

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

SIMULÁTOR MHD LINEK V BRNĚ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

FRANTIŠEK NĚMEC

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

SIMULÁTOR MHD LINEK V BRNĚ

PUBLIC TRANSPORT SIMULATION IN BRNO

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

FRANTIŠEK NĚMEC

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAROSLAV ROZMAN, Ph.D.

BRNO 2014

Abstrakt

Cílem této práce je navrhnout a implementovat simulátor linek městské hromadné dopravy na území Brna. Časy odjezdů jednotlivých linek jsou extrahovány z online jízdních řádů. Data, ze kterých je generována dopravní síť, jsou získána z projektu OpenStreetMap. Práce obsahuje popis základních přístupů k tvorbě dopravních simulátorů, zejména pak popis mikroskopického přístupu, na kterém je tento simulátor založen. Druhá část práce obsahuje návrh a implementaci simulátoru, jejíž hlavními částmi je způsob řízení vozidel, reprezentace dopravní sítě a její generování z OpenStreetMap dat.

Abstract

The goal of this thesis is to design and implement public transport simulator in Brno. Information about the departure times and routes of each public transport lines are extracted from online traffic timetables. Data from which traffic network is generated are obtained from OpenStreetMap project. The thesis contains a description of the basic approaches to create traffic simulators, especially the description of the microscopic approach on which is this simulator based. The second part of thesis includes the design and implementation of simulator, whose main components are ways of traffic management, representation of transport networks and the generation of OpenStreetMap data.

Klíčová slova

dopravní simulátor, simulace, mikroskopická simulace, OpenStreetMap, městská hromadná doprava, jízdní řády, Brno

Keywords

traffic simulator, simulation, microscopic simulation, OpenStreetMap, public transport, timetables, Brno

Citace

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

Simulátor MHD linek v Brně

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Jaroslava Rozmana Ph.D. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.....
František Němec
19. května 2014

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval Ing. Jaroslavu Rozmanovi Ph.D. za pomoc a odborné vedení mé práce.

© František Němec, 2014.

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	4
2 Městská hromadná doprava v Brně	5
2.1 Stručná historie	5
2.2 Současný stav	5
2.3 Řídící informační systém	6
3 OpenStreetMap	7
4 Dopravní simulace	8
4.1 Základní pojmy	8
4.1.1 Simulace	8
4.1.2 Model	8
4.1.3 Proces tvorby modelu	8
4.2 Typy dopravních simulací	9
4.2.1 Makroskopické simulace	9
4.2.2 Mikroskopické simulace	10
4.2.3 Mesoskopické simulace	10
4.3 Řídící modely	11
4.3.1 Car-Following model	11
4.3.2 Lane-Changing model	11
4.3.3 Gap-acceptance model	12
4.4 Nagel-Schreckenbergův model	12
5 Analýza současného stavu dopravních simulátorů	14
5.1 Malé opensource simulátory	14
5.2 Školní simulátory	15
5.3 Komerční simulátory	15
6 Návrh simulátoru	16
6.1 Reprezentace dopravní sítě	17
6.1.1 Buňka dopravní sítě	17
6.1.2 Proud dopravní sítě	18
6.1.3 Půlcesta dopravní sítě	18
6.1.4 Cesta dopravní sítě	19
6.2 Konstrukce dopravní sítě	19
6.3 Zpracování OSM tras linek MHD	20
6.4 Jízdní řády	20

6.5	Kalendář výjezdů	21
6.6	Reprezentace vozidel	21
6.7	Průběh simulace	22
7	Implementace simulátoru	23
7.1	Použité nástroje	23
7.2	Struktura simulátoru	23
7.2.1	Třída <code>Simulation</code>	23
7.2.2	Třída <code>SimulationControl</code>	24
7.2.3	Třída <code>SimulationData</code>	24
7.2.4	Třída <code>NetworkConvertor</code>	25
7.2.5	Třída <code>RouteConvertor</code>	25
7.2.6	Třída <code>LineCreator</code>	26
7.2.7	Třída <code>Visualization</code>	26
7.2.8	Třída <code>ScheduleDownloader</code>	26
7.3	Reprezentace a chování vozidel	26
7.3.1	Parametry vozidel	27
7.3.2	Vnitřní stav vozidel MHD	28
7.3.3	Rozhodovací proces	29
7.4	Implementace základu procesu rozhodování	29
7.4.1	Počátek rozhodovacího procesu	29
7.4.2	Rozhodování na úseku s křižovatkami	30
7.4.3	Rozhodování na úseku bez křižovatek	31
7.5	Rozšířený proces rozhodování tramvají	31
7.6	Rozšířený proces rozhodování autobusů a trolejbusů	32
7.7	Úprava rychlosti	33
8	Ověření simulátoru	34
9	Závěr	35
A	Příklad struktury zpracovaných jízdních řádů ve formátu XML	38
B	Manuál	39
B.1	Úvodní dialog s výběrem souborů	39
B.2	Hlavní okno simulátoru	39
C	Obsah CD	41

Seznam obrázků

2.1	Webová aplikace využívající informace z Řídicího Informačního Systému, která zobrazuje polohy linek městské hromadné dopravy v Brně [17].	6
4.1	Proces tvorby modelu.	9
4.2	Úrovně dopravních simulací, převzato z [3].	11
4.3	Schéma gap-acceptance modelu.	12
5.1	Simulátor křižovatek [13].	14
5.2	Ukázka mikroskopické simulace z AIMSUN simulátoru [16].	15
6.1	Schéma základní struktury simulátoru.	16
6.2	Struktura úrovní dopravní sítě.	17
6.3	Náčrt převodu OpenStreetMap dat na buňky dopravní sítě.	19
7.1	Struktura hlavních tříd simulátoru.	24
7.2	Strukturace typů vozidel.	27
7.3	Schéma vnitřních stavů městské hromadné dopravy.	28
7.4	Schéma konečného automatu základního rozhodovacího procesu.	30
7.5	Schéma konečného automatu rozhodovacího procesu tramvají se zvýrazněnými novými stavy oproti základnímu rozhodovacímu procesu.	31
7.6	Schéma konečného automatu rozhodovacího procesu autobusů a trolejbusů se zvýrazněnými novými stavy oproti základnímu rozhodovacímu procesu.	32
B.1	Dialog s výběrem souborů pro simulaci.	39
B.2	Hlavní okno simulátoru.	40

Kapitola 1

Úvod

V dnešním světě si život bez dopravy skoro nedokážeme představit a závisí na něm mnohá odvětví celé společnosti. Kvalita dopravní infrastruktury výrazně ovlivňuje rychlost rozvoje daného regionu, a proto je důležité, aby byla dostatečně robustní.

V současné době neustále roste počet automobilů všech druhů, které nepříznivě působí na životní prostředí v podobě výfukových plynů anebo vysoké spotřebě pohonných hmot. Některé dopravní sítě již nemusí unést stále rostoucí počet automobilů a mohou vznikat zácpy nebo dlouhé prostoje na křižovatkách. Některé negativní vlivy se nemusí projevit okamžitě, ale až postupem času, kdy zvládnutí takové situace může být jak časově tak finančně náročné. Je tedy velice důležité snažit se těmto negativním vlivům co nejvíce vyhnout.

Tyto negativní vlivy lze výrazně redukovat použitím městské hromadné dopravy, která je ve většině ohledech mnohem efektivnější, i když oproti osobnímu transportu trpí některými nedostatky. Při nasazení MHD je velice důležité až kritické, správně definovat jejich trasy, rozmístění zastávek a časy odjezdů a příjezdů, které mají velký vliv na stabilitu celého systému dopravy.

Při návrhu dopravní sítě se často používají simulátory, které umožňují levně, poměrně rychle a přesně navrhout dopravní síť, otestovat její různé parametry a nalézt úzká místa, která by v již hotové dopravní síti bylo obtížné eliminovat. Slabými místy může být nevhodně zvolený počet pruhů, špatná synchronizace světelného řízení a jiné. S otázkou přesnosti vystupuje obecně největší problém simulátorů a tím je jejich validita, která se někdy obtížně prokazuje. Dopravní simulátory lze jednak využít při návrhu nové dopravní sítě, ale stejně tak je lze využít pro optimalizaci již stávajících.

První kapitola práce obsahuje popis městské hromadné dopravy v Brně, její stručnou historii, současný stav a řídicí informační systém, podle kterého je v současné době městská hromadná doprava v Brně řízena. Následuje kapitola zabývající se projektem OpenStreetMap. Dále následuje sekce, obsahující popis základních typů dopravních simulací a řídicích modelů, na kterých je založena většina mikroskopických simulátorů. Teoretická část je ukončena analýzou současných dopravních simulátorů.

Praktická část zahrnuje návrh a implementaci samotného simulátoru. První část obsahuje popis reprezentace a rozdělení dopravní sítě. Následuje způsob zpracování OpenStreetMap dat a jejich převod na dopravní síť. Dále je uvedena krátká sekce zabývající se jízdními řádů a způsobem generování linek MHD. Implementační část se zabývá architekturou simulátoru a popisem hlavních tříd, spolu s popisem některých důležitých postupů. Hlavní sekci implementační části je detailní popis reprezentace a chování vozidel, zejména pak implementace rozhodovacího procesu.

Kapitola 2

Městská hromadná doprava v Brně

V současné době má na starost MHD v Brně *Dopravní podnik města Brna*, který je součástí Integrovaného dopravního systému Jihomoravského kraje.

2.1 Stručná historie

Městská hromadná doprava v Brně [9] byla zahájena 17. srpna 1869 zprovozněním první koněspřežné dráhy. Dne 24. května 1884 byl zahájen provoz parní pouliční dráhy. Poslední parní lokomotiva rozvázela železniční nákladní vozy ulicemi města až do února 1926.

V roce 1900 započala výstavba pouliční dráhy s elektrickým pohonem. Provoz byl zahájen 21. června 1900 na upravených tratích parní dráhy. O 30 let později zavedla Společnost brněnských pouličních drah jako doplněk stávající tramvajové dopravy dopravu autobusovou. Dne 5. května 1946 byl zahájen provoz lodní dopravy.

V červenci 1949 se zahájil provoz na nově vybudovaných trolejbusových tratích. Původní akciová společnost provozující městskou hromadnou dopravu byla koncem 40. let nahrazena komunálním podnikem, který od roku 1951 dostal dnešní název *Dopravní podnik města Brna*.

2.2 Současný stav

Momentálně je v provozu pět vozoven (Pisárky, Medlánky, Husovice, Slatina a Komín), kde každá spravuje určité typy městské dopravy. Tramvaje jsou ve správě vozoven Pisárky a Medlánky. Slatina a Medlánky odpovídají za autobusovou dopravu. Vozovny v Husovicích, Slatině a Komíně mají odpovědnost nad trolejbusy. Vozové parky jsou nepřetržitě obnovovány, např. v roce 2011 byly dodány nové tramvaje typu Porshe (označení Škoda 13T5) nebo nové autobusy typu Crossway LE 12M, které byly dodány v roce 2010. Ke dni 31.12.2012 je v provozu 313 tramvají, 151 trolejbusů a 298 autobusů [7].

Raritou v oblasti MHD jsou Brněnské noční rozjezdy, které poskytují obyvatelům Brna možnost přepravy v nočních hodinách. Noční doprava sice neobsluhuje všechny zastávky denního provozu, ale i přesto pokrývá celé území Brna.

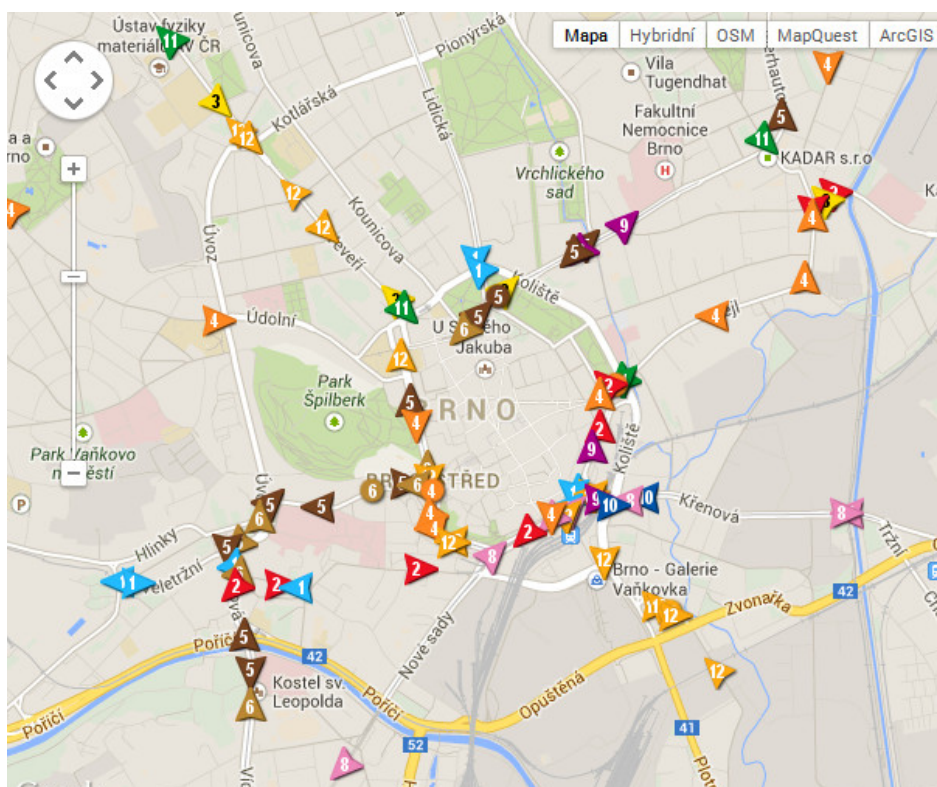
Mozkem dopravního podniku je *dispečink*, který má za úkol monitorovat aktuální situaci dopravy a na jejím základě řídit tok městské hromadné dopravy. Jádrem dispečinku je *Řídící informační systém*, který je podrobněji popsán v následující kapitole.

2.3 Řídící informační systém

Dopravní podnik města Brna používá moderní nástroj k řízení městské hromadné dopravy, kterým je Řídící Informační Systém (dále RIS) [8]. RIS slouží k okamžitému rozpoznání odchylek v provozu MHD a k jejich rychlé a úspěšné eliminaci. Základem RIS je datová rádiová síť pro trvalé spojení všech vozidel MHD s dispečinkem. Každé vozidlo předává na dispečink automaticky v intervalu přibližně 20 sekund svoje provozní údaje – mj. skutečný čas odjezdu od zastávky, fyzickou polohu podle družicové navigace GPS a další důležitá provozní data.

Řídící informační systém umožňuje dokonalejší preferenci vozidel MHD na řízených křižovatkách. Zpožděné vozidlo odešle z předem stanoveného místa prostřednictvím rádiového datového přenosu žádost o preferenci. Řadič semaforů obdrží údaj o trase průjezdu vozidla křižovatkou a o hodnotě zpoždění. Vozidlo poté oznamuje úspěšný průjezd křižovatkou. Tato tzv. *dynamická preference* dovolí na křižovatce hospodařit s každou sekundou signálního plánu a ve svém důsledku zajistí lepší průjezdnost pro všechna vozidla, nejen pro tramvaje, trolejbusy a autobusy.

V případě potřeby se z vozidla na centrálu a opačně posílají textové zprávy a povely pro informační zařízení pro cestující. Projekt RIS také zajišťuje ozvučení všech vozidel MHD, vyhlašování názvů zastávek a důležitých informací a zajišťuje automatickou odpověď na povel kapesního slepeckého vysílače¹.



Obrázek 2.1: Webová aplikace využívající informace z Řídícího Informačního Systému, která zobrazuje polohy linek městské hromadné dopravy v Brně [17].

¹Nevidomá osoba si na zastávce může pomocí vysílače rádiového signálů vyžádat hlášení o číslu linky a směru jízdy vozidla nebo ním potvrdit nástup, které upozorní samotného řidiče vozidla.

Kapitola 3

OpenStreetMap

OpenStreetMap (dále OSM) [6] je projekt, který si klade za cíl vytvořit a volně poskytovat mapy celého světa. OSM na rozdíl od ostatních volně dostupných digitálních map poskytuje samotná data. OSM projekt byl inspirován projekty jako Wikipedie, od kterých přejímá ideu tvorby obsahu samotnými uživateli. Mapy udržují informace o silnicích, cestách, cyklostezkách, ulicích, parcích, památkách, železničních stanicích, zastávkách hromadné dopravy a dalších. Projekt byl založen v roce 2004 Stevem Coastem z Velké Británie.

V průběhu vývoje se do projektu zapojovaly společnosti jako Yahoo nebo Microsoft, které poskytly letecké snímky. Další společností, která velkou měrou přispěla k rozvoji map je Automotive Navigation Data, která poskytla kompletní mapy Nizozemska, Indie a Číny. Mezi další sponzory také patří Google nebo Česká Republika, která poskytla mapy silnic 1. a 2. třídy.

OSM jsou využívány širokou škálou aplikací určené jak pro stolní počítače tak mobilní zařízení. Mapy používají různé organizace např. samotná Wikipedia, Oxford University nebo Apple, který je z části používá pro tvorbu svých iOS map. Data také používá aplikace zobrazující aktuální pozice MHD z obrázku 2.1. Mapy byly použity během zemětřesení v Haiti¹ v roce 2010, kde dobrovolníci zmapovali cesty, budovy a humanitární tábory. Celá oblast byla zmapovaná za pouhé dva dny a tím byla vytvořena detailní digitální mapa Haiti. Data byla užita nespočtem organizací poskytující humanitární pomoc, kterým nemálo pomohla v orientaci a plánování cest.

Základem tvorby geodat jsou GPS přijímače nebo jiné digitalizované mapy, které mají volně šiřitelnou licenci. Tvorba map je také podpořena družicovými snímky. Zpočátku mapy tvořili jen uživatelé za pomoci GPS zařízení, notebooků a digitálních kamer. Pozdější přístup k leteckým snímkům od společností Yahoo a Microsoft velkou měrou urychlil tvorbu map a zároveň zvýšil její přesnost.

Jak bylo zmíněno na počátku, samotní uživatelé pomocí GPS přijímačů získávají geografické údaje. Jakmile jsou data nashromážděna, jsou vložena do databáze. V této fázi mapy obsahují jen čistá data (vektory) a je nutné doplnit popisy silnic, jejich typy, názvy ulic a další informace. Data lze lehce editovat jakýmkoliv z mnoha vytvořených editorů GPS dat. Doplnění je většinou provedeno samotným sběračem dat, ale mohou být doplněna jiným uživatelem bez nutnosti vlastnit GPS zařízení. Kdokoli se tedy může připojit a přispět např. doplněním označení objektů jako jsou školy, památky, zastávky hromadné dopravy, obchody atd.

¹Wikipedia: OpenStreetMap [online]. URL <http://en.wikipedia.org/wiki/OpenStreetMap>, [2013-12-29].

Kapitola 4

Dopravní simulace

4.1 Základní pojmy

4.1.1 Simulace

Pojem *simulace* lze vyložit mnoha způsoby v závislosti na kontextu, ve kterém se vyskytuje. Obecně lze simulaci definovat jako snahu o napodobení reálného systému, situace nebo procesu. Konkrétnější pojem *počítačová simulace* lze definovat jako snahu o modelování reálného nebo hypotetického systému na počítačích za účelem sledování chování systému.

4.1.2 Model

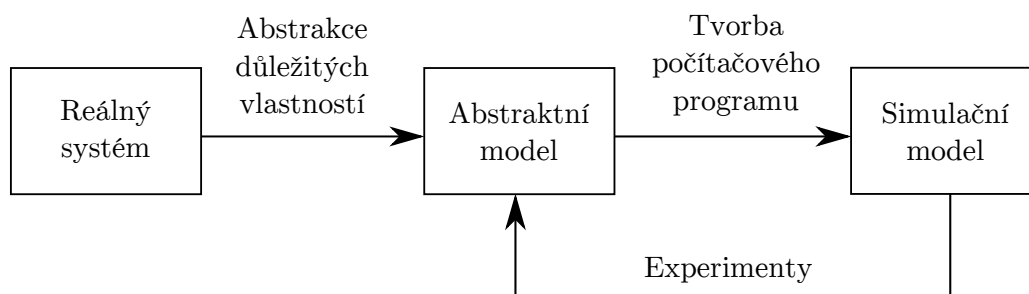
Model je napodobenina systému (reálného nebo hypotetického) jiným systémem [15]. Model reprezentuje podstatné vlastnosti nebo chování fyzického nebo abstraktního systému nebo procesu. Modelování je obecně velmi náročné a často vyžaduje znalosti z více oborů.

4.1.3 Proces tvorby modelu

K provádění simulací je nejprve nutné vytvořit model, na kterém budou simulace prováděny. Tvorba modelu obsahuje několik fází a celý proces není triviální záležitostí.

- Proces začíná *analýzou zkoumaného systému*. Analýza je zaměřena na podstatné vlastnosti, které jsou důležité pro simulaci a zároveň jsou ignorovány vlastnosti, které na model nemají žádný vliv a jen by celý proces zbytečně zkomplikovaly. Z analyzovaných informací je vytvořen *abstraktní model*. Sledovaný systém a abstraktní model se nachází ve vztahu N:1, který se nazývá *homomorfní vztah*.
- Dalším krokem je tvorba *simulačního modelu*, který je vytvořen zápisem abstraktního modelu do počítačového programu. Při jeho tvorbě už k žádnému zjednodušení nedochází. Simulační a abstraktní model si musí odpovídat v poměru 1:1. Tento vztah se nazývá *izomorfní*.
- Před zahájením simulací je provedena *verifikace*, což je ověřování korespondence abstraktního a simulačního modelu [15]. Po vytvoření a verifikaci simulačního modelu je provedeno několik iterací, kdy se s modelem experimentuje a jeho výsledky jsou porovnány s výsledky simulovaného systému. Pokud výsledky neodpovídají, jsou provedeny úpravy na abstraktním modelu, které jsou dále přeneseny na model simulační.

- Posledním a nejdůležitějším krokem je *validace*. Validace je dokazování, že pracujeme s modelem adekvátním modelovanému systému. Jedná se o největší problém modelování [15]. V porovnání oblasti dopravních simulací a jiných systémů je tato fáze poměrně jednoduchá a to z důvodu, že reálný systém je k dispozici a lze z něj poměrně jednoduše získat data potřebná k porovnání vytvořeného modelu a reálného systému.



Obrázek 4.1: Proces tvorby modelu.

4.2 Typy dopravních simulací

Simulace dopravy lze rozdělit do několika kategorií podle toho zda je čas, stav a prostor spojité nebo diskrétní. Existují tři základní typy simulací: makroskopické, mikroskopické a mesoskopické. Jednotlivé typy simulací jsou zobrazeny na obrázku 4.2. Při výběru určitého typu simulace je nutné brát ohled na velikost dopravní sítě a požadovanou úroveň detailu.

4.2.1 Makroskopické simulace

Makroskopické simulace modelují dopravu pomocí proudů, často používající formulace založených na teoriích proudění kapalin. Existují tři základní parametry, které jsou esenciální pro jakékoli makroskopické modely [4]:

- *Tok*: Tok q je definován jako počet vozidel projíždějící určitý bod na silnici za určitou jednotu času, obvykle počet vozidel za hodinu.
- *Rychlost*: Rychlost v je definována jako vzdálenost, kterou vozidlo překoná za jednotku času, obvykle kilometr za hodinu.
- *Hustota*: Hustota k je definována jako počet vozidel, které se nachází na segmentu silnice, obvykle počet vozidel na kilometr.

Tyto parametry jsou provázány, jak je ukázáno na následující rovnici:

$$q = v \cdot k \quad (4.1)$$

Mezi základní simulační možnosti patří přidělení dopravní zátěže na simulační síť, identifikace „dopravních hrdel“, tvorba šokových vln, apod. Jejich podstata je velice blízká standardním dopravně kapacitním výpočtům [10].

Největší nevýhoda makroskopických simulací je nemožnost rozpoznání různých typů vozidel a z toho plynoucí obtížné simulování komplexních městských sítí, kde se právě

nachází velké množství různých typů vozů. Tato nevýhoda se nevztahuje jen na typy vozidel, ale také na typy řidičů s rozdílnými vlastnostmi a chováním.

Výhody makroskopických simulací je jejich nižší výpočetní a implementační náročnost. Z toho plyne možnost simulování velkých dopravních sítí, kde přesnost je méně důležitá [2].

4.2.2 Mikroskopické simulace

Mikroskopické (někdy také označovány jako diskrétní) simulace umožňují detailně popisovat dopravní síť a jednotlivé účastníky provozu, díky kterým je možné modelovat a vyhodnocovat komplikované transportní sítě s velkou přesností. Simulace může využívat následující parametry:

- *Vozidlo*: rozměry, maximální rychlost, zrychlení, zpomalení.
- *Řidič*: zkušenosti, agresivita, reakční doba.
- *Vozovka*: maximální povolená rychlost, šířka, počet pruhů.

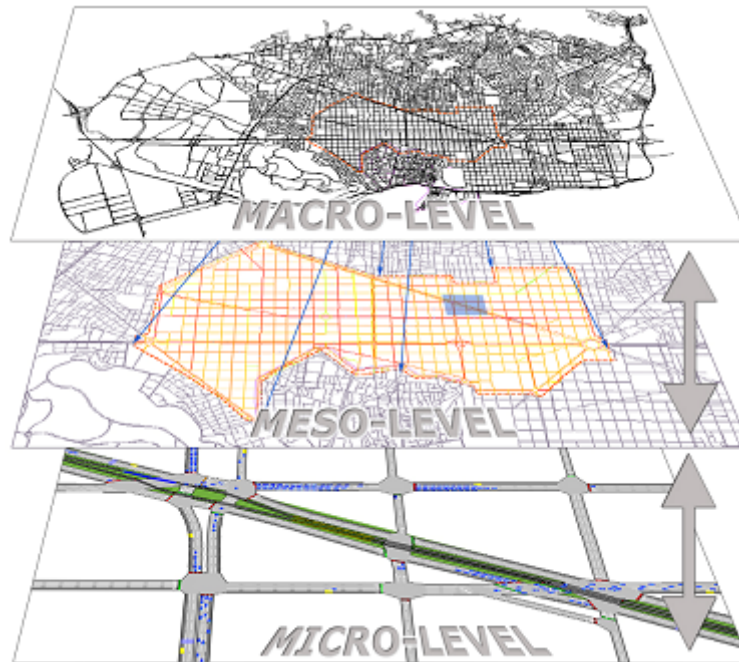
Simulace je provedena na základě interakce jednotlivých prvků dopravní sítě a je řízena různými simulačními modely, které jsou podrobněji popsány v kapitole 4.3. Díky velkým možnostem nastavení jednotlivých parametrů účastníků provozu a dopravní sítě, simulace poskytuje výsledky, které více odpovídají chování reálného systému.

Kvůli vysoké úrovni detailnosti modelu může být obtížné a časově náročné získávat potřebná data s čímž je dále spojena netriviální kalibrace celého systému [5]. Další nevýhodou je větší výpočetní a implementační náročnost oproti makroskopickým simulacím. Zjevné je také omezení simulace na menší dopravní plochy, resp. náročná škálovatelnost vzhledem k velikosti simulované oblasti.

Výsledkem jsou detailní informace o dopravě v daném úseku týkající se např. délky proužků a front na křižovatkách nebo propustnost. Mikroskopické simulace lze také modifikovat pro potřeby analýzy vlivu dopravy na životní prostředí, objemu emisí, množství generovaného hluku a jiné.

4.2.3 Mesoskopické simulace

Je velice obtížné obecně definovat mesoskopické simulace, ale dá se říci, že mesoskopické simulace tvoří určitý průnik mikroskopických a makroskopických simulací a snaží se vhodně kombinovat jejich vlastnosti. Je velice složité navrhnout mesoskopický model přesně na pomezí mikroskopických a makroskopických modelů, a proto se výsledné modely přiklání právě k jednomu z nich. Implementace také není jednoduchá z důvodu zajištění kompatibility a synchronizace.



Obrázek 4.2: Úrovně dopravních simulací, převzato z [3].

4.3 Řídící modely

Chování vozidel v mikroskopických simulacích je popsáno tzv. řídicími modely [1], které mají za úkol rozhodovat o budoucím chování vozidla na základě podnětů z dopravní sítě. Modely nepracují samostatně, ale jsou navzájem propojeny a tvoří jednotný celek.

4.3.1 Car-Following model

Car-Following model [12] (model následování vozidla) se zaměřuje na popis chování v případě, že jedno vozidlo následuje jiné. Model předpokládá, že se řidič pokusí udržet rychlost s vozidlem před ním a zároveň předejde kolizi. Jak toho dosáhne, záleží na schopnostech a zkušenostech daného řidiče. Tento model se také uplatňuje pokud vozidlo nikoho nenásleduje (tzv. „free-flow“ režim), přičemž se snaží dosáhnou maximální možné rychlosti.

4.3.2 Lane-Changing model

Lane-Changing model [1] (model změny jízdního pruhu) definuje chování vozidla v případě, kdy chce vozidlo přejet do vedlejšího pruhu.

Změna pruhu může být volitelná nebo nutná. Nutná změna pruhu nastává např. z důvodu ukončení pruhu, objetí překážky nebo za účelem sledování trasy. Na druhou stranu, pokud řidič změni pruh za účelem zlepšení své situace (např. zvýšení rychlosti), změna pruhu se nazývá volitelnou. Proces změny pruhu zahrnuje základní čtyři kroky:

1. Rozhodnutí zda vůbec měnit pruh.
2. Volba cílového pruhu.

3. Vyhodnocení volného místa v cílovém pruhu.
4. Pokud lze bezpečně provést změnu pruhu, je provedena.

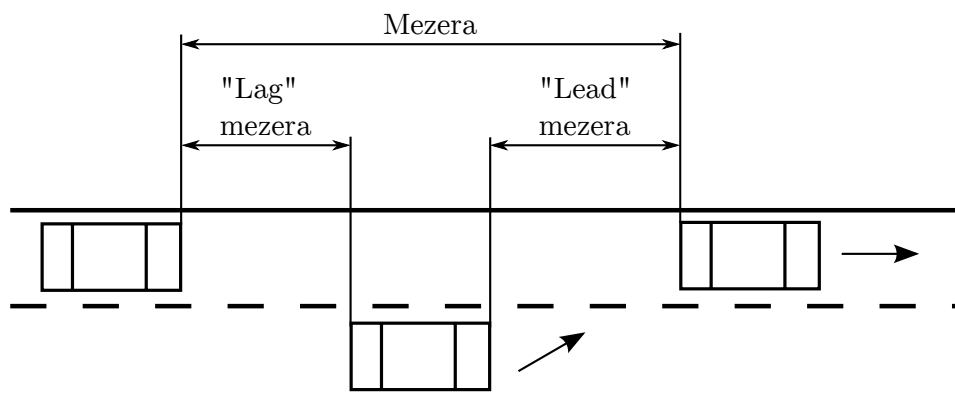
Model spolupracuje s car-following modelem, který se stará o situaci před vozidlem a zároveň spolupracuje s gap-acceptance modelem, který poskytuje informace o situaci ve vedlejším pruhu.

4.3.3 Gap-acceptance model

Gap-acceptance model (model přijatelných mezer) nepracuje samostatně a nerozhoduje o chování vozidla, ale úzce spolupracuje s lane-changing modelem, pro který zjišťuje, zda je změna pruhu možná. Jeho úlohou je zpracovávat a vyhodnocovat situaci ve vedlejším pruhu. Zejména sleduje vzdálenosti (mezery) mezi jednotlivými vozy a jejich rychlosti. Model tyto informace vyhodnotí a určí zda je změna pruhu možná. Tyto informace předává lane-changing modelu.

V souvislosti s tímto modelem se objevují pojmy jako „lag gap“ (lze přeložit jako zao-
stávací mezera) a „lead gap“ (lze přeložit jako vedoucí mezera):

- *Vedoucí mezera*: vzdálenost mezi sledovaným vozidlem a vozidlem v cílovém pruhu, které by se nacházelo **před** sledovaným vozidlem, pokud by provedlo změnu pruhu.
- *Zaostávající mezera*: je definována obdobně jako vedoucí mezera s tím rozdílem, že vzdálenost je porovnávána vůči vozidlu **za** aktuálně sledovaným vozidlem.



Obrázek 4.3: Schéma gap-acceptance modelu.

4.4 Nagel-Schreckenbergův model

Za základní model dopravy je považován Nagel-Schreckenbergův model [14], který v roce 1992 představil Kai Nagel a Michael Schreckenberg. Tento model obsahuje minimální počet pravidel a další zjednodušování by vedlo k nerealistickému chování.

Dopravní síť je tvořena jednorozměrným polem buněk. Okraje pole jsou cyklicky uzavřeny nebo otevřeny. Každá buňka je buďto prázdná nebo obsahuje vozidlo a zároveň vozidlo může být právě v jedné buňce. Délka buňky je zvolena na 7,5 metrů, což odpovídá délce vozidla spolu s prostorem před a za vozidlem pokud stojí v koloně. Všechna vozidla obsahují

atribut v , který určuje jejich rychlost neboli počet buněk o které se vozidlo posune za jeden krok simulace. Rychlost může nabývat hodnot $v \in \langle 0, v_{max} \rangle$.

Simulace je složena ze čtyř kroků, které jsou aplikovány paralelně na každé vozidlo v systému:

1. **Zrychlení:** pokud je rychlost vozidla menší než v_{max} a pokud je vzdálenost dalšího vozidla větší než $v + 1$, je rychlost vozidla zvětšena o jedna [$v = v + 1$].
2. **Zpomalení:** pokud vozidlo v buňce i vidí další vozidlo v buňce $i + j$ a zároveň $j \leq v$, zmenší svoji rychlost na $j - 1$ [$v = j - 1$].
3. **Náhodnost:** s pravděpodobností p je rychlost vozidla (pokud je větší jak nula) zmenšena o jedna [$v = v - 1$].
4. **Posun vozidel:** každé vozidlo postoupí o v buněk.

Krok 3 je důležitý zejména k simulaci realistickému chování vozidel. Pravidlo simuluje výkyvy rychlosti vozidel způsobené lidským chováním a vnějšími podmínkami. I přesto, že model vykazuje realistické chování i s tak malým počtem pravidel, pro použití ve složitějších simulacích je třeba model dále rozšířit.

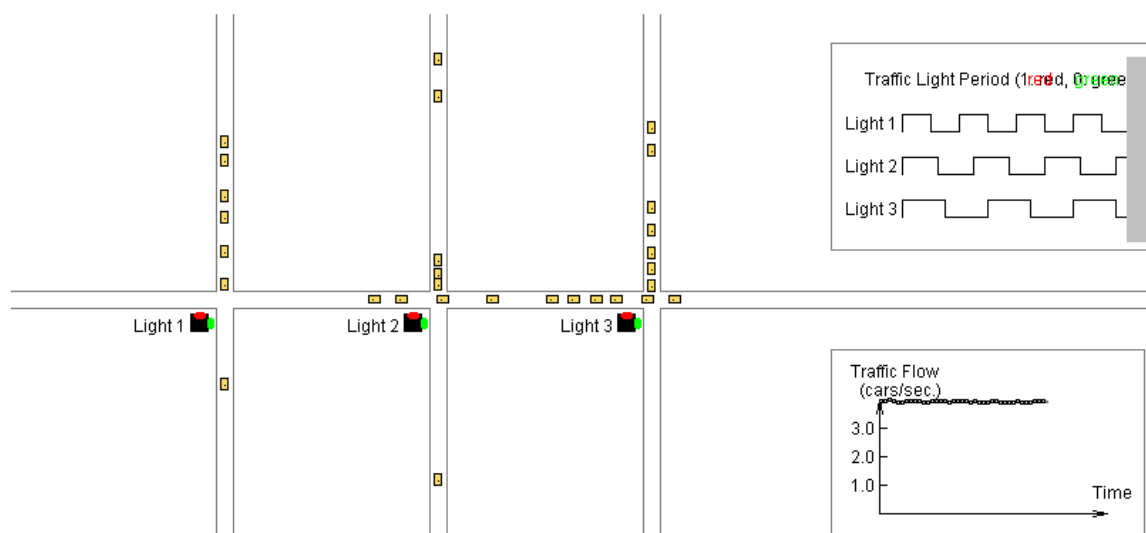
Kapitola 5

Analýza současného stavu dopravních simulátorů

Dopravní simulátory jsou velice specifické produkty, neboť je moc složité až nemožné vytvořit obecný simulátor. Při specifikaci simulátorů je potřeba brát ohled na jejich kvalitu zpracování, možnosti nasazení a na prostředí, ve kterém vznikly.

5.1 Malé opensource simulátory

Jedná se o malé aplikace, často pouze applety. Zaměřují se na jeden specifický problém a spíše na jeho demonstraci než na řešení. Grafické rozhraní těchto simulátorů bývá velice jednoduché, obsahující jen zobrazení dané problematiky s možností nastavení základních parametrů a zobrazení jednoduchých statistických výsledků.



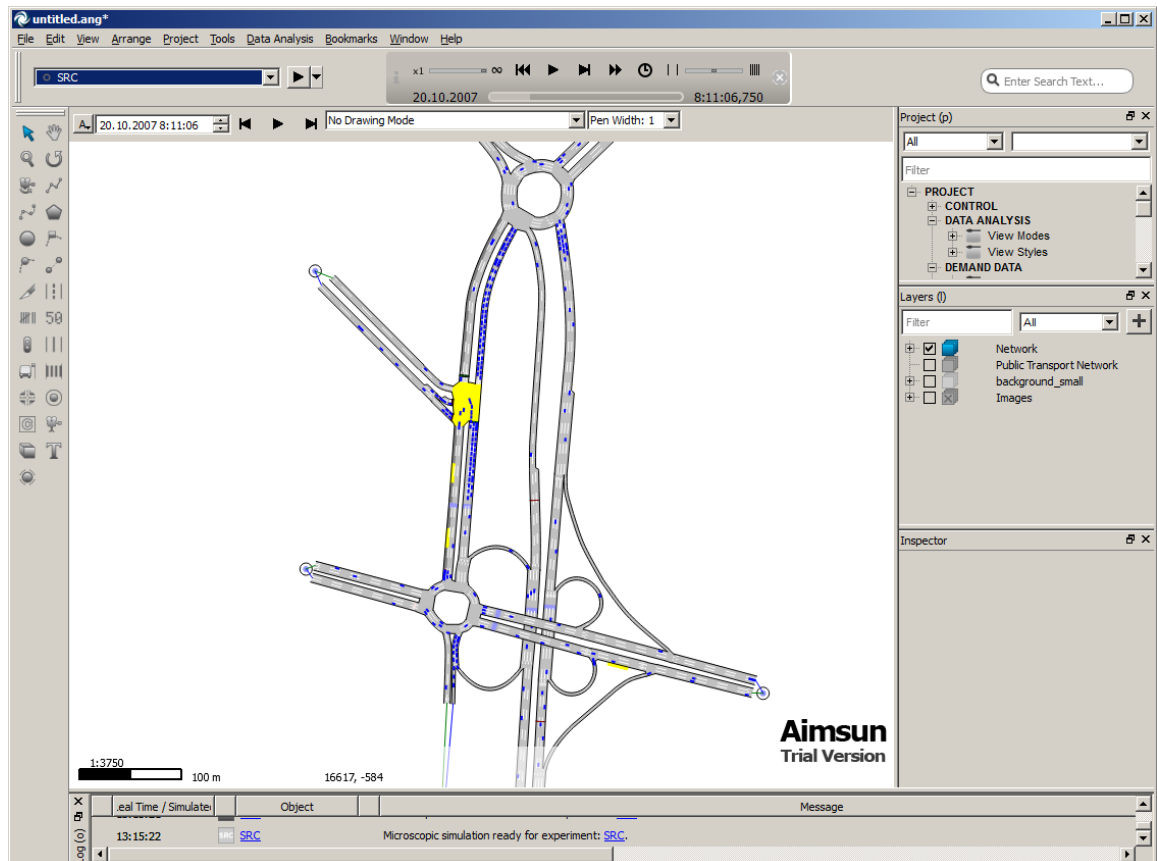
Obrázek 5.1: Simulátor křižovatek [13].

5.2 Školní simulátory

Autoři těchto simulátorů jsou často studenti nebo pracovníci vysokých škol. Stejně jako malé simulátory jsou poměrně úzce zaměřeny, ale danou oblast zpracovávají detailně a kvalitně. Někdy jsou vyvíjeny ve spolupráci se státními dopravními institucemi.

5.3 Komerční simulátory

Jedná se o ty nejlepší a nevykonnější dopravní simulátory, od čeho se i odvíjí jejich cena. Lze je použít pro řešení nejrůznějších problémů na makroskopické, mikroskopické a často i mesoskopické úrovni simulace. Kvůli jejich vysoké výpočetní náročnosti jsou často vytvářeny za účelem provozu na distribuovaných systémech. Součástí bývá propracované jak 2D tak 3D grafické uživatelské rozhraní, které napomáhá lehčímu pochopení daného problému a zároveň umožňuje zobrazit průběhy a výsledky simulací z nejrůznějších úhlů pohledu. Simulátory často umožňují propojení s jinými softwarovými nástroji. I přes vysokou cenu nacházejí uplatnění v nejrůznějších oborech, např. při simulaci evakuace obyvatel za přírodné různými přírodními katastrofami [11].

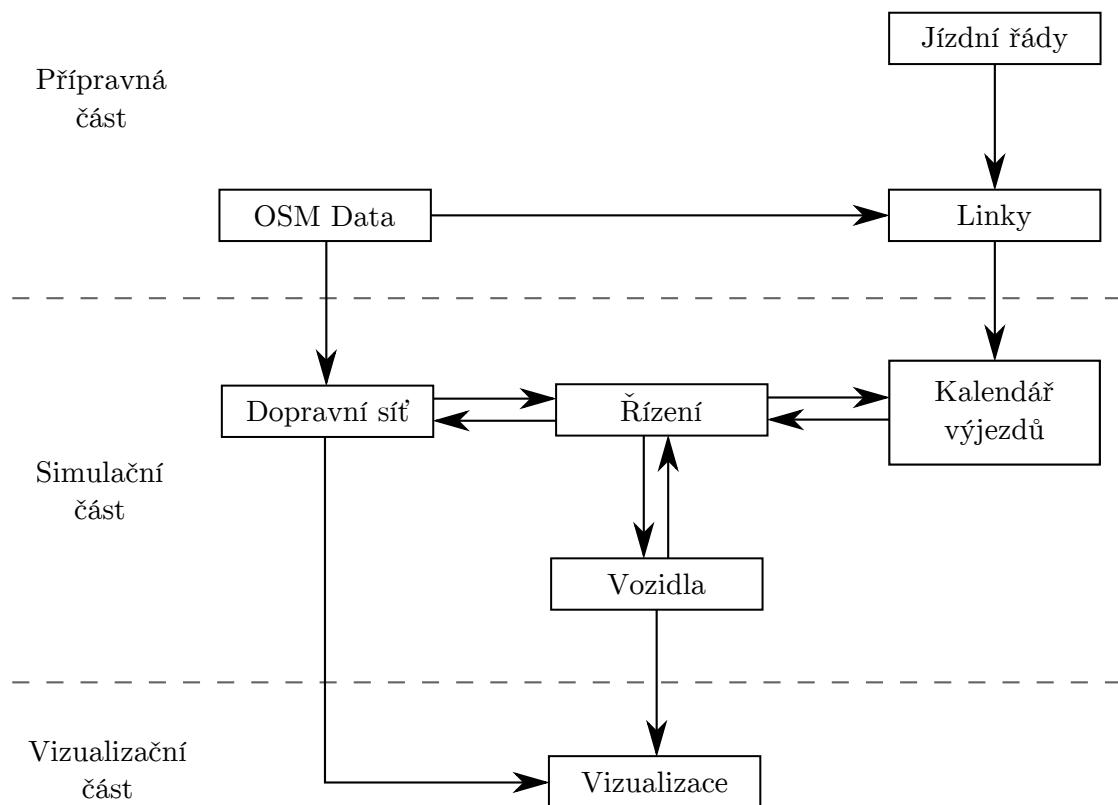


Obrázek 5.2: Ukázka mikroskopické simulace z AIMSUN simulátoru [16].

Kapitola 6

Návrh simulátoru

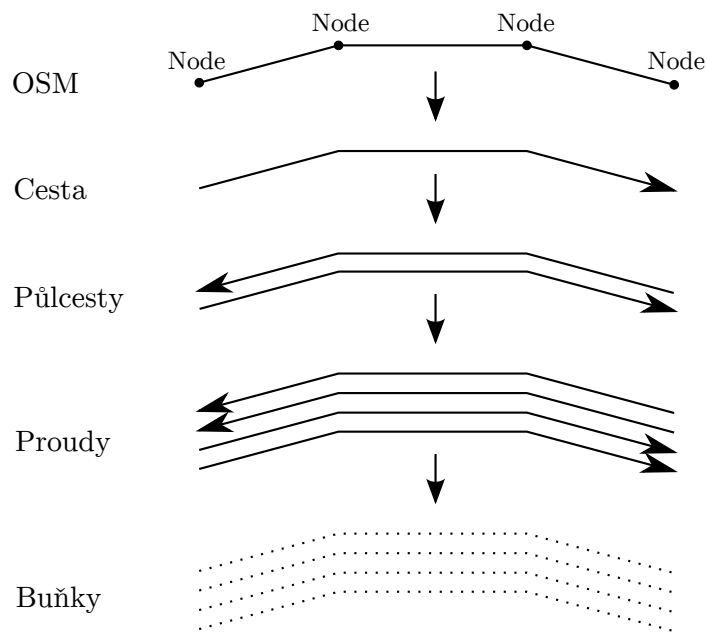
Simulátor je rozdělen na tři hlavní části, jak je zobrazeno na obrázku 6.1. První část je přípravná část, která obsahuje zpracování vstupních souborů simulace, vytvoření dopravní sítě a záznamu o linkách MHD. Druhá část je simulační část, která zahrnuje generování a řízení vozidel v dopravní síti. Poslední částí je vizualizace aktuální situace dopravní sítě, vozidel a semaforů. Jednotlivé části jsou blíže popsány v následujících kapitolách.



Obrázek 6.1: Schéma základní struktury simulátoru.

6.1 Reprezentace dopravní sítě

Síť je tvořena různými prvky, které jsou navzájem propojeny a kde každá úroveň plní určitý účel. Na nejvyšší úrovni stojí OpenStreetMap cesta, ze které jsou vytvořeny cesty dopravní sítě. Cesty jsou dále děleny na půlcesty, které se skládají z jednotlivých proudů vozovky. Nejnižší úroveň tvoří buňky, které jsou základem celé dopravní sítě. Jednotlivé úrovně jsou navzájem propojeny, aby bylo možné např. zjistit do jaké cesty náleží určitá buňka.



Obrázek 6.2: Struktura úrovní dopravní sítě.

6.1.1 Buňka dopravní sítě

Základ sítě tvoří buňky, které už nejsou dále dělitelné a ze kterých jsou vytvořeny všechny cesty, křižovatky a zastávky.

Šířka buňky odpovídá celé šířce jednoho proudu vozovky. Délka buňky určuje, jakou minimální vzdálenost je simulace schopna rozeznat, neboli minimální vzdálenost, kterou může vozidlo pokrýt v jednom kroku. Délka buňky by měla být dostatečně malá, aby bylo dosaženo co nejjemnějšího dělení vzdálenosti. Na druhou stranu však dostatečně velká, aby při generování dopravní sítě nevzniklo příliš mnoho buněk. To by mělo za následek nárůst nároků na paměť a zároveň by vzrostla doba výpočtu kroku simulace. Proto je nutné najít vhodný kompromis, kdy délka buňky bude dostatečně malá, ale ne za cenu dlouhé doby běhu simulace.

Buňky jsou navzájem propojeny takovým způsobem, že každá buňka je propojena s následující buňkou, ve směru jízdy, a zároveň s předchozí buňkou. V případě víceprroudých cest je nutné propojit navzájem sousední buňky. Propojení sousedních buněk je také použito při připojení zastávek MHD k cestám.

Buňka je charakterizována parametry:

- Proud – proud cesty, do které buňka náleží.
- Poloha – souřadnice buňky v prostoru (zeměpisná šířka a délka).
- Vozidlo – vozidlo, které se nachází na dané buňce.
- Zastávka – parametr určuje, zda se jedná o zastávku MHD nebo o prostou vozovku.
- Křižovatka – odkaz na strukturu křižovatky. Jenom poslední buňky proudů mohou obsahovat odkaz na křižovatku.
- Následující buňka.
- Předchozí buňka.
- Sousední levá buňka.
- Sousední pravá buňka.

6.1.2 Proud dopravní sítě

Hlavní funkcí proudů je sjednocení buněk. Druhou důležitou funkcí je adresace vozidel. Pokud totiž vozidlo přijíždí ke křižovatce a zjišťuje informace o možném průjezdu, adresuje se proudem, na kterém se právě nachází a cílovým proudem.

Proud je charakterizován parametry:

- Půlcesta – půlcesta, do které proud náleží.
- Typ – typ proudu (tramvajový nebo silniční).
- Tvar – seznam souřadnic definující tvar proudu.
- Počáteční buňka – první buňka proudu.
- Konečná buňka – poslední buňka proudu.

6.1.3 Půlcesta dopravní sítě

Půlcesta nemá žádnou komplexní funkčnost a slouží jen ke sjednocení jednotlivých proudů vozovky. Většina cest obsahuje dvě půlcesty, ale pokud je cesta jednosměrná, tak obsahuje jen jednu půlcestu ve směru cesty.

Půlcesta je charakterizována parametry:

- Cesta – cesta, do které půlcesta náleží.
- Silniční proudy – seznam silničních proudů půlcesty.
- Tramvajový proud – proud s tramvajovými koleji.

6.1.4 Cesta dopravní sítě

Cesta sjednocuje půlcesty a dále obsahuje definice okrajů a středu cesty. Definice okrajů jsou použity při vizualizaci dopravní sítě a v době konstrukce dopravní sítě slouží ke zjištění velikosti a hranic křižovatek.

Cesta je charakterizována parametry:

- OSM cesta – odkaz na záznam cesty z OpenStreetMap dat, ze které je cesta vytvořena.
- Přímá půlcesta – půlcesta jdoucí ve směru definice OSM cesty.
- Zpáteční půlcesta – půlcesta jdoucí v protisměru definice cesty z OSM dat. Pokud je cesta jednosměrná, tak zpáteční půlcestu neobsahuje.
- Okraje – soubor souřadnic určující okraje cesty.
- Střed – soubor souřadnic určující střed cesty.

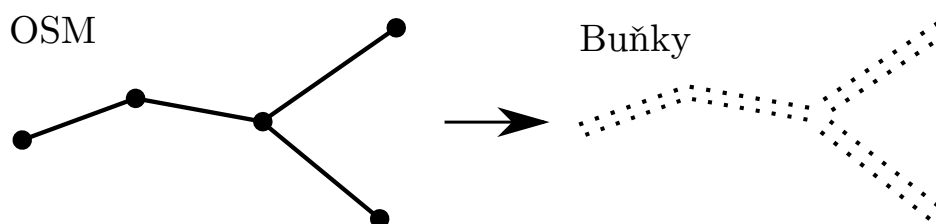
6.2 Konstrukce dopravní sítě

Dopravní síť je generována z OpenStreetMap dat. Základní element OSM dat tvoří *node*, který slouží jako bod v prostoru (zeměpisná šířka a délka) a všechny prvky OSM dat se skládají z těchto *nodů*.

Hlavními prvky jsou cesty, které jsou tvořeny seznamem *nodů*. Při generování dopravní sítě je podle poloh *nodů* cest vytvořen příslušný počet buněk a ty jsou navzájem propojeny. Pro každou buňku je vypočtena její poloha, která je použita při vizualizaci dopravní sítě. Součástí generování sítě je také vytvoření generátorů běžných vozidel na okrajích cest, vytvoření světelného řízení na křižovatkách a v poslední řadě vytvoření pravidel silničního provozu na křižovatkách, což zahrnuje vytvoření záznamů o přednosti v jízdě pro každý možný směr.

V OSM datech je relativně velký počet chyb, které komplikují automatické generování sítě a které je nutné ručně upravit. Chyby se často týkají duplicitních cest, chybějících zastávek nebo celkově špatně definovaných cest, které se na vizuální stránce mapy neprojeví, ale je nutné na ně brát ohled při generování dopravní sítě.

Více o implementaci převodu OSM dat na dopravní síť v kapitole [7.2.4](#).



Obrázek 6.3: Náčrt převodu OpenStreetMap dat na buňky dopravní sítě.

6.3 Zpracování OSM tras linek MHD

Jak už jsme zmínil v OSM datech je hodně chyb a v trasách linek je jich nejvíce. Trasy jsou často zastaralé (někdy i několik let), nejsou kompletní anebo naopak jedna trasa obsahuje všechny různé odbočky a cesty, po kterých linka jede. Někdy dokonce trasy obsahují cesty, po kterých linka vůbec nejede. Větvení tras spolu s jejich chybami velice komplikuje jejich zpracování a následné sloučení s jízdními řády.

Dalším problémem je pořadí cest v trasách, které je víceméně náhodné, resp. jednotlivé cesty nejsou vždy seřazeny v pořadí, v jakém po nich linka jede. Trasy je tedy nutné seřadit, avšak seřadit lze jenom cesty, o kterých má simulace další informace neboli jejich definice a seznamy nodů, ze kterých se skládá. Pokud např. v datech chybí prostřední cesta trasy, není možné celou trasu seřadit a trasa bude nekompletní.

To však není konec všem problémům, protože většina tras neobsahuje zastávky, na kterých linka zastavuje a pokud ano, tak jen některé. V konečném důsledku je zbytečné brát ohled na zastávky, které jsou definovány a je lepší (i nutné) zastávky nalézt. S nálezem zastávek však nastává další problém. Pokud jsou hledány tramvajové zastávky, tak ty jsou definovány přímo na cestách. V tom případě stačí projít všechny nody cest a kontrolovat, zda se na nich zastávka nachází. Naopak autobusové a trolejbusové zastávky jsou v mapě definovány jako osamocené nody na okrajích cest.

Tento problém je vyřešen tak, že před samotným hledáním zastávek jsou všechny zastávky na okrajích cest přiřazeny do samotných cest, jak je tomu u tramvajových zastávek. Zastávky jsou přitom přiřazeny vždy do nejbližší cesty. Někdy se však může stát, že je blíže zastávce cesta nižší třídy, ke které samotná zastávka nenáleží. Avšak tato situace nastává jen zřídka a nejjednodušší řešení je ručně upravit souřadnice zastávek tak, aby byly přiřazeny do požadované cesty.

Výsledkem zpracování jsou upravené OSM trasy, které jsou dále použity při sloučení s jízdními řády, o čemž dále v kapitole 7.2.6. Pro lepší pochopení následuje seznam kroků při zpracování tras:

1. Přiřazení všech autobusových a trolejbusových zastávek do cest.
2. Seřazení všech cest v trasách tak, aby na sebe navazovaly.
3. Postupné projití seřazených cest a nalezení zastávek.
4. Uložení seřazené trasy spolu s nalezenými zastávkami.

6.4 Jízdní řády

Při výběru zdroje jízdních řádů existují dvě možnosti. První možností jsou stránky IDOSu¹. Druhou možností jsou pak nezávislé stránky s jízdními řády linek MHD v Brně². Největší rozdíl mezi nimi je v tom, že IDOS poskytuje jízdní řády i z jiných měst. Na druhou stranu stránky IDOSu trpí některými nedostatky, které jsou zmíněny v kapitole 7.2.8.

Online jízdní řády jsou poskytovány ve formě zastávkových jízdních řádů. Pro simulaci však není tato reprezentace dat vhodná a je třeba vytvořit vhodnější formát. Nově vytvořený formát obsahuje záznam o každé lince s její trasou, časy výjezdů a časy příjezdů do jednotlivých zastávek.

¹Stránky IDOSu jsou dostupné na adrese <http://www.idos.cz/>.

²Nezávislé stránky jízdních řádů linek v Brně jsou dostupné na adrese <http://www.jrbrno.cz/>.

Prvním krokem je odeslání požadavku o jízdní řád linky na server. Po přijetí odpovědi je stránka uložena a zpracována. Stránka obsahuje různé tabulky s informacemi o dané lince, kterými jsou:

- Časy odjezdů ze zvolené zastávky.
- Seznam zastávek linky, spolu s časy příjezdů.
- Tabulka s označením časů linek, které neobsluhují celou trasu linky, ale jen její část.

Tyto tabulky jsou podle označení `id` a `class` HTML elementů nalezeny a jsou z nich extrahovány potřebné informace, které jsou dále zpracovány. Z časů počáteční zastávky je vytvořen seznam časů výjezdu linky. Ze seznamu zastávek je vytvořena trasa linky spolu s časy příjezdů. Výstupem zpracování je XML soubor se záznamy o každé lince, obsahující následující informace (příklad struktury souboru je také v příloze [A](#)):

- Název – označení linky.
- Typ – autobus, trolejbus nebo tramvaj.
- Trasa – seznam zastávek.
- Časy výjezdů z počáteční zastávky.
- Časy příjezdů do následujících zastávek.

6.5 Kalendář výjezdů

Kalendář výjezdů slouží pro generování vozidel MHD. Jedná se o prioritní frontu, seřazenou podle časů výjezdů, se záznamy o budoucích výjezdech linek, které obsahují:

- Čas výjezdu linky.
- Odkaz na záznam popisující linku tj. název linky, trasa linky (seznam zastávek) a časy příjezdů do jednotlivých zastávek.

V každém kroku simulace jsou zkontrolovány první záznamy v kalendáři a pokud jejich čas odpovídá aktuálnímu simulačnímu času, jsou nové linky vloženy do simulace na příslušné počáteční zastávky. Kalendář je nutné průběžně obnovovat, jelikož není možné naplnit kalendář na nekonečně dlouhou dobu. Obnovením se rozumí kontrola časů výjezdu všech záznamů o simulovaných linkách a vytvoření a vložení nových záznamů do kalendáře.

6.6 Reprezentace vozidel

Vozidla jsou modelována jako objekty, které se samostatně pohybují na základě okolní situace a podnětů z dopravní sítě, ve které se nachází. Vozidla se řídí přesně danými pravidly (dopravními předpisy) a není možné, aby je porušily, např. nedáním přednosti v jízdě nebo nedodržením bezpečné vzdálenosti mezi vozidly. Obecně však tato situace může nastat za předpokladu špatného návrhu řídicích modelů. Bližší popis chování a parametrů vozidel následuje v implementační části v kapitole [7.3](#).

6.7 Průběh simulace

Před spuštěním samotné simulace je třeba provést inicializaci všech zdrojů. Inicializace začíná zpracováním souborů s OpenStreetMap daty a jízdními řády. Z OSM dat je vytvořena dopravní síť se všemi cestami, křižovatkami, semaforey a generátory běžných vozidel. Z jízdních řádů jsou vytvořeny záznamy o linkách MHD, podle kterých jsou vozidla generována, což má na starost kalendář výjezdů. Posledním krokem před zahájením simulace je generování linek, které jsou v době započetí simulace již na trase.

Po zpracování dat a vytvoření všech potřebných struktur na řadu přichází samotná simulace. Jádrem simulace je simulační smyčka, která v určitých intervalech provádí kroky simulace. Simulaci je možné pozastavit, zrychlit či zpomalit a na požádání kdykoli ukončit. Jeden krok simulace se skládá s několika dílčími kroky:

1. Aktualizace simulačního času.
2. Aktualizace světelného řízení na křižovatkách.
3. Vyhodnocení aktuální situace vozidel a nastavení nových rychlostí, případně změn pruhů.
4. Odstranění vozidel na okraji dopravní sítě nebo na konečných zastávkách.
5. Kontrola uvíznutí vozidel na křižovatkách bez světelného řízení.
6. Posun vozidel.
7. Kontrola kalendáře výjezdů a s tím spojené generování vozidel městské hromadné dopravy.
8. Generování běžných silničních vozidel.

Kapitola 7

Implementace simulátoru

7.1 Použité nástroje

Jako programovací jazyk byl zvolen objektově orientovaný jazyk C++, jenž je vhodný pro tvorbu simulací, protože jednotlivé objekty modelu reprezentují objekty reálného světa. Dalším důvodem zvolení zmíněného jazyka je jeho rychlost v porovnání s jinými objektově orientovanými jazyky jako Java nebo C#.

Pro tvorbu grafické rozhraní byl zvolen framework Qt¹. Z tohoto frameworku jsou také využity třídy pro zpracování XML souborů a podpora tvorby vícevláknových aplikací. Díky tomu, že je jazyk C++ a framework Qt multiplatformní, tak lze výslednou aplikaci použít na různých platformách např. Windows nebo Linux.

7.2 Struktura simulátoru

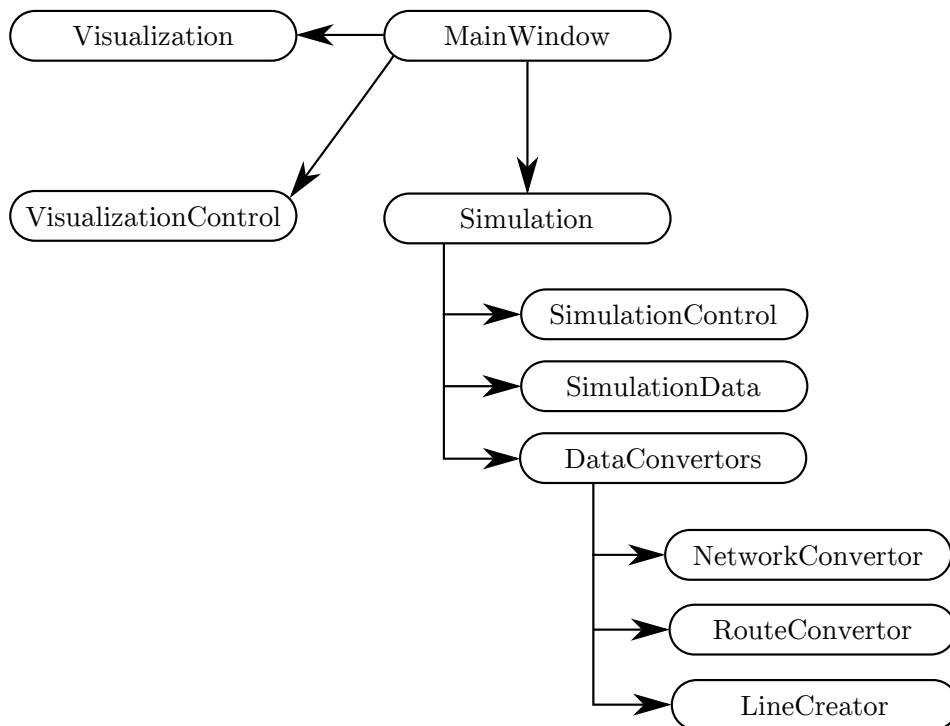
V této části práce jsou popsány hlavní části a třídy simulátoru, spolu s popisem některých důležitých postupů.

7.2.1 Třída Simulation

Třída `Simulation` zastřešuje všechny ostatní třídy tvořící simulační část simulátoru. Hlavní funkcí třídy je sjednocení inicializace zdrojů a dat pro samotnou simulaci, což zahrnuje:

- Parsování souborů s OSM daty a jízdními řády.
- Převod OSM dat na dopravní síť.
- Zpracování OSM tras linek.
- Vytvoření záznamů o linkách sloučením OSM tras a jízdních řádů.
- Inicializace kalendáře výjezdů.
- Generování linek, které jsou v době započetí simulace již na trase.

¹Qt Project, dostupné z: <http://qt-project.org/>.



Obrázek 7.1: Struktura hlavních tříd simulátoru.

7.2.2 Třída `SimulationControl`

Třída `SimulationControl` je hlavní třídou simulátoru. Spravuje průběh simulace a provádí jednotlivé kroky. Jednotlivé kroky simulace jsou prováděny nad třídou `SimulationData`. Aby bylo možné se simulátorem pracovat i za běhu simulace, je výpočet spuštěn ve vlastním vlákne. Běh simulační smyčky ve vlastním vlákne zajišťuje třída `SimulationThread`. Třída `SimulationThread` má také na starost změnu rychlosti běhu simulace a její pozastavení či spuštění.

7.2.3 Třída `SimulationData`

Třída `SimulationData` sjednocuje všechna data, se kterými se při simulaci pracuje. Data simulace jsou:

- Simulační čas (reálný čas a krok simulace).
- Dopravní síť (třída `Area`), která sjednocuje jednotlivé prvky:
 - Seznam buněk (třída `Cell`) – základ dopravní sítě. Třída obsahuje metody pro práci s okolními buňkami jako např. počet buněk do konce proudu nebo získání poslední buňky proudu.
 - Seznam křižovatek (třída `Crossroad`) – slouží k propojení jednotlivých proudů cest. Dále obsahují informace o přednostech v jízdě a s ní spojené metody, včetně řešení situace uvíznutí vozidel na křižovatkách bez světelného řízení.
 - Seznam semaforů (třída `Semaphore`) – světelné řízení křižovatek.
- Seznam běžných vozidel (třída `Car`).

- Seznam autobusů a trolejbusů (třída `Bus`).
- Seznam tramvají (třída `Tram`).
- Seznam generátorů běžných vozidel (třída `CarGenerator`).
- Seznam záznamů o linkách MHD (třída `PublicTransportLine`).
- Kalendář výjezdů linek MHD (třída `DepartureCalendar`).

7.2.4 Třída `NetworkConvertor`

Třída `NetworkConvertor` provádí převod OpenStreetMap dat na dopravní síť. Z důvodu zmíněných chyb v OSM datech a dalších komplikací, hlavně v propojení sousedním buněk jednotlivých proudů, se při generování sítě neuvažuje více silničních proudů komunikací a vždy je vytvořen jen jeden proud. Přesto jsou některé struktury programu již připraveny na implementaci víceproudých cest. Odstranění tohoto nedostatku by bylo vhodné jako první rozšíření simulátoru.

Proces převodu OSM dat na buňky, křižovatky a generátory vozidel dopravní sítě:

1. První fází převodu je rozdělení cest. Pokud se na cestě vyskytuje světelná křižovatka, zastávka MHD anebo se kříží s jinou cestou, je cesta rozdělena na dvě, případně více cest. Účelem je rozdělit všechny cesty tak, aby se křižovatky či zastávky nacházely jen na jejich krajních bodech.
2. Vytvoření záznamů o proudech cest. V této fázi se vytváří definice proudů cest s ohledem na to, zda jsou na cestě tramvajové koleje nebo je cesta jednosměrná.
3. Krajní souřadnice proudů jsou zarovnané tak, aby na sebe jednotlivé proudy plynule navazovaly.
4. Pokud se v jednom bodě stýkají tři a více cest, je vytvořena křižovatka spolu se semaforem. Tvorba křižovatky zahrnuje vytvoření propojovacích cest pro jednotlivé proudy napojené na příslušnou křižovatku.
5. Vytvoření buněk proudů a cest na křižovatkách. Podle definic tvaru proudů (seznam souřadnic) je vytvořen určitý počet buněk s příslušnými souřadnicemi, které jsou navzájem propojeny.
6. Vytvoření resp. nastavení atributů buněk na zastávky. Tramvajové zastávky jsou přiřazeny přímo do buněk proudů. Autobusové a trolejbusové zastávky jsou vytvořeny na krajích cest, ke kterým jsou připojeny přes odkazy na sousední buňky.
7. Vytvoření generátorů běžných vozidel na koncích cest.
8. Vytvoření pravidel silničního provozu na křižovatkách podle pravidla přednosti z pravé strany.

7.2.5 Třída `RouteConvertor`

Třída sloužící pro zpracování OSM tras linek MHD. Třída implementuje postup zpracování tras popsany v kapitole [6.3](#).

7.2.6 Třída LineCreator

Funkcí této třídy je sloučení zpracovaných OSM tras a jízdních řádů. Proces sloučení jízdních řádů a tras linek je v podstatě přiřazení tras jízdním řádům. Avšak při porovnávání tras a seznamu zastávek nastávají problémy. Jak už jsem zmínil, trasy jsou často zastaralé anebo obsahují jiné chyby, jako např. chybějící zastávky. Při testování aplikace nikdy nastala situace, kdy by se jakákoli OSM trasa bez ruční úpravy úplně shodovala se seznamem zastávek v jízdních řádech. Ruční úprava je však náročný proces a proto se při spojení hledají alespoň části tras, které souhlasí na místo přiřazení celých tras.

Tento postup má za výsledek sloučení alespoň částí tras v případě neshody celé trasy s jízdním řádem. Pokud požadujeme kompletní sjednocení, je ve většině případů nutné data ručně upravit. Výstupem spojení jsou záznamy o linkách, které slouží pro plnění kalendáře výjezdů popsaného v kapitole 6.5.

7.2.7 Třída Visualization

Třída určená pro vizualizaci simulace. Třída zobrazuje dopravní síť a jednotlivá vozidla podle obsahu `SimulationData`. Třída se také stará o zobrazení snímků mapy získané z `OpenStreetMap`, které dynamicky stahuje za běhu aplikace, anebo načítá z disku, pokud už byly snímky v minulosti staženy. Načtení snímků zajišťuje třída `MapTileDownloader`.

7.2.8 Třída ScheduleDownloader

Třída `ScheduleDownloader` slouží pro stahování a zpracování online jízdních řádů. Jak bylo řečeno v kapitole 6.4, jízdní řády lze získat ze stránek `IDOSu` nebo `jrbrno`.

Stahování stránek je provedeno přes Qt komponentu `QWebPage`, která do sebe načte stránku zadanou jejím URL. Zde však vznikají komplikace se stránkami `IDOSu`. Stránky totiž používají určitý JavaScript kód, který třída `QWebPage` nedokáže zpracovat, stránky nejsou správně staženy a tím pádem z nich nelze vyextrahovat potřebné informace. Naopak stránky `jrbrno` JavaScript vůbec nepoužívají a tak není problém s jejich stažením neboli načtením komponentou `QWebPage`.

Ve výsledku to tedy znamená, že při použití `QWebPage` nelze stránky `IDOSu` plně použít a je nutné použít stránky `jrbrno`, které však obsahují jen Brněnské jízdní řády.

7.3 Reprezentace a chování vozidel

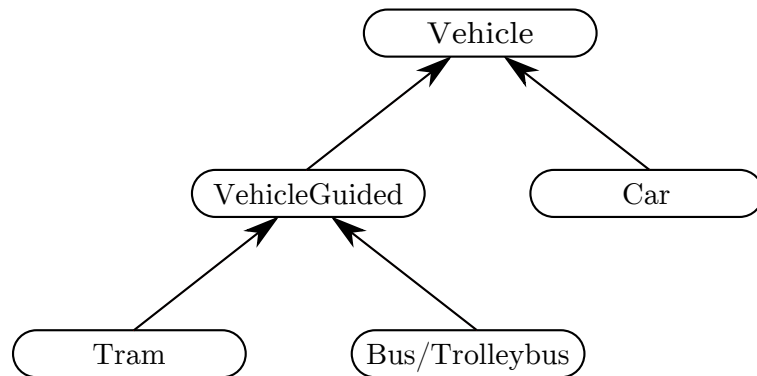
Simulace rozlišuje dva základní typy vozidel, kterými jsou `Vehicle` a `VehicleGuided`. Od těchto dvou základních typů jsou dále odvozeny konečné typy vozidel, kterými jsou běžná vozidla, autobusy, trolejbusy a tramvaje.

Zde je vhodné zmínit, že zadáním práce bylo vytvořit simulátor linek MHD bez simulace běžných vozidel. Ve výsledku měl být tento simulátor spojen s jiným projektem, který se právě zabývá simulací běžných vozidel. Nicméně při tvorbě aplikace byl jeden z prvních kroků vytvoření základního modelu řízení vozidel na křižovatkách bez sledování určité trasy a zastavování na zastávkách. Tudíž tvorba běžných vozidel byl nutný krok k implementaci řízených vozidel linek MHD. Běžná vozidla jsou v simulátoru ponechána, což má za následek větší samostatnost celého simulátoru.

Z obrázku 7.2 je možné si všimnout, že autobusy a trolejbusy jsou modelovány jako jeden typ. Důvodem je zjednodušení celého modelu simulace a druhým jsou chyby OSM datech, kde často chybí definice trolejových vedení a bylo by nutné data ručně upravit. I přesto, že

simulace nebere ohled na trolejová vedení, trolejbusy budou sledovat trasu s tímto vedením za předpokladu, že samotné OSM trasy trolejbusů jsou správně definovány. Následuje popis základních typů vozidel:

- Běžné vozidlo (třída `Vehicle`) – jsou to všechna vozidla mimo vozidel MHD. Jejich hlavní charakteristika je výběr cesty odbočení na křižovatkách, které je náhodné.
- Řízené vozidlo (třída `VehicleGuided`) – jsou to vozidla MHD jako autobusy, trolejbusy a tramvaje. Jejich chování, oproti běžným vozidlům, je rozšířené o sledování přesně definované trasy a zastavování na zastávkách spolu s čekáním na nástup a výstup cestujících, případně čekání na dobu odjezdu ze zastávky.



Obrázek 7.2: Strukturace typů vozidel.

7.3.1 Parametry vozidel

Základní parametry vozidla:

- Identifikační číslo.
- Délka vozidla.
- Maximální možná rychlost.
- Dočasná maximální rychlost – maximální možná rychlost při průjezdu následující zatáčkou. Na rovném úseku je tato rychlost shodná s maximální možnou rychlostí.
- Aktuální rychlost.
- Nově vypočtená rychlost – rychlost vozidla pro následující krok.
- Maximální možné zrychlení.
- Maximální možné zpomalení.
- Směr jízdy na blízkých křižovatkách – podle směru jízdy ostatní vozidla vyhodnocují, zda mají volný průjezd křižovatkou nebo se jejich trasy kříží a musí dát přednost.

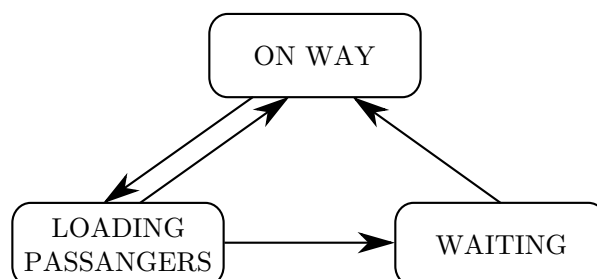
Rozšiřující parametry řízeného vozidla neboli linek městské hromadné dopravy:

- Název linky MHD.
- Čas výjezdu – podle času výjezdu a aktuálního simulačního času je vypočten čas příjezdu do zastávky a z toho čas čekání na odjezd ze zastávky podle jízdního řádu.
- Trasa – soubor cest, které musí vozidlo sledovat.
- Seznam zastávek – seznam zastávek, na kterých vozidlo zastavuje.
- Časy příjezdů do zastávek – časy příjezdů do jednotlivých zastávek trasy.

7.3.2 Vnitřní stav vozidel MHD

Rozhodovací proces vozidel městské hromadné dopravy je zastřešen konečným automatem, který určuje v jakém stavu se vozidlo nachází, ve smyslu zastavení na zastávce nebo pokračování na cestě trasy. Běžná vozidla tyto stavy neobsahují a v každém kroku simulace přistupují přímo k rozhodovacímu procesu. Vnitřní stav vozidla MHD se přenáší přes více kroků simulace a celkově existují tři stavy:

- ON WAY – vozidlo se nachází na cestě. V tomto stavu proběhne hlavní rozhodování na cestách popsané dále v kapitole 7.3.3. Po hlavním rozhodnutí proběhne kontrola, zda je celé vozidlo na zastávce, zda má na této zastávce zastavit a zda má nulovou rychlost. Pokud vozidlo splňuje všechny podmínky, přechází do stavu LOADING PASSANGERS, jinak svůj stav nemění.
- LOADING PASSANGERS – v tomto stavu vozidlo nakládá a vykládá cestující. Pokud vozidlo dokončilo nakládání cestujících, zkontroluje aktuální čas a čas podle jízdního řádu, kdy má být na zastávce. Pokud je vozidlo na zastávce ve stejnou dobu jak určuje jízdní řád nebo je pozadu, přechází do stavu ON WAY. Pokud se na zastávce nachází s velkým předstihem přechází do stavu, WAITING a zároveň nastaví pomalý mód, který sníží maximální rychlost vozidla (ve výchozím stavu je vozidlo v pomalém módu). Naopak pokud vozidlo zaostává, nastaví rychlý mód, kdy může dosáhnou maximální možné rychlosti a snaží se dohnat časovou ztrátu.
- WAITING – v tomto stavu vozidlo čeká na uplynutí doby, kdy má podle jízdních řádů vyjet ze zastávky. Po uplynutí příslušné doby přechází do stavu ON WAY.



Obrázek 7.3: Schéma vnitřních stavů městské hromadné dopravy.

7.3.3 Rozhodovací proces

Simulace obsahuje tři druhy rozhodovacího procesu pro každý typ vozidla. Pro běžná vozidla existuje základní rozhodovací proces, který zároveň slouží jako základ pro rozhodovací procesy autobusů, trolejbusů a tramvají, které jej dále rozšiřují.

Rozhodovací proces pro tramvaje je rozšířen o jeden stav, starající se o zastavení na zastávce. Druhé rozšíření je určeno pro autobusy a trolejbusy, které musí stejně jako tramvaje řešit zastavení na zastávce, ale navíc je nutné řešit změnu pruhu, protože se jejich zastávky nachází mimo samotnou cestu, na rozdíl od tramvajových zastávek, které jsou umístěny přímo na vozovce.

Celý rozhodovací proces je rozdělen na dvě fáze:

1. Analýza a zpracování dopravní situace před vozidlem. V této fázi vozidlo analyzuje okolní dopravní situaci a na jejím základě rozhoduje o změně rychlosti vozidla, případně změně pruhu. Analýza a vyhodnocení dopravní situace je provedeno pomocí konečného automatu, jehož fungování je popsáno v následujících sekcích. Výstupem této fáze je jedna ze tří možných hodnot:
 - HOLD – vozidlo setrvá v klidném stavu s nulovou rychlostí.
 - STOP AT – vozidlo zastaví přesně na vzdálenosti, která mu je předána.
 - CAR FOLLOW – vozidlo následuje jiné vozidlo a při zastavení je nutné brát v úvahu bezpečný odstup mezi vozidly.
2. Výpočet nové rychlosti na základě výstupu druhé fáze. Na řadu přistupují řídicí modely, které vyhodnotí aktuální rychlost vozidla, volnou vzdálenost a rychlost následujícího vozidla a podle těchto parametrů upravují rychlost aktuálního vozidla.

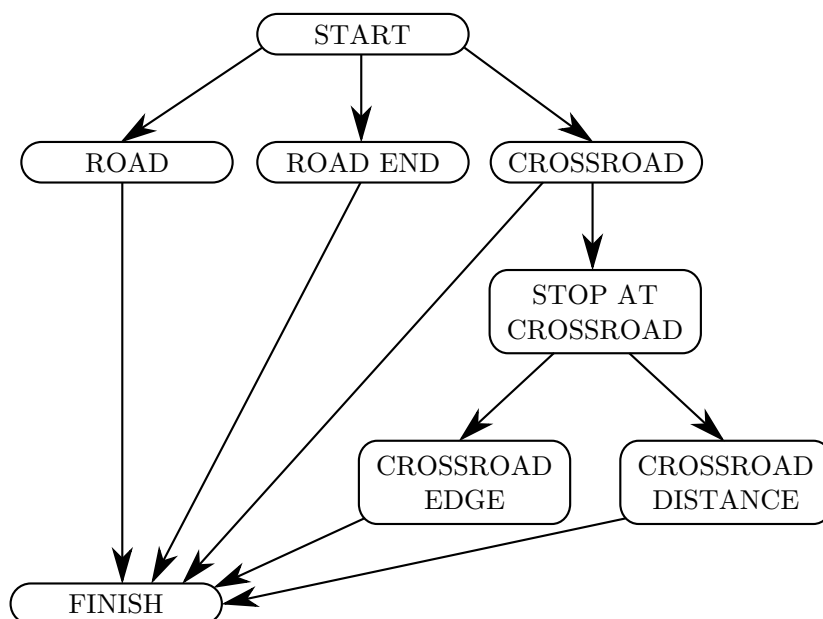
7.4 Implementace základu procesu rozhodování

Prvním krokem procesu rozhodování je získání informací o dopravní situaci před vozidlem. Dopravní situace je zmapovaná a uložena do seznamu, který obsahuje typ dopravního objektu a jeho vzdálenost od aktuálního vozidla. Typ objektu může být vozidlo, křižovatka, zastávka, anebo vozidlo na zastávce, kterému je nutné dát přednost. Na základě tohoto seznamu se vozidlo dále rozhoduje. Při plnění seznamu je prohledávána jen určitá vzdálenost před vozidlem, která je udána v metrech, závisí na aktuální rychlosti vozidla a je dána vztahem:

$$distance = 10 + speed^2 \quad (7.1)$$

7.4.1 Počátek rozhodovacího procesu

Po zmapování dopravní situace před vozidlem přistupuje na řadu samotné rozhodování, které vždy začíná stavem START. V tomto stavu na základě nejbližšího objektu vozidlo rozhodne, jaký bude následující postup. Pokud se blíží ke křižovatce a je nutné ji detailněji sledovat, pak přechází do stavu CROSSROAD. Když se vozidlo blíží ke konci cesty, přechází do stavu ROAD END. Poslední možností je, že se před vozidlem nenachází žádný jiný objekt než vozidla a v tom případě přestupuje do stavu ROAD.



Obrázek 7.4: Schéma konečného automatu základního rozhodovacího procesu.

7.4.2 Rozhodování na úseku s křižovatkami

Tato situace se dále může ubírat dvěma směry. Vozidlo zkontroluje, zda má volný průjezd křižovatkou a pokud ano, přechází se do stavu FINISH s výstupním parametrem sledování následujícího vozidla CAR FOLLOW.

Při kontrole možného průjezdu je nutné brát v úvahu světelné řízení křižovatky a pokud se na křižovatce nenačází, je vozidlo řízeno pravidlem přednosti zprava. V úvahu je také nutné brát volný prostor za křižovatkou. Pokud by cesta za křižovatkou byla zaplněna kolonou, nemohlo by vozidlo projet celou křižovatkou a tím by ji zablokovalo. Při kontrole možného průjezdu křižovatkou jsou mimo cest napojených na křižovatkou kontrolovány samotné cesty na křižovatce, zda neobsahují vozidla, kterým je nutné dát přednost v jízdě a křižovatkou ještě neprojela.

Druhá situace nastává v případě, že vozidlo nemá umožněn volný průjezd, jak už z důvodu světelného řízení křižovatky anebo nedostatku volného prostoru na cestě za křižovatkou. V tomto případě se přechází do stavu STOP AT CROSSROAD, kde rozhodování dále pokračuje. Následuje popis stavů pro další rozhodování na úseku s křižovatkou při nutnosti zastavení:

- STOP AT CROSSROAD – v tomto stavu je provedena kontrola, zda se vozidlo ke křižovatce blíží a přechází do stavu CROSSROAD DISTANCE nebo pokud vozidlo vyčkává na okraji křižovatky s nulovou rychlostí a přechází do stavu CROSSROAD EDGE.
- CROSSROAD DISTANCE – v tomto stavu se vozidlo blíží ke křižovatce a musí zastavit na jejím okraji. Je zkontrolována vzdálenost do křižovatky a vzdálenost do prvního následujícího vozidla. Podle kratší vzdálenosti je rozhodnuto, zda vozidlo zastaví na křižovatce (výstup STOP AT), anebo bude sledovat vozidlo před ním (výstup CAR FOLLOW). Po zpracování vzdáleností vozidlo přechází do stavu FINISH s příslušným výstupem.

- CROSSROAD EDGE – v tomto stavu vozidlo vyčkává na okraji křižovatky do doby než je mu umožněn průjezd. Pokud vozidlu není průjezd umožněn, nastaví výstup na HOLD a přechází do stavu FINISH. Na druhou stranu, pokud se dopravní situace změnila tak, že je vozidlu průjezd umožněn, nastaví výstup na CAR FOLLOW a stejně tak přechází do stavu FINISH.

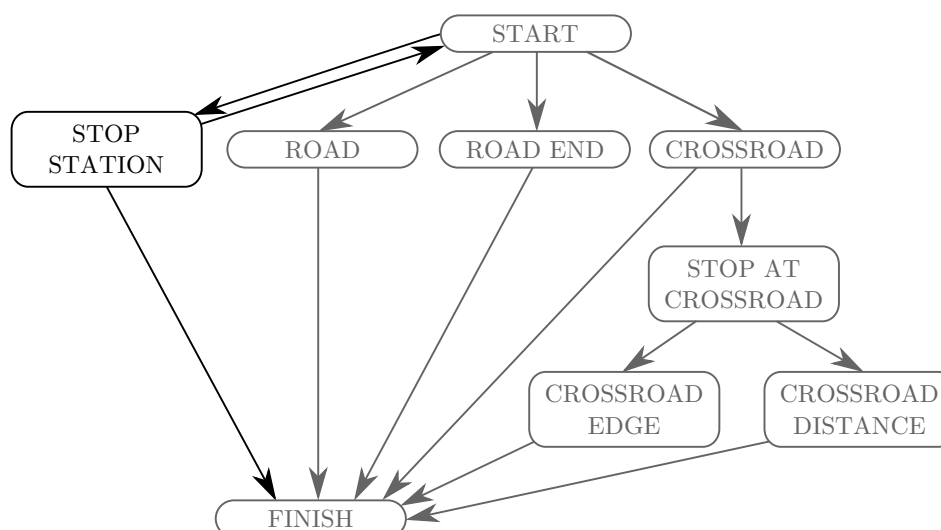
7.4.3 Rozhodování na úseku bez křižovatek

Úsek bez křižovatek je definován dvěma stavy. Prvním stavem je stav ROAD v němž vozidlo jen nastaví výstup na CAR FOLLOW a přestoupí do stavu FINISH. Druhým možným stavem je ROAD END, kdy se vozidlo blíží k okraji dopravní sítě a brzy bude odstraněno. V tom případě vozidlo nastaví výstup na STOP AT, který zajistí zastavení vozidla těsně před koncem vozovky. Pokud se vozidlo již na okraji vozovky nachází, nastaví příznak odstranění, který zajistí jeho odstranění ze simulace.

7.5 Rozšířený proces rozhodování tramvají

Rozhodovací proces tramvají vychází ze základního rozhodovacího procesu a je rozšířen o jeden stav, kterým je STOP STATION. Do tohoto stavu může tramvaj vstoupit ze START stavu, pokud se blíží k zastávce.

- STOP STATION – v tomto stavu tramvaj nejdříve zkontroluje, zda zastávka patří do její trasy a má zastavit. V případě že zastávka patří do trasy linky, snaží se tramvaj zastavit na konci zastávky (výstup STOP AT), aby vytvořila co nejvíce prostoru pro ostatní tramvaje. Pokud se na zastávce nachází další vozidla snaží se tramvaj zastavit tak, aby byla dodržena bezpečná vzdálenost mezi vozidly (výstup CAR FOLLOW). Po nastavení výstupu přechází do stavu FINISH. V opačném případě, kdy tramvaj na zastávce nechce zastavit, odstraní zastávku ze seznamu objektů a přechází do počátečního stavu START, kde se celý rozhodovací proces opakuje.

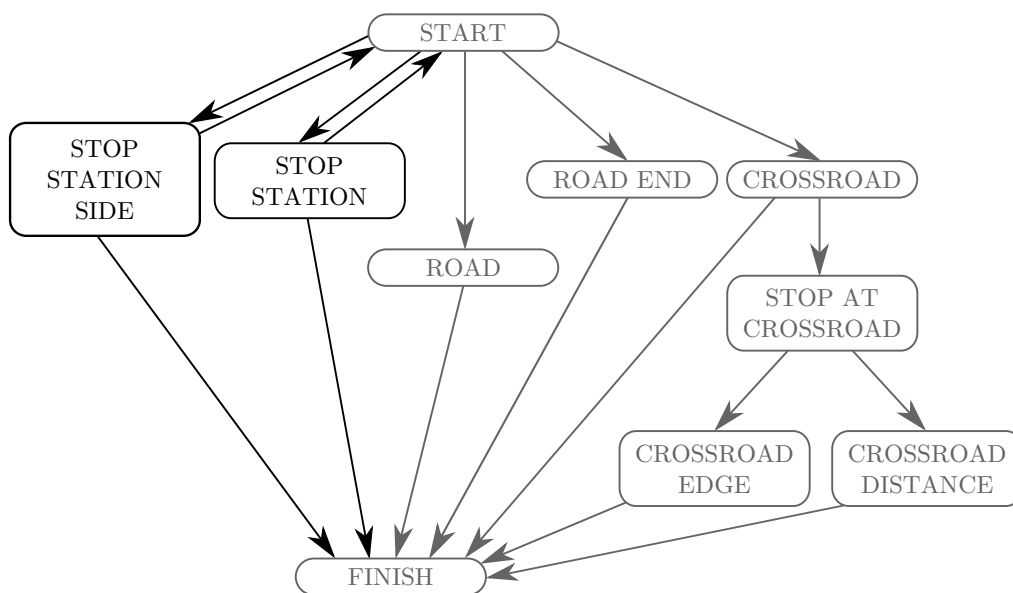


Obrázek 7.5: Schéma konečného automatu rozhodovacího procesu tramvají se zvýrazněnými novými stavy oproti základnímu rozhodovacímu procesu.

7.6 Rozšířený proces rozhodování autobusů a trolejbusů

Jak už bylo zmíněno v kapitole 7.3 autobusy a trolejbusy jsou modelovány jako jeden typ vozidla a proto i sdílejí stejný proces rozhodování. Rozhodovací proces autobusů a trolejbusů, stejně jako tramvají, vychází ze základního procesu a je rozšířen o dva stavy, kterými jsou STOP STATION SIDE a STOP STATION. Do obou stavů je možné vstoupit z počátečního stavu START. Popis rozšiřujících stavů:

- STOP STATION SIDE – stav indikuje, že se vozidlo blíží k zastávce, avšak na rozdíl od tramvajových zastávek se autobusová zastávka nenachází přímo na vozovce, ale na jejím okraji. Proces je podobný jako u tramvají. Vozidlo zkontroluje, zda má na zastávce zastavit a pokud ano, snaží se na zastávku odbočit. V tomto případě přichází na řadu lane-changing model, který zkontroluje, zda je na zastávce dostatek místa. Pokud na zastávce není dostatek místa, vozidlo musí brát v úvahu ostatní vozidla, které se na zastávce nachází a zastavit tak, aby neblokoval jejich výjezd. To zajistí výstup CAR FOLLOW. Po nastavení výstupních proměnných, přechází do stavu FINISH. Pokud vozidlo na zastávce nemá zastavit, odstraní zastávku ze seznamu objektů a přechází do počátečního stavu START, kde se celý rozhodovací proces opakuje.
- STOP STATION – v tomto stavu se vozidlo již nachází na zastávce s cílem zastavit, anebo zastávku opustit. V případě zastavení se vozidlo snaží zastavit co nejdále na zastávce, aby vytvořilo co nejvíce prostoru pro ostatní vozidla snažící se vstoupit na zastávku. V případě výjezdu ze zastávky, vozidlo vyčkává do doby, než je mu výjezd umožněn. Při umožnění výjezdu nastaví příznak změny pruhu, který zajistí samotnou změnu pruhu při posunutí vozidel. Jako obvykle nakonec přechází do stavu FINISH.



Obrázek 7.6: Schéma konečného automatu rozhodovacího procesu autobusů a trolejbusů se zvýrazněnými novými stavy oproti základnímu rozhodovacímu procesu.

7.7 Úprava rychlosti

Po získání rozhodnutí vozidla z první fáze rozhodovacího procesu, přistupuje na řadu další fáze, kterou je samotná úprava rychlosti na základě volné vzdálenosti mezi aktuálním vozidlem a následujícím objektem a rychlostí tohoto objektu.

Úprava rychlosti je založena na vzdálenosti na kterou je vozidlo schopno zastavit při maximálním možném zpomalení a která je označena jako *stopDistance*. Nejdříve je tato vzdálenost vypočtena a z ní je vypočten základní práh, který je určen vztahem:

$$stopThreshold = stopDistance_v - \frac{stopDistance_{v+1}}{2} \quad (7.2)$$

Kde *stopDistance_v* určuje brzdící vzdálenost aktuálního vozidla a *stopDistance_{v+1}* brzdící vzdálenost sledovaného vozidla. Pokud se před vozidlem žádné jiné vozidlo nenachází, *stopDistance_{v+1}* nabývá hodnoty nula. Ze základního prahu *stopThreshold* jsou vypočteny další prahy, které jsou definovány vztahy:

$$slowDownThreshold = stopThreshold * 2 \quad (7.3)$$

$$maintainSpeedThreshold = stopThreshold * 3 \quad (7.4)$$

$$maxAccelerationThreshold = stopThreshold * 4 \quad (7.5)$$

Po výpočtu všech prahů, přichází na řadu výpočet změny zrychlení vozidla. Při rozhodování je postupně porovnávána volná vzdálenost před vozidlem s vypočtenými prahy. Postup výpočtu prochází několika kroky a je ukončen na první pozitivní podmínce:

1. Pokud je volná vzdálenost menší jak práh *stopThreshold*, vozidlo bude brzdit maximálním brzdícím potenciálem.
2. Pokud je volná vzdálenost menší jak práh *slowDownThreshold*, vozidlo bude brzdit s lineární závislostí, na základě hodnoty *stopThreshold* prahu.
3. Pokud je volná vzdálenost menší jak práh *maintainSpeedThreshold*, vozidlo svoji rychlost nebude měnit.
4. Pokud je volná vzdálenost menší jak práh *maxAccelerationThreshold*, vozidlo bude zrychlovat s lineární závislostí na základě hodnoty *maintainSpeedThreshold* prahu.
5. Pokud je volná vzdálenost větší jak všechny vypočtené prahy, bude vozidlo zrychlovat maximálním možným zrychlením.

Kapitola 8

Ověření simulátoru

Po vytvoření simulátoru je třeba ověřit jeho validitu, avšak zde vznikají komplikace. Jediná statistika, která by statisticky ověřila validitu tohoto simulátoru, jsou časy příjezdů do zastávek podle jízdních řádů. Na časy příjezdů má však vliv několik faktorů.

Prvním faktorem je hustota dopravní sítě, která má velký vliv na autobusy a trolejbusy. Druhá velice důležitá věc je světelné řízení. Světelné řízení má totiž největší vliv na celý tok dopravní sítě a tím pádem i na časy příjezdů linek. V reálné situaci jsou dokonce tramvaje na křižovatkách dynamicky upřednostňovány, aby nebyly opožděny. V simulátoru je však implementace semaforů velice základní. Dalším problémem je nepřesnost resp. absence sekund v časech dopravních řádů. Sekundy jízdních řádů jsou pseudonáhodně generovány a může nastat situace, kdy vozidlo bude mít mnohem méně času na příjezd do další zastávky než podle reálné situace. Statistiky příjezdů by tedy byly velice závislé na vygenerovaných sekundách.

Další obecné statistiky by se mohly týkat hustoty dopravní sítě nebo délek front na křižovatkách. Avšak i přesto, že simulace obsahuje běžná vozidla, úkolem bylo vytvořit simulaci jen linek MHD a v tom případě statistika hustoty dopravní sítě a další podobné statistiky ztrácí smysl.

Pro detailnější ověření simulátoru by tedy bylo nutné mít detailní informace o zaplnění dopravní sítě, reálné informace o přepínání semaforů a v poslední řadě přesnější jízdní řády, než které jsou poskytovány veřejnosti. I přesto by však bylo obtížné simulátor validovat.

Tato práce navíc byla myšlena jako část většího simulátoru, který je rozdělen na menší části, kterými jsou simulace linek MHD, simulace běžných vozidel a inteligentní řízení světelného řízení na křižovatkách. Validitu simulátoru by bylo možné ověřit až při sloučení s ostatními projekty. Tento simulátor sice implementuje pohyb běžných vozidel a řízení semaforů, ale jen na základní úrovni a pro porovnání s realitou by bylo třeba implementovat důmyslnější řízení.

Jistou kontrolou simulátoru je samotné spuštění programu a pozorování jednotlivých linek a časů čekání. Takto byl výsledný simulátor testován a z pozorování pohybu vozidel bylo zjištěno, že linky nedojíždějí na jednotlivé zastávky ve zpoždění nebo ve výrazném předstihu. Z toho se dá usoudit, že simulátor dokáže se základní přesností simulovat pohyb linek MHD.

Kapitola 9

Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout a implementovat simulátor městské hromadné dopravy v Brně, který bude simulovat pohyb linek městské hromadné dopravy. Přičemž časy odjezdů jednotlivých linek budou extrahovány z elektronických jízdních řádů. Informace o dopravní síti budou získána z projektu OpenStreetMap a z těchto informací bude konstruována celá dopravní síť.

Pro dosažení tohoto cíle bylo nejdříve nastudovat infrastrukturu městské hromadné dopravy v Brně a hlavně reprezentaci jízdních řádů. Dále bylo nutné analyzovat OpenStreetMap data pro tvorbu dopravní sítě. Pro tvorbu simulačního jádra bylo nutno nastudovat stávající přístupy ke tvorbě dopravních simulátorů, které jsou popsány v teoretické části práce a jimiž jsou mikroskopická, makroskopická a mesoskopická simulace.

Navržený simulátor je založen na mikroskopické simulaci, která je vhodná pro modelování jednotlivých vozidel. Následovala tedy analýza mikroskopických simulátorů a řídicích modelů, které jsou jejich nedílnou součástí a které mají za úkol zpracovat dopravní situaci vozidel a rozhodnout o následujícím kroku. Simulátor je vícevláknový, takže je možné využít vícejádrové procesory. Proces generování dopravní sítě je automatizován, avšak OSM data obsahují chyby, které znemožňují plnou automatizaci a je nutné data dodatečně opravit. Simulátor lze použít i na jiná města než jen Brno, avšak podmínkou je, že OSM data musí obsahovat definice tras linek a dále jsou potřeba samotné jízdní řády pro dané město. Mimo linek MHD simulace obsahuje i běžná vozidla.

Simulátor lze rozšířit mnoha způsoby, např. generováním jednotlivých pasažérů na zastávkách a získávání statistik o zaplnění vozidel. Nejvíce prostoru pro rozšíření je však v generování dopravní sítě, ve které se nepočítá s více proudy, což je momentálně největší nedostatek a bylo by vhodné ho odstranit jako první. Dalším možným rozšířením by mohla být automatická oprava chyb v datech a tím více zautomatizovat generování dopravní sítě. Vylepšení by se také mohla týkat lepšího přepínání semaforů na křižovatkách případně implementovat dynamické upřednostňování tramvají. V poslední řadě se při generování dopravní sítě nebere ohled na dopravní značení, protože ho ani OSM data neobsahují a pokud by se dopravní značení implementovalo, bylo by nutné data získat odjinud.

Literatura

- [1] AHMED, K. I.: *Modeling Drivers' Acceleration and Lane Changing Behavior*. Dizertační práce, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 1999.
- [2] APPELEGATE, C.; LAYCOCK, S.; DAY, A.: *Real-Time Traffic Simulation Using Cellular Automata*. School of Computing Sciences, University of East Anglia, Norwich, United Kingdom, 2010.
- [3] BARCELÓ, J.; CASAS, J.; GARCÍA, D.; aj.: *Methodological notes on combining macro, meso and micro models for transportation analysis*. Universitat Politècnica de Catalunya, 2005.
- [4] BLATNIG, S.: *Microscopic Traffic Simulation with Intelligent Agents*. Alpen-Adria-Universität Klagenfurt Fakultät für Technische Wissenschaften, září 2008, s. 9-10.
- [5] BURGHOUT, W.; KOUTSOPOULOS, H.; ANDRÉASSON, I.: *Hybrid Mesoscopic-Microscopic Traffic Simulation*. Transportation Research Record, květen 2005.
- [6] COAST, S.: OpenStreetMap. URL <http://www.openstreetmap.org>.
- [7] Dopravní podnik města Brna: Výroční zpráva 2012. URL <http://www.dpmb.cz/Default.aspx?seo=download&id=1632>, 2012.
- [8] Dopravní podnik města Brna: Řídící informační systém brněnské MDH [online]. URL <http://www.dpmb.cz/Default.aspx?seo=ris-cz>, [2013-12-18].
- [9] Dopravní podnik města Brna: Historie dopravního podniku města Brna [online]. URL <http://www.dpmb.cz/Default.aspx?seo=historie-firmy>, [cit. 2013-12-16].
- [10] ELTODO: Teorie modelování dopravy [online]. URL <http://sim.eltodo.cz/teorie.html>, [cit. 2013-12-05].
- [11] HARDY, M.; WUNDERLICH, K.: *Evacuation management operations (EMO) modeling assessment*. Research and Innovative Technology Administration, ITS Joint Program Office, říjen 2007.
- [12] JIMÉNEZ, T.; MUSSI, P.; SIEGEL, G.: A road traffic simulator : car-following and lane-changing. In *European Simulation Multiconference 2000*, Gent, Belgium, květen 2000, s. 241-245.

- [13] LIU, K.: Traffic Simulation java applet [online].
URL www.phy.ntnu.edu.tw/oldjava/0thers/trafficSimulation/applet.html,
[prosinec 2013].
- [14] NAGEL, K.; SCHRECKENBERG, M.: A cellular automaton model for freeway.
Journal de Physique, 1992: s. 2221–2229.
- [15] PERINGER, P.: *Modelování a simulace IMS: Studijní opora*. Fakulta informačních
technologií VUT v Brně, 2012.
- [16] TTS: Aimsun - traffic modelling software [online]. URL www.aimsun.com, [prosinec
2013].
- [17] Zolex: iRIS - Poloha vozidel MHD v Brně [online]. URL <http://irisbrno.cz/>,
[2013-12-18].

Příloha A

Příklad struktury zpracovaných jízdních řádů ve formátu XML

Příklad zpracovaného jízdního řádu tramvajové linky 1. Struktura se skládá z časů odjezdů (časy jsou udány v minutách), z počáteční zastávky a ze seznamu zastávek (trasa) linky spolu s časy příjezdů do jednotlivých zastávek.

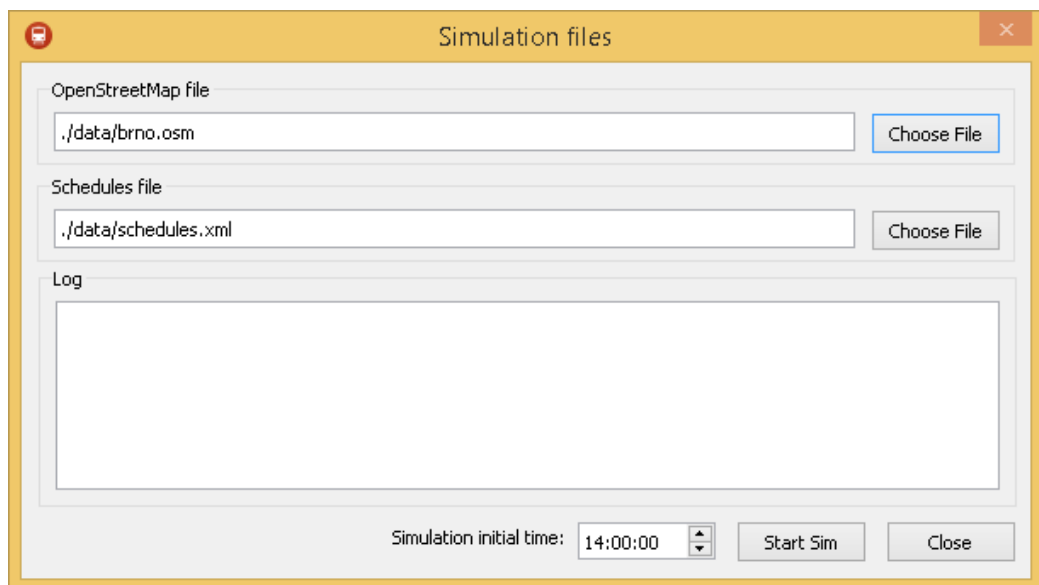
```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<schedules>
  <line name="1" type="tram">
    <times>
      <m>291</m><m>301</m><m>311</m><m>318</m><m>324</m>
      <m>331</m><m>338</m><m>344</m><m>351</m><m>358</m>
      <m>364</m><m>371</m><m>377</m><m>382</m><m>387</m>
      <m>392</m><m>397</m><m>402</m><m>407</m><m>412</m>
      <m>418</m><m>422</m><m>428</m><m>432</m><m>438</m>
      ...
    </times>
    <route>
      <stop name="ŘEČKOVICE" t_rel="0" t_abs="0"/>
      <stop name="Filkukova" t_rel="1" t_abs="1"/>
      <stop name="Kořískova" t_rel="1" t_abs="2"/>
      <stop name="Hudcova" t_rel="1" t_abs="3"/>
      <stop name="Tylova" t_rel="1" t_abs="4"/>
      <stop name="Semilasso" t_rel="2" t_abs="6"/>
      <stop name="Husitská" t_rel="2" t_abs="8"/>
      <stop name="Jungmannova" t_rel="1" t_abs="9"/>
      <stop name="Kartouzská" t_rel="1" t_abs="10"/>
      <stop name="Šumavská" t_rel="1" t_abs="11"/>
      <stop name="Hrnčířská" t_rel="1" t_abs="12"/>
      <stop name="Pionýrská" t_rel="1" t_abs="13"/>
      <stop name="Antonínská" t_rel="2" t_abs="15"/>
      ...
    </route>
  </line>
</schedules>
```

Příloha B

Manuál

B.1 Úvodní dialog s výběrem souborů

Při spuštění aplikace je zobrazeno okno s výběrem vstupních souborů, kterými je soubor s OpenStreetMap daty a soubor se zpracovanými jízdními řády. Před spuštěním simulace je také nutné vybrat počáteční čas simulace. Stiskem tlačítka *Start Sim* se zahájí automatické zpracování vstupních souborů a generování dopravní sítě.

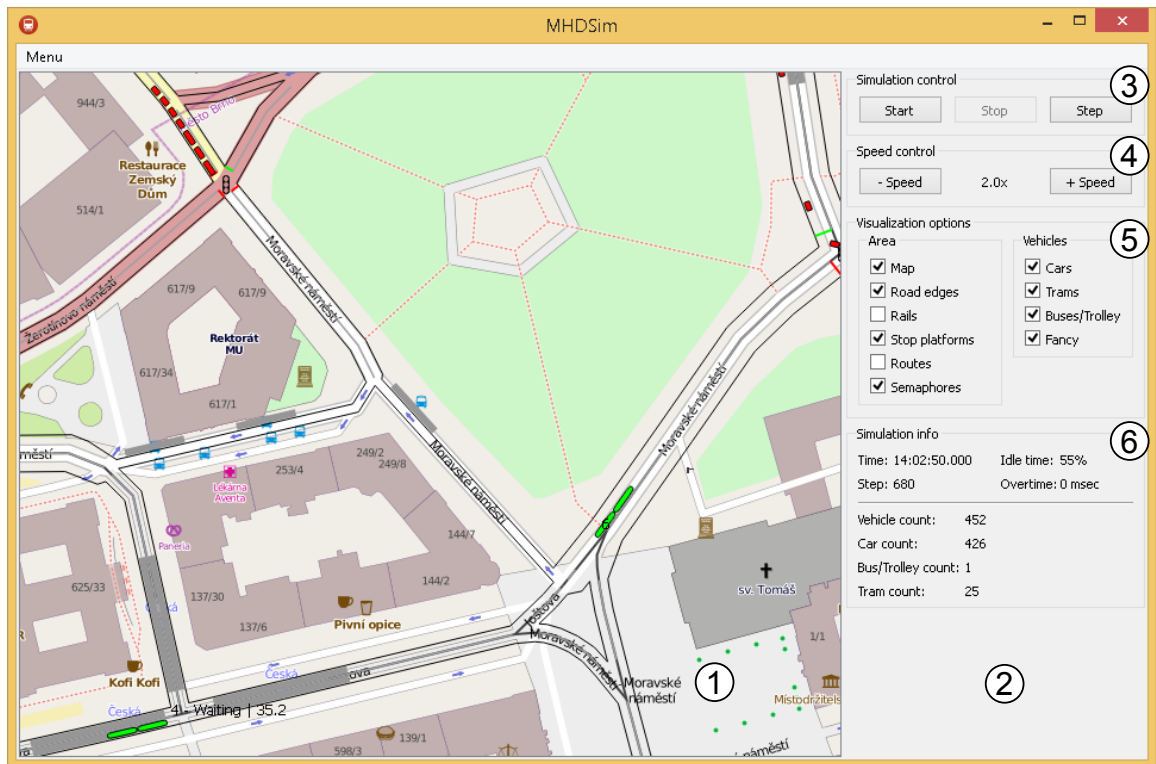


Obrázek B.1: Dialog s výběrem souborů pro simulaci.

B.2 Hlavní okno simulátoru

Po zpracování vstupních souborů a vytvoření dopravní sítě je zobrazeno hlavní okno s vizualizací simulace. Při startu je simulace pozastavena a je nutné ji spustit tlačítkem *Start* v ovládací části okna. Hlavní okno je rozděleno na dvě části:

- Vizualizační komponenta na levé straně okna (1).
- Komponenta s ovládacími prvky a informacemi o simulaci (2).



Obrázek B.2: Hlavní okno simulátoru.

Popis prvků ovládací komponenty:

- Simulation control (3) – ovládání běhu simulace.
 - Start – spuštění simulace.
 - Stop – pozastavení simulace.
 - Step – provedení jednoho kroku simulace.
- SpeedControl (4) – ovládání rychlosti simulace.
 - – Speed – zpomalení běhu simulace.
 - + Speed – zrychlení běhu simulace.
- Visualization options (5) – ovládání zobrazení prvků simulace. V první části lze měnit zobrazení samotné mapy, okrajů vozovky, tramvajových kolejí, zastávek, světelného řízení na křižovatkách anebo tras linek. Druhá část se týká zobrazení vozidel, kde je možné vybrat jaké typy vozidel budou vizualizovány.
- Simulation info (6) – informace o aktuálním času a kroku simulace, vytížení simulační smyčky a počty jednotlivých typů aktuálně simulovaných vozidel.

Příloha C

Obsah CD

+-- app	- soubory aplikace.
+-- schedule_downloader	- aplikace pro stahování a zpracování online jízdních řádů.
+-- bin	- spustitelný soubor pro platformu Windows spolu s potřebnými knihovnami a testovacími soubory.
+-- src	- zdrojové soubory programu.
+-- readme.txt	- popis instalace a ovládání aplikace.
+-- simulator	- simulátor linek MHD v Brně.
+-- bin	- spustitelný soubor pro platformu Windows spolu s potřebnými knihovnami a testovacími soubory.
+-- src	- zdrojové soubory programu.
+-- readme.txt	- popis instalace a ovládání aplikace.
+-- doc	- soubory dokumentace.
+-- src	- zdrojové soubory dokumentace.
+-- dokumentace.pdf	- projektová dokumentace.
+-- readme.txt	- popis projektu.