopravnej siete 8
2.4.1 Adaptívna metóda riadenia 9
2.4.2 Zelená vlna 10
2.4.3 Preferencia MHD 10
2.5 TAPIOCA 11
2.5.1 Ovládanie svetelnej signalizácie 11

3 Návrh signálneho plánu **13**
3.1 Fázová schéma 13
3.1.1 Medzičasy 13
3.1.2 Dĺžka cyklu 14
3.1.3 Signál voľno 14
3.1.4 Signálny plán pre samostanú križovatku, podľa systému TAPIOCA . 15
3.1.5 Signálny plán pre sieť križovatiek, podľa systému TAPIOCA 15

4 Simulátor MHD linek v Brně **17**
4.1 Analýza simulátoru 17
4.2 Analýza implementácie 18
4.2.1 Bunka 18
4.2.2 Cesta 18
4.2.3 Semafóry a križovatky 19

5 Návrh riešenia **20**

6 Implementácia **21**
6.1 Zavedenie senzorov 21
6.1.1 Trieda `Class Sensor` 21
6.2 Zavedenie agregátorov 22

6.2.1 Trieda `Class Agregator` 22
6.3 Riadenie semafórov 23
6.4 Výsledky riadenia 25

7 Záver **28**

Literatura **29**

Přílohy **30**
Seznam příloh 31

A Obsah CD **32**

Kapitola 1

Úvod

Svetelné signalizačné zariadenia (SSZ) sú súčasťou riadenia dopravy už od začiatku 20. storočia. V prvej polovici 20. storočia sa dostali do podoby ako poznáme dnes. Ako narastal objem dopravy, zvyšoval sa počet kongescií čo malo neblahý vplyv nielen na ekonomiku, ale aj na životné prostredie formou výfukových plynov. Aj z týchto dôvodov bolo potrebné vyvynúť systém pre efektívnejšie riadenie dopravy, a tak prichádzajú na rad Inteligentné dopravné systémy, ktorých neoddeliteľnou súčasťou sú semafóry. Inteligentný systém v mestách zabezpečuje aj koordinované riadenie dopravných prúdov medzi križovatkami so svetelnou signalizáciou. Takáto koordinácia nie je jednoduchá a preto vyžaduje detailne spracovanú situáciu na mestských komunikáciách, čo je možné zabezpečiť senzormi zabudovanými vo vozovke (popísané v kapitole 2.2.1) alebo napríklad videodetekčným systémom.

Koordináciu dopravných prúdov na križovatke zabezpečuje tzv. signálny plán, ktorý je určený pre každú križovatku zvlášť. V mestách s vysokým počtom koncentrácie vozidiel, je jednoduchý signálny plán nedostačujúci, a preto je potrebné vyvynúť systém pre koordináciu celej siete križovatiek. Vhodným riešením takéhoto systému sú napríklad adaptívne metódy založené na informáciach o aktuálnej dopravnej situácii.

Táto bakalárska práca sa zaoberá analýzou technických prostriedkov (2.2) a niektorých spôsobov riadenia dopravy na skupine križovatiek, ktorým sa venujem v kapitole 2.4. Nasledujúca kapitola 2.5 popisuje systém TAPIOCA, ktorý bol vyvynutý organizáciou Télécom ParisTech, ktorý aj využijem na riešenie stanoveného problému. Na otestovanie tejto metódy je použitý simulátor MHD liniek v Brne.

Kapitola 2

Riadenie dopravy

Úvodná kapitola poskytuje informácie o rôznych prístupoch riadenia dopravy a technických prostriedkoch, ktoré sú v súčasnosti najviac využívané pri riadení dopravy s využitím SSZ.

2.1 Inteligentný dopravný systém

V Európe tiež známy pod názvom „Telematický systém“ (ďalej ako telematika). Telematika, by sa dala definovať rôznymi spôsobmi, jedna z najvýstižnejších definícií hovorí:
„Dopravná telematika integruje informačné a telekomunikačné technológie s dopravným inžinierstvom tak, aby sa pre existujúcu infraštruktúru komunikácií zvýšili prepravné výkony, stúpla bezpečnosť a zvýšila sa psychická pohoda cestujúcich.“

Základ telematického systému tvoria informačné technológie [10], ktoré obsahujú a spracovávajú informácie o prvkoch dopraného reťazca, a o užívateľoch dopravy. Telematika potom umožňuje tieto informácie poskytovať ďalším užívateľom a ovládať pomocou nich prvky dopravného reťazca. Prostriedky dopravného telematického systému sa dajú deliť na:

- Technické prostriedky (fyzické zariadenia, hardware komunikačných a informačných technológií, senzory, akčné prvky, ...),
- Prostriedky riadenia procesov (riadiace stratégie a algoritmy, software, ...)
- Prostriedky organizačnej podpory (organizačná štruktúra, management dopravy, štandardy, ...)

Z hľadiska mojej bakalárskej práce sa budem ďalej podrobnejšie zaoberať technickými prostriedkami, konkrétne senzormi a akčnými prvkami, a prostriedkami riadenia procesov, vhodnou stratégiou riadenia a algoritmami.

Telematika má okrem zvyšovania prepravných výkonov vplyv aj na iné dôležité aspekty dopravy, ako sú:

- Prínosy pre životné prostredie
  - napr. znižovanie času státia vozidiel v kolónach a státia na semafóroch, tým sa v ovzduší zníži koncentrácia výfukových plynov
- Obmedzenie dopravných kongescií

  - informovanie vodičov o existujúcich kolónach a následné navádzanie na alternatívnu trasu
  - Efektívny spôsob je aj ponúkanie vodičom alternatívny spôsob dopravy pomocu MHD, tzv. *Park & Ride*

- Zvyšovanie efektívnosti prepravy tovaru
  - sledovaním a optimalizáciou prepravných trás
  - využitím systému na jazdy v kolónach, keď sa podľa vonkajších podmienok minimalizuje vzdialenosť za sebou idúcich vozidiel tak, že vozidlá vytvárajú tzv. vlaky pohybujúce sa optimálnou rýchlosťou, a tým maximálne využívajú kapacitu komunikácie

2.1.1 Informovanie vodičov

Poskytovanie informácií vodičom je možné hneď niekoľkými spôsobmi. V súčasnej dobe je rozšírený a populárny dopravný servis vysielaný v rádiu, kde je poskytnutý stručný prehľad o dopravnej situácií. S príchodom nových technológií, ako je napríklad smart phone s pripojením na internet, sú k dispozícií komerčné aplikácie s aktuálnym stavom dopravy. Aktualizácie dopravnej situácie zvyčajne zadávajú samotný užívatelia týchto aplikácií, takže ich nemôžeme považovať za 100 % správne. Je to hlavne o prístupu užívateľov, aké informácie budú poskytovať a čo od danej aplikácie očakávajú. Ak je takáto aplikácia spojená s navigáciou, zvyčajne poskytne aj možnú alternatívu trasy do cieľa s minimálnym časovým oneskorením.

2.1.2 Park & Ride

Označenie parkoviska značkou Park & Ride (P + R), že toto parkovisko je určené pre vodičov, ktorý dochádzaju do mesta a na prepravu mestom využívajú mestkú hromadnú dopravu. Hlavným cieľom takýchto parkovísk je odľahčenie dopravy v centre mesta, a tým aj znížiť znečistenie ovzdušia a nehodovosti. Pre dosiahnutie tohto cieľa je potrebné stanoviť nízku cenu parkovania, aby sa to vodičom pri použití MHD vyplatilo. Blízkosť zastávok s pravidelnými linkami do centra je pre P+R nevyhnutnosťou.

V Brne je momentálne v prevádzke jedno parkovisko tohto typu, ktoré bolo vybudované koncom minulého roku [7]. Parkovisko má žiaľ kapacitu iba 177 parkovacích miest, čo pri vyťažení centra Brna, kde denne prejde okolo 190 000 áut, je nepostačujúca. Aby takéto parkoviská plnili svoj účel, ich kapacita musí dosahovať niekoľko tisícové hodnoty a dostatočne motivujúcu cenu parkovného, prípadne možnosť kúpy zľavneného cestovného lístka.

2.2 Technické prostriedky

Podľa literatúry [10] spadajú do prvej vrstvy štruktúry informačnej architektúry dopravného telematického systému. Táto vrstva je v tomto systéme najdôležitejšia, pretože sa využíva na zber statických a dynamických dát o dopravnej ceste, dopravných prostriedkoch a termináloch pomocou rôznych senzorov. Okrem zberu dát, je tu prevádzané riadenie pomocou tzv. aktorov (aktívnych prvkov).

2.2.1 Senzory

Senzory sa v cestnej doprave zameriavajú najmä na meranie hustoty premávky, poveternostných podmienok a iné. V rámci križovatiek so SSZ je to hlavne prítomnosť stojaceho vozidla na semafóre alebo prichádzanie ďalších vozidiel do križovatky z určitého smeru. Takéto senzory majú spoločné pomenovanie **dopravné senzory**, medzi ktoré patria napríklad indukčné slučky vo vozovke s váhovými senzormi, alebo aj ultrazvukové radary a lasery, ktoré nevyžadujú zásah do vozovky. Možnou alternatívou sú aj čoraz viac preferované videodetekčné systémy, ktoré nevyžadujú zásah do vozovky.

Z viacerých meraných parametrov zmienených v [3] sú pre riadenie semafórov použiteľné:

- zaradenie vozidla do dopravného pruhu
- identifikácia zastavenie vozidla
- identifikácia tvorby kolóny

Z týchto údajov je následne možné vypočítať intenzitu a hustotu premávky.

Indukčné slučky

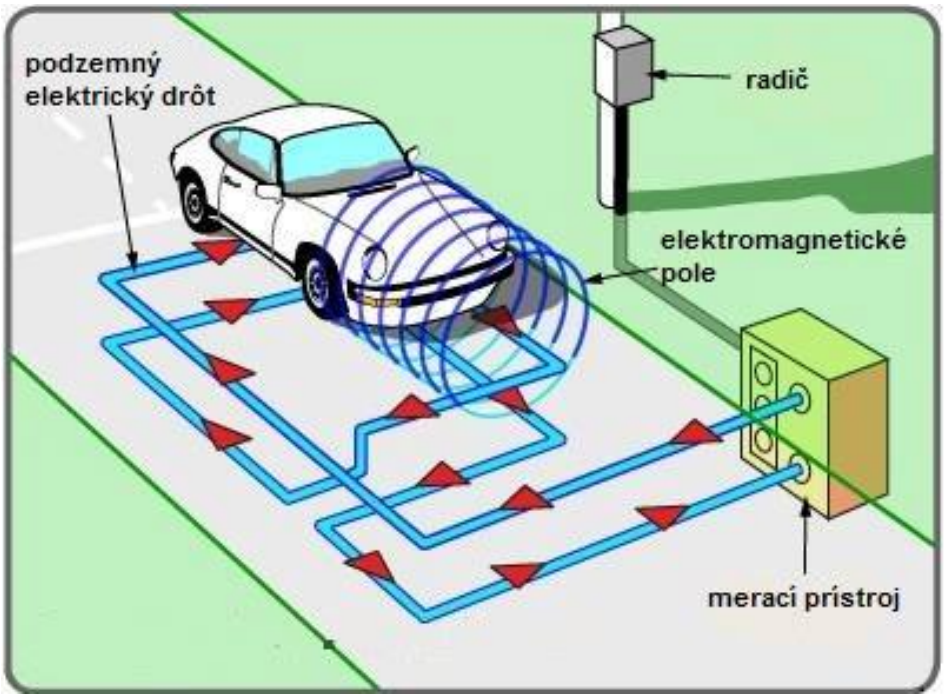
Jeden zo základných detektorov využívaných v doprave používaný ako na klasifikáciu dopravy, tak aj na sčítanie vozidiel a evideniciu vozidiel v meranom úseku [1]. Radia sa medzi tzv. deštrukčné senzory, pretože pri ich aplikácii dochádza k narušeniu vozovky. Samotný detektor tvorý zatočený vodič a riadiaca jednotka, ktorá dokáže reagovať na zmeny indukčnosti. Vodič sa umiestňuje na vozovke do hĺbky 30-60 mm, čím plytšie, tým väčšia presnosť, ale na úkor väčšieho rizika poškodenia vodičov. K činnosti senzoru sa využíva zmena indukčnosti, ktorá nastane prejdením vozidla, alebo kovového predmetu (bicykel, motorka, ...), ponad túto slučku. Tento princíp možeme vidieť na obrázku 2.1.

Indukčné slučky sú výhodné pre ich jednoduchú inštaláciu, vysokú presnosť a spoľahlivosť. Avšak je tu hneď aj niekoľko negatívnych vlastností. Najväčšou nevýhodou je obmedzenie využitia v blízkosti koľají a železobetónových konštrukcií, dochádzalo by neustálym zmenám indukčnosti. Ďalšou nevýhodou je nákladné odstraňovanie porúch či v neposlednom rade poškodenie spôsobené ťažkou dopravou.

Videodetekčné systémy

Jedná sa o nedeštruktívny, mobilný alebo stacionárny typ detektorov. K detekcii vozidiel sa využíva softwarová virtuálna slučka, ktorej polohu a veľkosť možno definovať rôzne. Záleží na umiestnení kamery a na požiadavkách monitorovania premávky v danom úseku. Napríklad prítomnosť vozidla, kedy môže preniesť signál priamo na radič SSZ. Videodetekciou je možné tiež zaznamenať autonehodu alebo väčší predmet na vozovke a upozorniť ústredňu na túto skutočnosť. Tieto systémy sú okrem kamier vybavené aj ďalšími doplkovými senzormy, ktoré majú za úlohu spustiť kamerový záznam. Týmto spôsobom sa šetrí spotreba elektrickej energie v časoch, keď je hustota premávky minimálna alebo je možné zistiť rýchlosť blížiaceho sa vozidla.

Videodetekčný systém je podľa [1] možné použiť aj na miestach mimo križovatky, napríklad na prechode pre chodcov, kde môže rozsvietiť LED svetlá na vozovke, ktoré upozorňujú vodičov na prítomnosť chodca.



Obrázek 2.1: Princíp indukčnej slučky zabudovanej do vozovky [5].

Magnetometer

Alternatívou k indukčným slučkám sú magnetometre. Oproti nim sú lacnejšie a menej deštruktívne, kedže ich veľkosť sa dá prirovnať k minci. Magnetometer funguje na pricípe zmien magnetického poľa, ktoré nastáva aj pri prejazde vozidla. Väčšinou sa zavádzajú ako súčasť bezdrôtovej senzorovej siete (Wireless Sensor Network - WSN). Napájanie tohoto typu senzoru je možné batériou alebo aj priamo pripojením káblu.

2.2.2 Aktívne prvky - aktory

Hlavné funkcie aktorov sú predávanie vizuálnych informácií účastníkom cestnej premávky, riadenie dopravného prúdu alebo tiež na priame obmedzenie premávky. Patria sem premenné dopravné značenia, informačné tabule a svetelné signalizačné zariadenia, ktoré sú hlavnou súčasťou tejto bakalárskej práce.

Svetelné signalizačné zariadenie (semafór) Je najčastejšie používaným typom aktoru v cestnej premávke. V mestách s väčším počtom obyvateľov, je neoddeliteľnou súčasťou každej frekventovanej križovatky. Semafor je v rámci križovatky umiestnený na výložníkovom stožiari, väčšinou pre každé rameno samostatne. Pozostáva z troch signalizačných polí nad sebou (červená, žltá, zelená) prípadne dvoch (červená, zelená) primárne určený a umiestnený na prechode pre chodcov alebo cyklistov.

2.3 Riadenie dopravného (cestného) uzlu

Na riadenie dopravného uzlu (križovatky) sa vo väčšine prípadoch využívajú dopravné radiče riadené podľa pevne stanoveného časového plánu. Takéto radiče však nedokážu reagovať

na zmeny dopravného prúdu. V dnešnej dobe sa čoraz viac zavádzajú radiče s dopravne závislým riadením, kde sa využívajú už spomínané senzory. Podľa [10] riadenie dopravného uzlu delíme na:

- Časovo závislé (off-line) – dopravné dáta sú získavané statickou analýzou historických hodnôt a na ich základe sú vypočítané výstupné veličiny regulovaného procesu
- Dopravne závislé (on-line) – v anglosaskej literatúre nazývané Traffic Responsive, kedy je pre momentálnu dopravnú situáciu vypočítaný regulačný zásah. Na základe vyhodnotenia dopravnej situácie je priradený signálny program najviac vyhovujúci pre danú situáciu.

2.4 Riadenie dopravnej siete

Dopravná sieť pozostáva z viacerých uzlov prepojených na dopravnú ústredňu, ktorá na úrovni oblasti riadi činnosť jednotlivých uzlov. Pre riadenie oblastí sa používa viacero metód. Podobne, ako u jednotlivých uzlov sú časovo a dopravne závislé, ďalej je to on-line riadenie s optimalizáciou, tzv. centralizované systémy, adaptívne metódy riadenia a taktiež expertné a heuristické riadenie. Posledné uvedené sú najdokonalejšími spôsobmi riadnia. Na zavedenie týchto systémov je potrebná dokonalá znalosť dopravných systémov a dlhoročné skúsenosti v oblasti riadenia dopravy.

Nasledujúce režimy riadenia uvádza literatúra [6]:

Riadenie podľa pevného rozvrhu

Pre všetky uzly v sieti sa dopredu vytvorí rozvrh (zvyčajne podľa analýzy historických dát), určujúci ako poradie činností, tak aj ich časovú polohu. Rozvrh je pevný v tom zmysle, že sa neprispôsobuje chovaniu dopravnej siete, ale dodržuje stanovený systém s čo najväčšou presnosťou. Tento systém je použiteľný v prípadoch, kde chovanie premávky ma určitý, v čase nemenný priebeh s minimálnymi výkyvmi.

Výber z niekoľkých rozvrhov podľa času

Pre niektoré typické odchýlky v doprave sa dopredu vytvorí niekoľko pevných rozvrhov. Riadiaci systém potom podľa aktuálneho času zaraďuje jednotlivé programy, ktoré sú pre tento čas stanovené. Tento systém rozširuje prednechádzajúci spôsob o optimalizáciu riadenia pri odchýlkach v doprave. Za odchýlku v doprave sa považuje dopravná špička počas masívneho presunu obyvaťovateľov najmä v ranných a poobedňajších hodinách pri ceste z alebo do zamestnania.

Výber z niekoľkých rozvrhov podľa situácie

Podobne ako predošlý systém, vyberá z niekoľkých predom vytvorených rozvrhov. Riadiaci systém vyberá najvhodnejší rozvrvh podľa aktuálnej situácie. Časové plány sa stanovia podľa vykonávaných meraní a štatistík. Tento režim sa javí, ako druhý najvhodnejší spôsob riadenia hneď po režime globálnej optimalizácie (adaptívna metóda).

Režim plnej lokálnej optimalizácie

V tomto prípade neexistujú žiadne predom vytvorené rozvrhy riadenia a poradie operácií a ich časová poloha sa optimalizuje z pohľadu podsystému, bez ohľadu na celkovú koordináciu systému. Tento režim býva úspešný len v jednoduchých systémoch, ktoré neobsahujú žiadne podsystémy alebo len malý počet podsystémov. Podsystémom sa myslí samostatná križovatka.

Režim plnej globálnej optimalizácie

Systém s režimom globálnej optimalizácie pracuje na základe infomácií poskytnutých z jednotlivých podsystémov (križovatiek). Na základe informácií získaných senzormi, vypočíta optimálny rozvrh na najbližšie obdobie. Optimálny rozvrh sa pravidelne aktualizuje. Perióda aktualizácie závisí na konkrétnom systéme. Pri riadení križovatiek sú to rádovo sekundy. Pri správnom nastavení tohto režimu, je bezkonkurečne najlepší. Vytvorenie a zavedie takéhoto systému je náročné a preto sa s ním v praxi stretneme výnimočne.

Tabulka 2.1: Prehľad riadiacich stratégií pre riadenie dopravnej siete

Stratégia	**Krok**	**Riadené veličiny** **Merané veličiny**	**Poznámka**
časovo závislé (off-line)	hodiny/dni	žiadne čas	zmena programu radičov v oblasti
dopravne závislé (on-line)	podla stavu dopravy	žiadne intenzita,(rýchlosť)	zmena programu radičov v oblasti
centralizované (on-line)	sekunda	dlzka zelenej dlzka cyklu ofset intenzita	individuálna zmena parametrov riadenia v každom uzle
adaptívne (on-line)	sekunda (uzol) minúty (sieť)	uzol: dĺžka zelenej sieť: max. dĺžka zelenej dĺžka cyklu ofset intenzita rýchlosť	uzol: dopravne závislé riadenie sieť: adaptácia
expertné systémy	minúty	vsetky parametre klasifikácia dĺžky kolón excesy	rieši špeciálne prípady

2.4.1 Adaptívna metóda riadenia

Radičom sa ponecháva značná lokálna inteligencia, čiže pracujú v sekundovom režime Traffic Responsive. Ústredňa potom iba optimalizuje v určitom časom úseku (15-30 minút)

maximálnu dĺžku zelenej, dĺžku a ofset[1]. Sieť ale musí byť vybavená strategickými senzormi, ktoré merajú jej intenzitu a rýchlosť (obsadenosť). Dobre vyvinutá metóda v rámci EU je program MOTION, bližšie popísaný v [10].

2.4.2 Zelená vlna

Zelená vlna je systém pre riadenie, v jednom smere idúcich, semafórov. Jedná sa o plynulý prejazd v určitom úseku s cieľom dosiahnúť čo najkratší čas pri prejazde napríklad centrom mesta a snížiť tak tvorbu kongescií v danej oblasti. Pri zavádzaní tohto systému je dôležité, aby jednotlivé semafóry boli schopné medzi sebou komunikovať, vyhodnotiť koncentráciu vozidiel vo všetkých smeroch a zvoliť tak čo najvhodnejšiu dĺžku zelenej na jednotlivých semafóroch a ofset. Ofset je potrebné určiť na základe rýchlosti pohybu prúdu medzi jednotlivými križovatkami a na základe ich vzdialenosti. Rýchlosť pohybu prúdu sa tiež nazýva progresívna rýchlosť a určuje ju vzťah:

$$0,85 * V \leq V_p \leq V \tag{2.1}$$

kde:
V - najvyššia povolená rýchlosť
V_p - progresívna rýchlosť

Pri tvorbe zelenej vlny v pôvodnom zmysle sa predpokladá zanedbanie vozidiel, pripájajúcich sa k hlavnému prúdu z bočných smerov. Za hlavný prúd sa v našom prípade považuje MMO v Brne.

2.4.3 Preferencia MHD

Do systému vyhodnocovania môže zasiahnúť aj preferencia MHD (spomenuté v [11]), kedy majú vozidlá MHD namontované zariadenia umožňujúce komunikovať so systémom. Oznamujú mu tak svoj príchod ku križovatke a napríklad aj aktuálne meškanie. Podľa týchto informácií vie systém nastaviť zelenú vlnu pre toto vozidlo MHD, avšak s prihliadnutím na vyťaženosť ostaných dopravných prúdov. V praxi to znamená, ak vozidlo MHD nemešká, radič sa riadi klasickým programom alebo podľa aktuálnej dopravnej situácie zistenej dopravnými senzormi. V prípade vysokého meškania sa systém snaží nájsť najvhodnejší spôsob urýchlenia prejazdu svetelnými križovatkami.

Preferencia MHD v Brne

Dopravný podnik mesta Brna, a.s. vybudoval vlastný nástroj pre riadenie hromadnej dopravy v meste. Riadiaci Informačný Systém (RIS [2]) umožňuje rýchle a presné určenie polohy vozidla MHD, taktiež informácie o meškaní a pod. Základom RIS je dátová rádiová sieť, ktorá umožňuje trvalé spojenie vozidiel MHD s dispečingom. Autobusy, trolejbusy a električky odosielajú približne každých 20 sekúnd informácie o skutočnom odjazde zo zastávky, svoju polohu podľa súradníc získaných z GPS a iné dôležité dáta. Riadiaci systém tak umožňuje dokonalejšiu preferenciu MHD na riadených križovatkách. Systém RIS je dostupný aj pre verejnosť online na stránkach `http://iris.bmhd.cz/`.

[1] Ofset je časový odstup zopnutia signálu „Voľno“ na nasledujúcej križovatke pre zhluk vozidiel vychádzajúcich z predchádzajúceho uzlu.

2.5 TAPIOCA

Definícia autorov článku [4]:
„TAPIOCA (distribuTed and AdaPtive IntersectiOns Control Algorithm) je algoritmus distribuovaný križovatkami, ktorý vyberie vhodnú fázu P + 1, zatiaľ čo prebieha fáza P“, založené na ohodnotení definovanom v kapitolách 3.1.4 a 3.1.5.

Samotný algoritmus pozostáva zo šiestich krokov:

1. **Záznam vozidiel** - v prvom kroku ZU počítajú prichádzajúce vozidlá za určený časový interval, po ktorom odošlú dáta príslušnému smerovému agregátoru na križovatke. CU potom v každom smere spočítajú vozidlá, ktoré opustili križovatku a odošlú zoznam len agregátoru v ich smere.

2. **Výpočet** - agregátory porovnajú počty príchodzích a odchodzích vozidiel aby zistili počet vozidiel, ktoré skutočne prešli križovatkou. Ak agregátor neprijal od ZU a CU žiadne dáta, vyhodnotí danú situáciu ako pokojovú (žiadne prichádzajúce vozidlá v danom smere).

3. **Určenie nasledujúcej fázi** - po obdržaní dát od všetkých agregátorov na úrovni 3 sa vypočíta odohodnotenie každého smeru, ktoré spolu s infomáciou o počte vozidiel odošle príslušnej križovatke v tom smere.

4. **Šírenie informácií** - po výpočte nasledujúcej fázi, hlavný uzol, spolu s novým ohodnotením, odošle príslušným agregátorom. Každý agregátor následne odošle tieto informácie ďalšej križovatke v jeho smere.

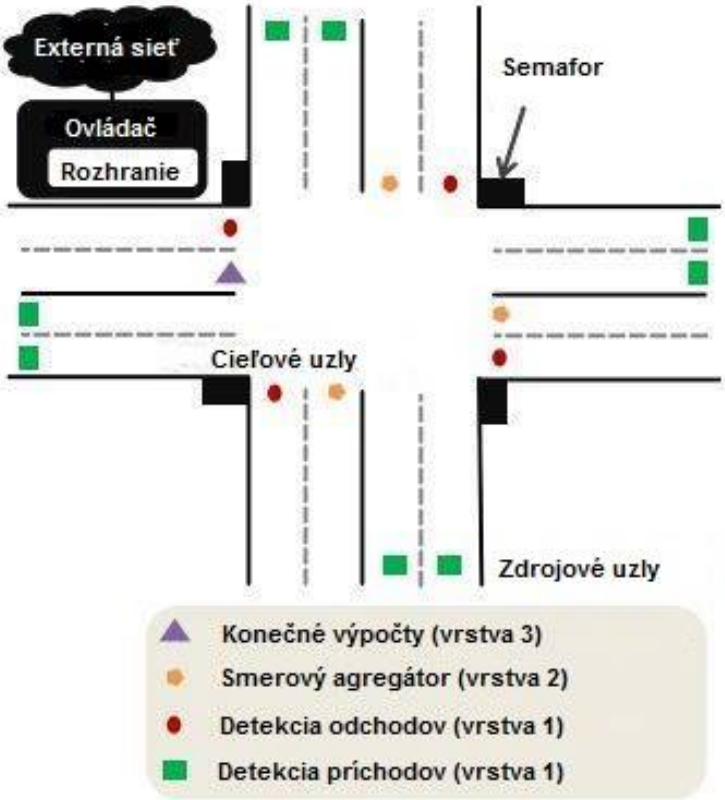
5. **Aplikácia fázi** - hlavný uzol odošle zloženie fáze radiču križovatky, ktorý prepína svetelnú signalizáciu na križovatke.

6. **Medzikrižovatkové monitorovanie vozidiel** - počas fáze P + 1, CU uzly v určenom smere odosielajú časovú informáciu o prechode vozidla nasledujúcim CU uzlom, ktoré môže zistiť prechod týchto vozidiel. Zistený časový rozdiel može pomôcť pri synchronizácii križovatiek a najmä pri vylepšovaní zelených vĺn, alebo tiež na zistinie nastavajúcej kongescie.

2.5.1 Ovládanie svetelnej signalizácie

Architektura križovatky je znázornená na obrázku 2.2. Riadenie je rozdelené na 3 vrstvy. Na prvej vrstve vystupujú zdrojové uzly (ZU) a cieľové uzly (CU), ktoré priamo komunikujú so smerovými agregátormi. Agregátor, operujúci na druhej vrstve, následne odosiela dáta vrstve tretej, kde prebiehajú potrebné výpočty jednotlivých časov pre radič križovatky.

Križovatky medzi sebou komunikujú prostredníctvom multi-hop siete vytvorenej senzormi. Napríklad križovatka K_1 odosiela križovatke K_2 počet odchádzajúcich vozidiel a naopak. Za túto komunikáciu sú zodpovedné CU uzly, ktoré sú vybavené potrebným protokolom. V prípade potreby je možné použiť rozhranie ovládača, ktorý môže mať prispôsobený príjmač a vysielač na medzikrižovatkovú komunikáciu.



Obrázek 2.2: Usporiadanie senzorov na križovatke

Umiestnenie ZU záleží na dopravnej situácii a na požiadavkách navrhovateľa systému. Vzdialenosť by mala však byť dostatočná k úspešnému prechodu vozidiel medzi týmto senzorom a stop čiarou za maximálnu dobu zelenej. Vzdialenosť sa určí pomocou vzťahu:

$$N * L_{veh},\ N = \frac{T_{max} - T_s}{T_H} \tag{2.2}$$

Kde:
N - teoretický počet vozidiel za čas T_{max}
L_{veh} - primerná dĺžka vozidla
T_s - doba rozbehu
T_H - priemerný časový interval medzi vozidlami (2s)

Úlohou ZU senzorov je počítanie vozidiel prichadzajúcich ku križovatke. CU uzly sú umiestňované hneď za hranicou križovatky v každom smere samostatne (viď. 2.2).

Kapitola 3

Návrh signálneho plánu

Definícia z [8] nám hovorí, že „Signálny plán je program pre riadenie svetelných signalizačných zariadení, ktorý určuje poradie a dĺžku signálu voľno jednotlivých signálnych skupín.“ Návrh ovplyvňujú viaceré spolusúvisiace faktory, na ktoré je potrebné brať ohľad a spracovávať vo vzájom súlade (schéma fáz, dĺžky cyklov riadenia, doby jednotlivých fáz).

3.1 Fázová schéma

Fáza je časový interval, v ktorom majú signál voľno určité, vzájomne nekolizné dopravné prúdy na križovatke. Pod pojmom fázová schéma sa rozumie, priradenie dopravných pohybov jednotlivým fázam a najvhodnejšie poradie týchto fáz. Minimálny počet fáz na jednej križovatke je stanovený na 2. Toto ustanovenie je však pri odbočujúcich dopravných prúdoch kolízne. Pre dokonale bezkolízne riadenie na štvorramennej križovatke sú potrebné 4 fázy a na trojramennej 3 fázy. Nevýhodou bezkolízneho riadenia je predlžovanie státia vozidiel na križovatke a takisto znižuje kapacitu križovatky. Viacfázové riadenie sa doporučuje napríklad na križovatkách zaradených do zelenej vlny a na miestach kde je to vzhľadom k dopravným pomerom nevyhnutné.

3.1.1 Medzičasy

Časový interval od konca signálu voľno jednej fázy po začiatok signálu voľno inej, kolíznej fázy. Tento čas musí byť dostatočne dlhý na odchod posledného vozidla z križovatky v prvej fáze pred tým, než do križovatky vstúpi vozidlo z druhej fázy. Výpočet medzičasov sa určuje z nasledujúceho vzťahu:

$$t_m = t_v - t_n + t_b,\ t_v = \frac{L_n}{V_n},\ t_n = \frac{L_v + I_{voz}}{V_v} \tag{3.1}$$

Kde:
t_v - doba potrebná k prejdeniu posledného vozidla od stopčiary po kolízny bod na konci kolíznej plochy
t_n - doba potrebná k prejdenie prvého vozidla od stopčiary po kolízny bod na začiatku kolíznej plochy
t_b - bezpečnostná doba, tj. doba zohľadňujúca prejazd vozidiel počas signálu pozor v súlade dopravnými predpismy
L_v - dráha od stopčiary po koniec kolíznej plochy
L_n - dráha od stopčiary po začiatok kolíznej plochy

V_v - rýchlosť posledného vozidla vo fáze $[m.s^{-1}]$
V_n - rýchlosť prvého vozidla vo fáze $[m.s^{-1}]$
I_{voz} - dĺžka opúšťajúceho vozidla

Tabulka 3.1: Tabuľka štandardných hodnôt pre výpočet medzičasov

Štandardné hodnoty pre výpočet medzičasov		
Opúšťajúce a vstupujúce rýchlosti	$[km.h^{-1}]$	$[m.s^{-1}]$
Motorové vozidlá - priamy smer - v oblúku	35 25	9,7 7,0
Električky - priamy smer a v oblúku s polomerom 60 m - v oblúku 25 - 60 m - v oblúhu <25 m - v miestach s výhybkami a koľajovými križovatkami - v miestach výhybiek s jazdou proti hrotom	25 20 15 15 10	7,0 5,6 4,2 4,2 2,8
Dĺžky opúšťajúceho vozidla a bezpečnostná doba	$I_voz[m.s^{-1}]$	$t_b[s]$
Motorové vozidlá Električky	5 15	2 0

Pre výsledné stanovenie tabuľky medzičasov sa použije vzorec 3.1, hodnoty tabuľky 3.1 a vzdialenosti od stopčiary po kolízne body križovatky. Vzdialenosť bude určená počtom buniek v simulátore.

3.1.2 Dĺžka cyklu

Potrebná dĺžka cyklu je súčet nutných dôb signálov voľno a rozhodujúcih medzičasov [8]:

$$C = \sum t_z + \sum t_m, \tag{3.2}$$

kde:
C - minimálna dĺžka cyklu
t_z - nutná doba zelenej fázi
t_m - rozhodujúci medzičas

Orientačné hodnoty dĺžky cyklov sú stanovené v [8] ako minimálne 30 s, optimálne 50 - 80 s a maximálne 100s. V krajných prípadoch do 120 s.

3.1.3 Signál voľno

Doby signálov voľno sú priamo úmerné intenzite dopravných prúdov. Výpočet tejto doby sa dá realizovať viacerými metódami, ako uvádza [8]:

Metóda saturovaného toku taktiež nazývaná Websterova metóda určuje dĺžku cyklu a signálov voľno na základe stupňoch saturácie vjazdov jednotlivých fáz. Základným výpočtovým obdobím je vždy jedna hodina.

Metóda spotreby času ráta s intenzitou jednotlivých dopravných smerov a násobí ju koeficientom obmedzenia, čím sa berú do úvahy zrýchlenia a spomalenia pohybu vozidla v križovatke. Táto metóda využíva saturovaný tok, takže sa dá považovať za rozšírenie metódy saturovaného toku.

Metóda postupného približovania (iterácie) spočíva v priebežnom porovnávaní kapacity jednotlivých prúdov s príslušnými smerodatnými intenzitami na križovatke. Touto metódou docielime zvýšenie kapacity približne o 10 - 20 %.

V rámci mojej bakalárskej práce budú výpočty prebiehať na základe metódy TAPIOCA, popísanej v kapitole 2.5.

3.1.4 Signálny plán pre samostanú križovatku, podľa systému TAPIOCA

Ako už bolo spomenuté, riadenie svetelenej signalizácie prebieha na 3 vrstve systému, ktoré má k dispozí všetky informácie o situácii na križovatke. Na základe týchto informácií je systém schopný určit **lokálne skóre** $LS(z, c)$ pre smer (z,c). Toto skóre je dofinované ako vážený súčet počtu vozidiel prichádzajúceho prúdu a času od posledného pohybu daného smeru, tj. čas od posledného signálu voľno. Ak z niektorého smeru neprichádza žiadne vozidlo, potom $LS(z, c) = 0\ \forall d$.

$$LS(z, c) = \alpha * \left(\frac{N^{(z,c)}}{\sum_{(a,b)\in C} N^{(a,b)}} \right) + \beta * \left(\frac{T_F^{(z,c)}}{\sum_{(a,b)\in C} T_F^{(a,b)}} \right) \tag{3.3}$$

Kde:
$N^{(z,c)}$ - počet vozidiel prichádzajúceho smeru
$T_F^{(z,c)}$ - čas od posledného signálu voľno
C - množina všetkých smerov križovatky
α, β - užívateľom definované váhy, menné na základe situácie, riešnie vyhladovenia prúdu. Implicitne rovnaké

3.1.5 Signálny plán pre sieť križovatiek, podľa systému TAPIOCA

V prípade siete viacerých križovatiek, skombinovanie nasludujúcej fázi je založené na lokálnom a vzdialenostnom ohodnotení skombinované do jedného skóre $S(z, c)$ pre smer (z,c). Výpočet tohto skóre zahŕňa tri ciele:

1. **Lokálna optimalizácia** - V prvom rade sa určí lokálne skóre $LS(z, c)$. Je potrebné vziať do úvahy vozidlá jednej križovatky a ich rozloženie vo všetkých smeroch.

2. **Kapacita odchodov (Load discharge)** - pre efektívne smerovanie dopravy musíme preferovať smery, ktoré vedú k menej zaťaženým križovatkám a naopak pozdržať dopravný prúd smerujúci k už existujúcej kongescii. Skóre pre definovanie tejto situácie určíme vzťahom:

$$GE(z, c) = N^{(z,c)} - \nu_c \tag{3.4}$$

   Kde:
   ν_c - počet vozidiel stojacich na cieľovej križovatke

3. **Synchronizácia križovatiek** - Pre uprednostňovanie zelených vĺn je zavedený termín pre uprednostňovanie tých smerov, ktoré vedú ku kižovatkám s najskorším spustením signálu voľno. Hodnoty dosiahnuté vypočítaním LS pre každý $|C|$ smer, porovnáme a zoradíme. Najvyššie ohodnotenie bude rovné $|C|$, nasledujúce $|C|-1$, atď. Výsledné ohodnotenie $R(c)$ je ešte normalizované a rozposlané každej susednej križovatke.

$$R(c) = r(c)/|C| \tag{3.5}$$

Kde:
$r(c)$ - ohodnotenie smeru
$|C|$ - absolútna hodnota smerov

Kombináciou zmienených cieľov následne získame globálne skóre:

$$S(z,c) = \gamma * \left(\frac{LS^{(z,c)}}{\sum_{(a,b)\in C} LS^{(a,b)}} \right) + \delta * \left(\frac{GE^{(z,c)}}{\sum_{(a,b)\in C} GE^{(a,b)}} \right) + \eta * \left(\frac{R^{(z,c)}}{\sum_{(a,b)\in C} R^{(a,b)}} \right) \tag{3.6}$$

γ, δ, η - relatívna váha pre konkrétny cieľ, implicitne zhodné

Kapitola 4

Simulátor MHD linek v Brně

V tejto kapitole sa budem venovať analýze simulátoru MHD liniek[9], do ktorého budem implemetovať riadenie semafórov na skupine križovatiek. Simulátor bol vytvorený v rámci bakalárskej práce na Vysokém učení technickém v Brně, faktulte Informační technologie.

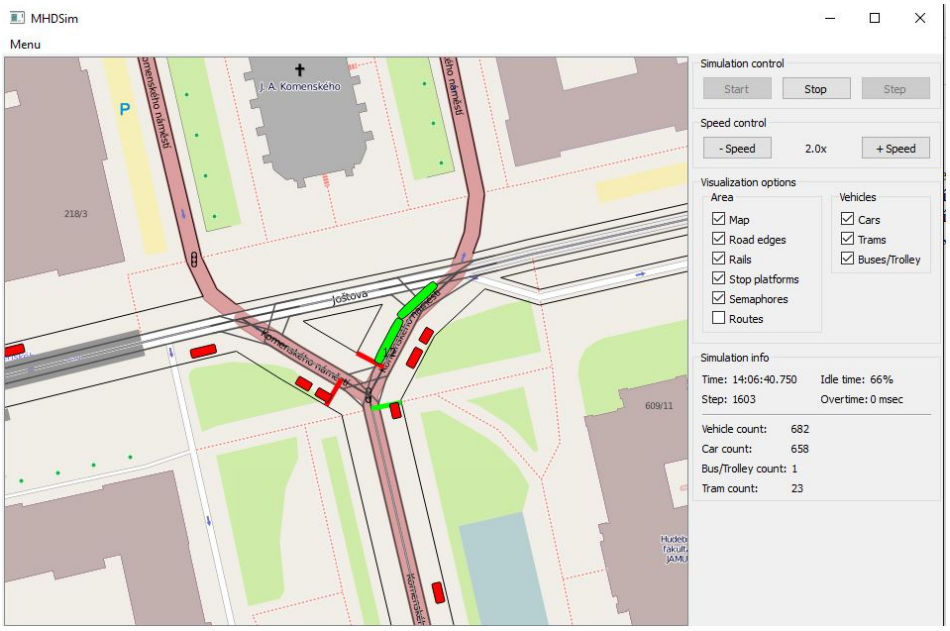
4.1 Analýza simulátoru

Simulačný program sa zameriava na centrum Brna, konkrétne na malý mestský okruh (MMO). Na tomto okruhu sa nachádza spolu 16 križovatiek so svetelnou signalizáciou. Riadenie jednotlivých semafórov v simulátore je len na základe nastaveného algoritmu bez ohľadu na aktuálnu dopravnú situáciu. Jedná sa o tzv. riadenie podľa pevného rozvrhu. Takýto spôsob riadenia je určený pre oblasti s nízkou hustotou dopravy a pre oblasť akou je centrum Brna, kde denne prejdu desaťtisíce áut, je absolútne nevhodný. Simulátor síce nevytvára totožné podmienky s realitou, ale na demonštráciu adaptívneho riadenia bude stačiť.

Dopravná sieť v tomto simulátore je generovaná z OpenStreetMap (OSM) dat. Základom týchto dát je *node*, ktorý jednoznačne určuje bod v priestore (zemepisná dĺžka a šírka). Pomocou týchto bodov sa generuje dopravná sieť. OSM data obsahujú mnoho chýb a oprava týchto dát je komplikovaná, najmä prepojenie buniek viacprúdových ciest, autor simulátoru uvažuje na každej ceste vždy iba jeden dopravný prúd pre autá, autobusy a trolejbusy,prípadne koľaje pre električky.

Záznamy o linkách MHD sú vytvorené podľa cestovného poriadku a OSM trás.

Detailný záber na križovatku so svetelnou signalizáciou môžeme vidieť na obrázku 4.1. Semafór je znázornený farebne meniacim sa pásikom. Ako môžeme vidieť umiestnenie semafórov na tejto križovatke sa z časti odlišuje od reality. Táto situácia spôsobuje značnú výhodu pre vozidlá prechádzajúce priebežne po ulici Joštova. K oprave tejto a ostaných podobných križovatiek je potrebné naštudovať tvorbu a spracovanie OSM dát, čo moja bakalárska práca nezahrňuje.



Obrázek 4.1: Detail križovatky v simulátore (Joštova x Husova)

4.2 Analýza implementácie

V implementácii som našiel vhodné spôsoby, akými sa bude dať implementovať dynamické riadenie SSZ. Potrebné časti simulátoru sú popísané v tejto kapitole.

4.2.1 Bunka

Bunka je základnou a nejmenšou časťou dopravnej siete reprezentovaná triedou `Class Cell`. Prepojením buniek vznikajú všetky cesty, križovatky, apod. Veľkosť (rozmery na mape) je určená vhodným kompromisom medzi čo najpresnejším delením úsekov a výpočetnou náročnosťou (nároky na pamäť a rýchlosť spracovania). Bunka je charakterizovaná viacerými parametrami, ako napríklad:

- vozdilo (prítomnosť vozidla),
- križovatka (bunka je súčasťou križovatky),
- nasledujúca a predchadzajúca bunka,
- cesta, na ktorej sa nachádza,
- geografická pozícia,
- a ďalšie

Vymenované parametre sú najdôležitejšie pre zavedie senzorov do dopravnej siete.

4.2.2 Cesta

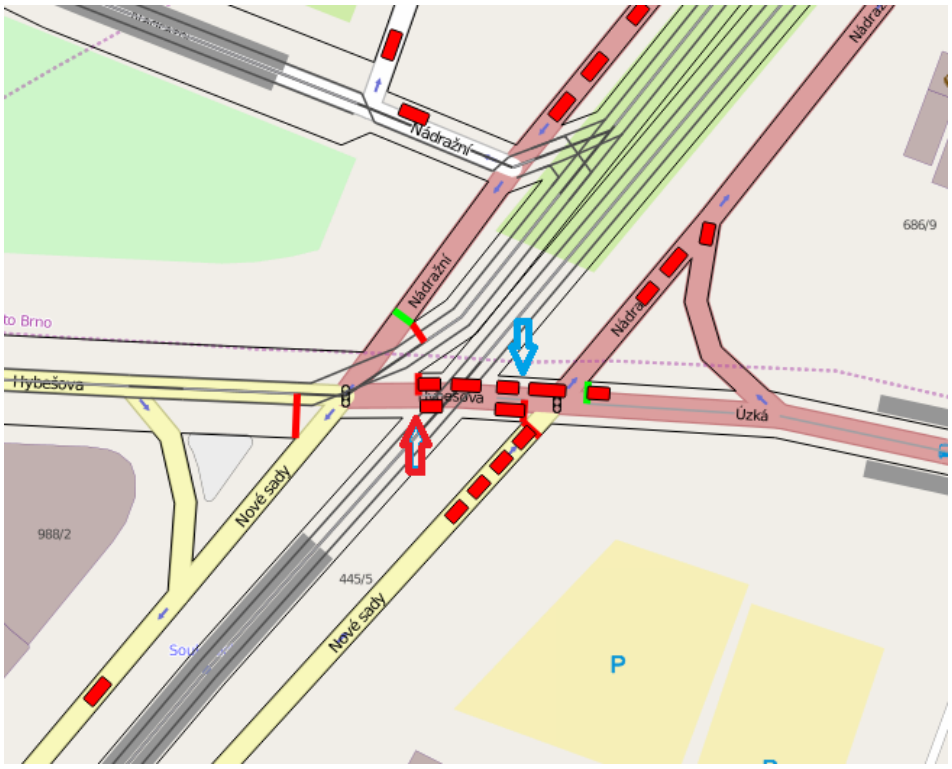
Cesta v simulátore je reprezentovaná triedou `WayBinding`, ktorá spájaním jdnotlivých uzlov z OSM dát a vkladaním buniek vytvára cesty simulátoru. Je taktiež základným pilierom

pri tvorbe križovatiek a ich semafórov. Dôležitou časťou triedy je štruktúra `Lane`. Pomocou tejto štruktúry som schopný sa dostať na ktorúkoľvek bunku a umiestniť na ňu senzor.

4.2.3 Semafóry a križovatky

V simulátore pracujú semafóry len v jednom základnom režime. Jednotlivé fázi trvajú 20 sekúnd a rotujú podľa toho v akom poradí boli na semafór namapované cesty. Zmenu spôsobu riadenia budem meniť na dynamickú, čo je aj cieľom tejto práce.

Pri detailnejšom pohľade na zložitejšie križovatky, ako je napríklad na obrázku 4.2, som zistil nedostatky vo vytváraní semafórov (chyby vyznačené šipkami). Tieto semafóry totižto nezodpovedajú realite. Simulátor takúto križovatku vyhodnotí ako dve samostatné a tým pádom vytvorí dve na sebe nezávyslé semafóry, čo v niektorých prípadoch zbytočne blokuje premávku. Na MMO simulátoru je celkom päť križovatiek s týmto problémom, štyri na ulici Úzka a posledná piata je nasledujúca, a to križovatka Nádražní - Husova. Túto skutočnosť bude treba zohľadniť pri algoritme riadenia jednotlivých fázi na takýchto križovatkách. Oprava týchto križovatiek je podľa mňa vhodný návrh na budúci vývoj tohto simulátoru.



Obrázek 4.2: Detail chybne vytvorenej križovatky v simulátore

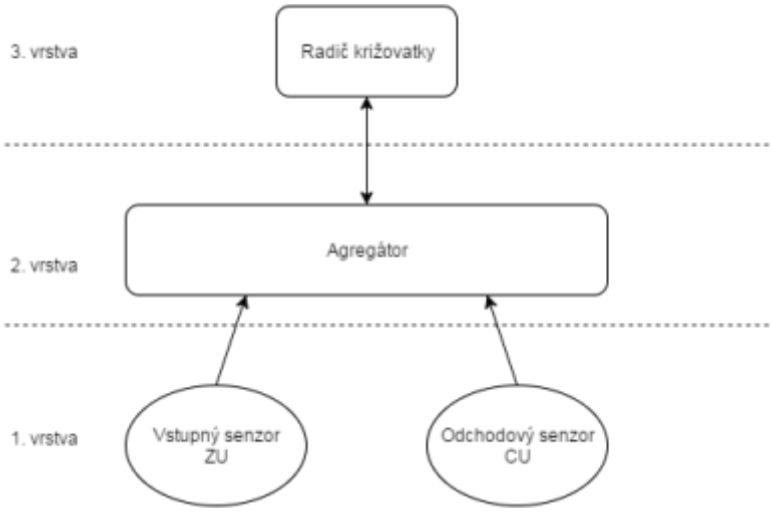
Kapitola 5

Návrh riešenia

Program bude implementovaný v jazyku C++ s využitím Qt frameworku ako doplnkový modul pre analyzovaný simulátor v predchadzajúcej kapitole (4).

Riadenie dopravnej siete bude na základe algoritmu TAPIOCA. Realizovaný bude v zjednodušenej verzii, z toho dôvodu, že použitý simulátor obsahuje iba jeden dopravný prúd v danom smere. Váhové koeficienty budú pevne určené pre jednotlivé smery s možnosťou ovplyvnenia vozidlami MHD. Ako senzory budem uvažovať magnetometry, ktoré budú súčasťou vybraných buniek cestnej komunikácie simulátoru v blízkosti križovatiek. Dáta poskytnuté senzormy budú využité na dynamické (adaptívne) riadenie skupiny semafórov a zelených vĺn. Preferencia MHD využije systém podobný RIS, čiže každé vozidlo MHD bude informovať systém, že sa blíži ku konkrétnej križovatke. Ak bude táto križovatka riadená, vozidlu MHD bude umožnený prejazd v čo najkratšom čase.

Obrázok 5.1 zobrazuje jednotlivé vrstvy systému. Na prvej vrstve sú to senzory, ktoré poskytujú infomácie agregátoru pracujúcemu na druhej vrstve, kde budú prebiehať aj potrebné výpočty. Vrstva tretia pozostáva z radiču križovatky, ktorý bude aktívne komunikovať s agregátorom a získavať potrebné informácie pre plynulé fungovanie semafórov.



Obrázek 5.1: Rozloženie riadenia na vrstvy

Kapitola 6

Implementácia

Ako bolo spomenuté v návrhu riešenia, riadenie semafórov je implementované do existujúceho simulátoru. Počas implementácie som sa stretol s radou problémov, ktoré sú aj s riešením popísané v tejto kapitole. Simulátor je možné spustiť v dvoch režimoch riadenia. Prvý režim je pôvodné jednoduché riadenie a druhý režim je dynamický mnou vytvorený systém riadenia. Program je možné spustiť na platforme Windows.

6.1 Zavedenie senzorov

Senzory, podľa vzoru systému TAPIOCA, boli zavedené na vybrané križovatky Malého Mestského Okruhu v Brne. Križovatky boli vybrané na základe pozorovaní simulátoru tak, aby výsledok riadenia bol čo najefektívnejší. Zoznam riadených svetelných križovatiek na MMO:

1. Dornych - Úzka
2. Úzka - Nádražní - Hybešova - Nové sady
3. Šilingrovo náměstí
4. Žerotínovo náměstí
5. Moravské Námestí - Kolište - Lidická
6. Kolište - Milady Horákové
7. Kolište - Cejl

Svetelné križovatky bez senzorov sú schopné reagovať na podnety senzorových a dosiahnúť tak plynulejšiu jazdu po MMO. Spôsob odosielania a spracovania týchto podnetov je spracovaný v časti (6.2).

6.1.1 Trieda `Class Sensor`

Trieda popisujúca senzor v simulátore. Vytvára dva typy senzorov, príchodový a odchodový senzor. Implementačne sú rozlíšené pridaním, príchodovému senzoru, cestu `WayBinding`, ktorá označuje cestu smerujúcu do križovatky. Pomocou tejto cesty vieme, koľko vozidiel prichádza z konkrétneho smeru. Hlavnú úlohu senzoru, t.j. zmena stavu a informovanie agregátoru, zabezpečuje metóda `void Sensor::ChangeState()`, ktorá je vyvolána

po prejdení vozidla týmto senzorom. Keďže vozidlo tvorí niekoľko buniek a pohybuje sa skrz niekoľko buniek naraz, vyvolanie zmeny stavu je nutné previesť pri vykonávaní pohybu vozidla v triede `Class Area`, kde sa prepočítavajú nové bunky pre vozidlo. Ak je v novo vypočítaných bunkách umiestnený senzor, vyvolá sa zmena stavu. ZU enzor následne odošle agregátoru príkaz na inkremetovanie počtu vozidiel na danej ceste. CU senzory potom po spustení zelenej informujú agregátor o odjazde vozidiel z daného smeru, a taktiež zabezpečujú medzikrižovatkovú komunikáciu.

Umiestnenie senzorov zabezpečuje trieda `NetworkConvertor` pri vytváraní semafóru. Konkrétne doplnenou metódou `putSensorsAtSemaphore(...)` vo vypočítanej vzdialenosti pred križovatkou (ZU) a na prvú bunku za križovatkou (CU). Vzdialenosť od križovatky bola určená vzťahom 2.2 a prepočítaná na počet buniek. Jedna bunka simulátoru predstavuje 0.25 metra, priemerná vzdialosť vozidla 4 m čo činí 16 buniek a počet áut N je 9. Týmto výpočtom dosiahneme hodnotu 144 buniek, ale pozorovaním simulátoru bola táto hodnota upravená na 150, aby bolo možné zachytiť aspoň 8 vozidiel, ktoré stoja na križovatke. Ak nastane situácia, že sa vo vzdialenosti menšej ako 150 buniek nachádza ďaší uzol, senzor je umiestnený na poslednú možnú bunku pred týmto uzlom. Pridanie senzorov do dopravnej siete prebehne len v prípade, ak sa súradnice uzlu nachádzajú v zozname.

Medzikrižovatková komunikácia

Cieľové senzory umiestnené na odchadzajúcich cestách komunikujú s agregátorom svetelnej križovatky na druhom konci odchadzajúcej cesty. CU senzor odošle agregátoru signál určujúci prichadzajúce vozidlo s vypočítaným počtom krokov simulácie. Počet buniek medzi križovatkami sa vydelí maximálnou rýchlosťou vozidla. Rýclosť je v simulátore nastavená podľa dopravných predpisov a prepočítaná na počet buniek za krok simulácie. Tento spôsob vyhľadania nasledujúcej križovatky so SSZ je možný len v prípade, ak sa medzi nimi nenachádza iná križovatka. V simulátore som totižto narazil na problém pri vyhľadávaní ďalších križovatiek a nedokázal som sa dostať na ďalšiu svetelnú križovatku. Iný problém nastáva v prípade, ak je cesta medzi dvoma uzlami v OSM dátach rozdelená na dve, väčšinou ak sa na nej nachádza zastávka MHD. Tento problém sa rieši na strane agregátoru. CU senzor taktiež informuje nasledujúcu križovatku o každom prichadzajúcom vozidle, aby agregátor mohol určiť dostatočne dlhý čas zelenej aby prešlo čo najviac áut tohto dopravného prúdu.

6.2 Zavedenie agregátorov

Na rozdiel od senzorov je agregátor súčasťou každej svetelnej križovatky z toho dôvodu, aby bolo možné riadenie celej siete križovatiek so svetelnou signalizáciou a dosiahnutie zelených vĺn v preferovaných smeroch. V rámci spomínaného zjednodušenia v návrhu je na križovatke iba jeden hlavný agregátor, ktorý plní aj úlohu smerových agregátorov systému TAPIOCA.

6.2.1 Trieda `Class Agregator`

Funkciou tejto triedy je spracovanie informácií o počte prichadzajúcich a odchadzajúcich vozidiel križovatky získaných od senzorov. Na základe zhromaždených informácií agregátor na vyžiadanie radiču semafóru prevedie potrebné výpočty, ako sú:

- výpočet lokálneho skóre

- výpočet novej fázy
- výpočet globálneho skóre pre odchadzajúci prúd

Výpočty lokálneho a globálneho skóre prebiehajú na základe vzorcov 3.3 a 3.6, ovšem pri výpočte globálneho skóre nastáva problém, pretože vzorec zahrňuje rozloženie stojacich áut vo všetkých smeroch a náš simulátor dokáže pracovať len s jedným prúdom, z ktorého autá odchádzajú do všetkých smerov. Preto pri výpočte kapacity odchodov uvažujem priebežný smer MMO.

Na neriadených križovatkách, čiže križovatkách bez senzorov, je úlohou agregátoru prijímať a spracovať signál od odchodových senzorov (viď 6.1.1). Táto komunikácia je dôležitá z hľadiska tvorby zelených vĺn.

Spôsob uloženia dát

Pre správne fungovanie riadenia svetelnej signalizácie bolo potrebné zvoliť vhodný spôsob uloženia potrebných dát. Kedže trieda `Semaphore` pre prepínanie jednotlivých fázi využíva dátový typ `std::map<key,value>`, kde kľúče `key` sú tvorené usporiadaným vektorom ciest (`WayBinding`) smerujúcich do križovatky, rozhodol som sa využiť rovnaký spôsob uloženia informácií pre konkrétny dopravný prúd. Na príslušný `WayBinding` sú postupne namapované počty vozidiel, lokálne skóre a informácie o signále voľno. Inicializácia prebieha ihneď po inicializácii semafóru, takže je zaručené rovnaké usporiadanie ciest. Pri riešení problému z rozdelenou spojnicovou cestou, som skúšal viacero možností, ktoré simulátor poskytuje. Jediná účinná metóda je vyhľadanie súradníc začiatočnej bunky druhej polovice cesty a na túto cestu namapovať počet prichadzajúcich vozidiel a nastaviť prioritu pre spustenie signálu voľno.

Riadenie zelenej vlny

Zelená vlna je zriadená na MMO a zahŕňa taktiež križovatku na Moravskom náměstí. Podľa počtu prichádzajúcich vozidiel sa rozhoduje o tom, ktorý smer bude uprednostnený. Podľa ofsetu, čiže času potrebného na prekonanie vzdialenosti medzi dvoma križovatkami, sa skrátia fázy pred fázou určenou k zelenej vlne. Ofset sa rozdelí podľa počtu fáz a každá sa skráti o tento čas. O tento proces sa stará metóda `double Agregator::getMinusTime()`, ktorej návratová hodnota je práve čas o ktorý sa skráti práve prebiehajúca fáza. Zvolený spôsob uprednostňovania nie je dokonalý a miestami dochádza k úplnému skráteniu práve prebiehajúcej fázy. Vynechanie fázy môže spôsobovať nežiadúce tvorenie kongescií. Zdokonalenie zriaďovania zelených vĺn je vhodný na ďalší vývoj simulátoru.

6.3 Riadenie semafórov

Pôvodná metóda `Semaphore::step()` bola zachovaná, aby bolo možné simulátor kedykoľvek prepnúť späť do tohto režimu. Pre potreby dynamického riadenia som túto metódu, ako aj celú triedu `class Semaphore`, doplnil a upravil podľa potreby. Pseudokód metódy `step()` (6.3) znázorňuje jednotlivé úkony vykonávané počas jedného kroku simulácie. Na začiatku kroku prebieha vždy odpočet času, buď automaticky o počet sekúnd zodpovedajúcu kroku simulácie alebo ak sa jedná o semafór kde je vyžiadaná zelená vlna, tak sa čas kráti

o hodnotu určenú agragátorom. Zároveň ak sú splnené určité podmienky nastane pridanie času pre signál voľno. Počas aktuálne bežiacej zelenej nastáva u riadeného semafóru výpočet času pre cestu, na ktorej bude nasledovať zelená. Samotný výpočet dĺžky signálu voľno je založený na počte práve stojacích vozidiel na ceste, ktorá bude nasledovať. Pred určením tohto času sa ešte vypočíta lokálne skóre pre všetky smery a porovná sa. Ak je na niektorom ramene vyššie skóre, tak sa nový čas skráti aby sa minimalizovalo čakanie pre smer z vyššou prioritou.

Podľa súradníc konkrétneho semafóru sa na tomto ponechá rozsvietená zelená po celý čas. Takýmto spôsobom som zrušil zbytočné blokovanie, viditeľné na obrázku 4.2. Napríklad vozidlo prichadzajúce z ulice Úzka, aktuálne zelená, chce pokračovať smerom na ulicu Hybešovu, ale vozidlá stojace na zle vytvorenom semafóre (ukazuje červená šipka) blokujú priebeh a dochádza ku zbytočným kongesciám. Takisto v ukončovacej časti fáze nastáva preskočenie zmeny farby pre tieto cesty.

V počiatočnej časti fázy sa nastaví zelená podľa výpočtu agregátoru alebo ak sa jedná o neriadený semafór ponechá sa dĺžka zelenej na implicitnej hodnote 20 sekúnd. Pre cestu zaradenú do zelenej vlny sa nový čas nastaví podľa počtu prichadzajúcich vozidiel.

Pseudokód metódy step():

```
step()
{
   odpocitavanie / pripocitavanie casu

   ...

   if (bezi zelena)
          if (riadeny semafor)
            vypocet casu pre zelenu na dalsej ceste
            ...

          //docasna oprava zlych krizovatiek
          if (cesta v zozname na opravu)
            skipyellow; // preskocim ukoncenie fazi

          ...
          prepnutie na zltu
skipyellow:
          prepnutie do ukoncovacej fazi

   else if (ukoncovacia cast fazi)
          if (cesta v zozname na opravu)
            // aby neovplyvnovalo LS
            agregator->deleteVehCnt(aktualna cesta)
            skipend; // preskocim ukoncenie fazi

          ...
          aktualnu zltu na cervenu
```

```
            prepnutie dalsej cesty na pociatocnu zltu

skipend:
            vynulovanie pocitadla odchodovych senzorov
            prepnutie do pociatocnej fazi
    else // pocitatocna cast fazi
            if (riadeny semafor)
              validacia poctu aut
              nastavenie casu zelenej na zaklade vypoctu
            else
              nastavenie zelenej na neriadenej krizovatke
            ...
            prepnutie stavu semaforu na zelenu

}
```

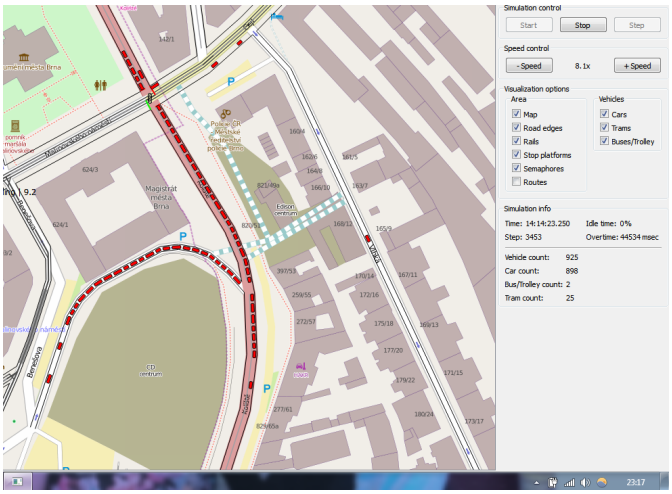
6.4 Výsledky riadenia

Po vytvorení riadenia križovatiek je potrebné overiť správnosť fungovania, či riadenie dosiahlo žiadúci výsledok alebo naopak zhoršilo dopravnú situáciu. Pre overenie boli prevedené jak vizuálne pozorovania, tak aj zisťovanie priepustnosti križovatiek bez aj s riadením. Dvojica obrázkov 6.1 znázorňuje dve rôzne situácie po približne rovakom čase. Vrchný obrázok, v systéme je vygenerovaných 925 vozidiel a situácia na križovatke Kolište - Cejl je kritická. Podobná situácia nastáva aj iných miestach MMO, ako napríklad Šilngrovo námestie, Kolište - Křenova. Po zavedení riadenia pomocou metódy TAPIOCA (obrázok 6.1b) je situácia na križovatke viditeľne zlepšená aj napriek tomu že simulácia beží o pár minút dlhšie a v systéme je vygenerovaných viac vozidiel.

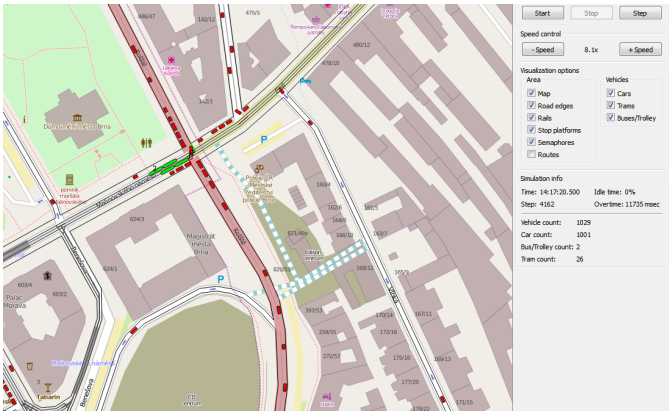
Priepustnosť systému bola zisťovaná globálnym evidovaním vozidiel, ktoré prešli ZU senzormi. Každé zaznamenanie senzorov inkrementovalo počet prejdených áut. Viacerými behmi simulátoru boli namerané a zaznamenané v tabuľkách 6.1 a 6.2 rôzne počty vozidiel. Priemerné hodnoty týchto meraní sú znázornené v grafe 6.2, kde modré stĺpce znázorňujú priepustnosť systému s použitím riadených križovatiek. Tieto hodnoty dokazujú zlepšenie oproti pôvodnému jednoduchému riadeniu o 14,8 % po 25 minútach behu simulátoru. Dlhší časový úsek nemá význam, pretože problémy uviaznutí vozidiel na niektorých nesvetelných križovatkách začnú blokovať rozsiahlu časť dopravnej siete, a tým pádom bránia v odchode aj zo svetelených.

Tabulka 6.1: Priepustnosť semafórov so základným riadením - pevný signálny plán

čas 14:00 - 14:25	**1.kolo**	**2.kolo**	**3.kolo**	**Priemer**
po 5 minútach	490	481	446	472,3
po 10 minútach	1502	1348	1251	1367
po 15 minútach	2337	2338	2145	2273,3
po 20 minutach	3307	3347	3014	3222,6
po 25 minutach	4308	4223	3749	**4093,3**



(a) Stav simulátoru so základným riadením

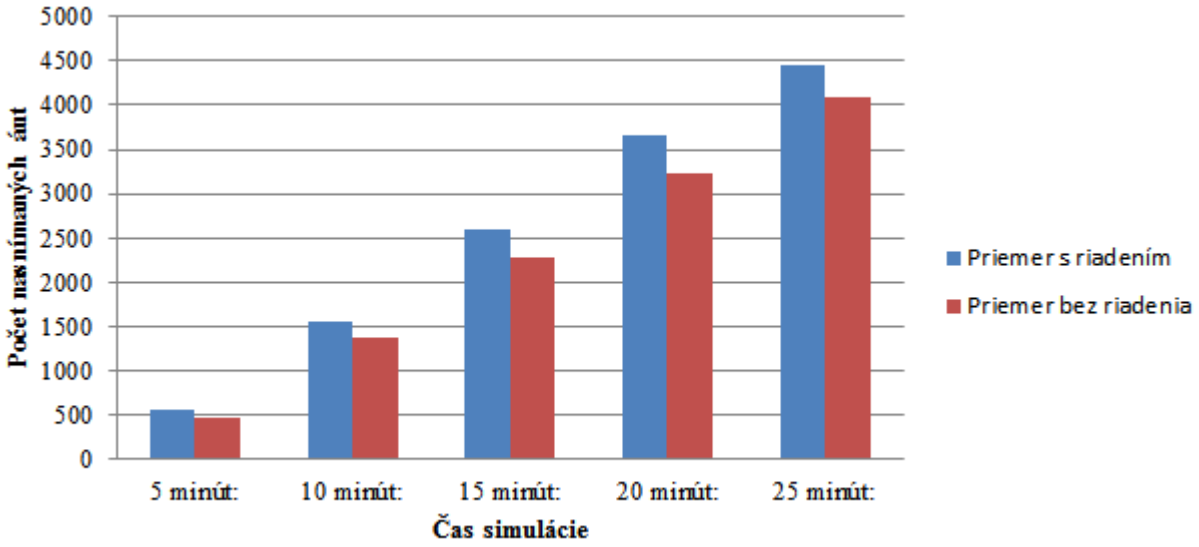


(b) Stav simulátoru s adaptívnym riadením

Obrázek 6.1: Porovnanie stavu dopravy

Tabulka 6.2: Priepustnosť semafórov s adaptívnym riadením - signálny plán na základe počtu vozidiel a LS

čas 14:00 - 14:25	**1.kolo**	**2.kolo**	**3.kolo**	**Priemer**
po 5 minútach	562	570	553	561,6
po 10 minútach	1531	1523	1591	1548,3
po 15 minútach	2539	2557	2667	2594,33
po 20 minutach	3574	3638	3763	3658,3
po 25 minutach	4360	4522	4484	**4455,3**



Obrázek 6.2: Porovnanie priepustnosti riadených križovatiek

Kapitola 7

Záver

V bakalárskej práci stručne vysvetľujem rôzne spôsoby riadenia križovatiek so SSZ. Bližšie sa venujem dynamickému spôsobu riadenia zvanému TAPIOCA (distribuTed and AdaPtive IntersectiOns Control Algorithm), ktorý som sa snažil do istej miery aj implementovať. Tento systém značne zlepšil stav dopravnej situácie v simulátore čo som aj ukázal v kapitole 6.4. Výsledky štatistík dokazujú zvýšenie kapacity križovatiek a taktiež znížili priemernú dobu čakania na semafóroch.

Pre dosiahnutie čo najlepšieho výsledku som musel naštudovať pravidlá tvorby signálnych plánov, rôzne spôsoby riadenia dopravy a zvoliť z viacerých možností. Ďalej som musel analyzovať zdrojové kódy simulátoru, najmä ako sú reprezentované cesty, križovatky a akým spôsobom bude možné komunikovať medzi križovatkami pri tvorbe zelených vĺn. Analýza simulátoru je popísaná v kapitole 4.

Pôvodný simulátor je možné použiť aj iné mestá ako je Brno za určitých podmienok špecifikovaných v jeho dokumentácii. Použitie verzie simulátoru s dynamickým riadením dopravy pre iné mestá bude možné po malom zásahu, a to úpravou súradníc križovatiek, na ktorých sa požaduje riadenie.

Z pohľadu ďalšieho vývoja tohto simulátoru, doporučujem hneď niekoľko možností. Prvým závažným problémom je vytváranie svetelných križovatiek, kde u tých zložitejších vznikajú dve samostatné. Myslím si, že riešením je rozšírenie simulátoru o spracovanie viacprúdových ciest čo by viedlo k vyplneniu úseku križovatky a k vzniku jedného uceleného dopravného uzlu. K dynamickému riadeniu viacprúdových križovatiek sa bude musieť jasne označiť každý jazdný pruh a upraviť agregátor pre ich riadenie. Súčasný systém rozhodovania vozidiel je založený na náhodnom určení cesty pre odbočenie. Aby sa systém priblížil čo najviac realite, musí sa jasne určiť priorita jednotlivých ciest. Zavedením hlavných a vedľajších ciest by sa vyriešil problém vznikajúcich zaseknutí v niektorých úsekoch a taktiež plynulejšiu jazdu po MMO.

Literatura

[1] AŽD Praha: Systém pro silniční dopravu - Dopravní detektory [online]. URL http://www.azd.cz/.

[2] Dopravní podnik města Brna: Řídící informační systém brněnské MDH [online]. URL http://www.dpmb.cz/Default.aspx?seo=ris-cz, [2016-01-23].

[3] Fakulta strojní, VŠB-TU Ostrava: Zvýšení vědeckovýzkumného potenciálu pracovníku a studentů technických vysokých škol v oblasti dopravy [online]. URL http://projekt150.ha-vel.cz/, 2009, [Online; navštívené 25.11.2015].

[4] Faye, S.; Chaudet, C.; Demeure, I.: A Distributed Algorithm for Multiple Intersections Adaptive Traffic Lights Control Using a Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the First Workshop on Urban Networking*, UrbaNe '12, New York, NY, USA: ACM, 2012, ISBN 978-1-4503-1781-8, s. 13–18, doi:10.1145/2413236.2413240. URL http://doi.acm.org.ezproxy.lib.vutbr.cz/10.1145/2413236.2413240

[5] Harris, T.: How Red-light Cameras Work [online]. URL http://auto.howstuffworks.com, 27 August 2001, [Online; navštívené 12.1.2016].

[6] Jan Cerný, A. C.: *Teorie řízení a rozhodování v dopravních systémech.* Institut Jana Pernera, o.p.s, 2004, iSBN 80-86530-15-9.

[7] Michal Šindelář: Park & Ride přichází do Brna. Jaké jsou vyhlídky? [online]. URL http://www.brnonakole.cz/park-ride-prichazi-do-brna-jake-jsou-vyhlidky, 2015.

[8] Ministerstvo dopravy: *Navrhování světelných signalizačních zařízení pri řízení provozu na pozemních komunikacích: Technické podmínky.* 2006, iSBN 80-86502-30-9.

[9] Němec, F.: *Simulátor MHD linek v Brně, bakalářska práce.* FIT VUT v Brně, 2014.

[10] Přibyl, P.; Svítek, M.: *Inteligetní dopravní systémy.* BEN - technická literatura, 2001, 543 s., iSBN 80-7300-029-6.

[11] Renáta Jaloviarová, Pravda: Zelená vlna pre žilinské autobusy [online]. URL http://spravy.pravda.sk/, 2015, [Online; navštívené 12.1.2016].

Přílohy

Seznam příloh

A Obsah CD **32**

Příloha A

Obsah CD

```
+-- app                      - súbory aplikácie.
|    |
|    +-- simulator           - simulátor liniek MHD v Brne.
|         |
|         +-- bin            - spustiteľný súbor pre platformu Windows
|         |                    spolu s potrebnými knižnicami a testovacími
|         |                    súbormy.
|         |
|         +-- src            - zdrojové súbory programu.
|         |
|         +-- readme.txt     - popis inštalácie a ovládanie aplikácie.
|
+-- doc                      - súbory dokumentácie.
|    |
|    +-- src                 - zdrojové súbory dokumentácie.
|    |
|    +-- dokumentacia.pdf    - projektová dokumentácia.
|
+-- readme.txt               - popis projektu.
```