

Univerzita Palackého v Olomouci  
Přírodovědecká fakulta  
Katedra geoinformatiky

Bc. Tomáš POHANKA

Fuzzy modely pro efektivní  
řízení dopravy - případová  
studie na městě Trnava

Diplomová práce

Vedoucí práce: Mgr. Pavel TUČEK, Ph.D.

Olomouc 2014

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci magisterského studia oboru Geoinformatika vypracoval samostatně pod vedením Mgr. Pavla TUČKA, Ph.D.

Všechny použité materiály a zdroje jsou citovány s ohledem na vědeckou etiku, autorská práva a zákony na ochranu duševního vlastnictví. Všechna poskytnutá i vytvořená digitální data nebudu bez souhlasu školy poskytovat.

V Olomouci 19.srpna 2014

Děkuji vedoucímu práce Mgr. Pavlu TUČKOVÍ, Ph.D. za podněty a připomínky při vypracování práce. Za poskytnuté materiály děkuji Mgr. Lence ZAJÍČKOVÉ.

Dále bych rád poděkoval za podporu při psaní a následnou korekturu práce mému bratroví Ing. Pavlu POHANKOVÍ, Ph.D.

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLMOUCI

Přírodovědecká fakulta

Akademický rok: 2011/2012

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš POHANKA**  
Osobní číslo: **R11008**  
Studijní program: **N1301 Geografie**  
Studijní obor: **Geoinformatika**  
Název tématu: **Fuzzy modely pro efektivní řízení dopravy - případová studie na městě TRNAVA**  
Zadávací katedra: **Katedra geoinformatiky**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cílem diplomové práce je prozkoumat možnosti využití teorie fuzzy množin a fuzzy logiky v oblasti řízení křižovatek. Hlavním úkolem diplomové práce je vypracování ucelené studie možnosti využití fuzzy teorie a fuzzy logiky pro řízení dopravy a možnost jejího využití v komplexních systémech. Student v rámci diplomové práce zpracuje rešerši na téma fuzzy řízení dopravy. V rešerši se zaměří zejména na fuzzyfikaci báze pravidel používanou pro řízení jedné křižovatky. U této části bude student vycházet z dostupných zahraničních publikací. Dále se student zaměří na možnost rozšíření problematiky řízení jedné křižovatky na řízení úseku dopravní sítě. V praktické části diplomové práce pak aplikuje získané znalosti na zvolenou křižovatku.

Student vyplní údaje o všech datových sadách, které vytvořil nebo získal v rámci práce, do Metainformačního systému katedry geoinformatiky a současně zálohu údajů ve formě validovaného XML souboru. Celá práce (text, přílohy, výstupy, zdrojová a vytvořená data, XML soubor) se odevzdá v digitální podobě na CD (DVD) a text práce s vybranými přílohami bude odevzdán ve dvou svázaných výtiscích na sekretariát katedry. O diplomové práci student vytvoří webovou stránku v souladu s pravidly dostupnými na stránkách katedry. Práce bude zpracována podle zásad dle Voženílek (2002). Na závěr diplomové práce připojí student jednostránkové resumé v anglickém jazyce.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Rozsah pracovní zprávy: **max. 50 stran**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**  
Seznam odborné literatury:

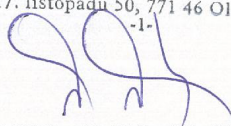
CORNELIS, Chris, Martine DE COCK a Etienne E. KERRE. Intuitionistic fuzzy rough sets: at the crossroads of imperfect knowledge. *Expert Systems*. 2003, 20(5), 260-270. DOI: 10.1111/1468-0394.00250. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1111/1468-0394.00250>  
CHIU, Stephen a Sujeet CHAND. Self-Organizing Traffic Control via Fuzzy Logic. 1049 Camino Dos Rios Thousand Oaks, CA 91360, USA, December 1993. Study. Rockwell International Science Center.  
FAVILLA, J., A. MACHION a F. GOMIDE. Fuzzy traffic control: adaptive strategies. In: *Second IEEE International Conference on Fuzzy Systems: San Francisco, California, March 28-April 1, 1993*. New York: IEEE, c1993. DOI: 10.1109/FUZZY.1993.327519.  
KHALID, Marzuki, See Chin LIANG a Rubiyah YUSOF. Control of a Complex Traffic Junction using Fuzzy Inference. Kuala Lumpur, MALAYSIA, 2004. Study. Universiti Teknologi Malaysia, Centre for Artificial Intelligence and Robotics (CAIRO).  
*Proceedings 2010 Second WRI Global Congress on Intelligent Systems, GCIS 2010, 16-17 December 2010, Wuhan, China: An Intelligent Fuzzy Control for Crossroads Traffic Light*. Los Alamitos, Calif.: IEEE Computer Society, 2010. ISBN 978-142-4492-473.  
SOOD, Apoorvi a Swati AGGARWAL. Crossroads in Classification: Comparison and Analysis of Fuzzy and Neuro-Fuzzy Techniques. *International journal of computer applications*. 2011, 24(2).  
VOŽENÍLEK, Vít. Diplomové práce z geoinformatiky. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého, 2002, 61 s. ISBN 80-244-0469-9.

Vedoucí diplomové práce: **Mgr. Pavel Tuček, Ph.D.**  
Katedra matematické analýzy a aplikací matematiky

Datum zadání diplomové práce: **1. října 2011**  
Termín odevzdání diplomové práce: **23. dubna 2013**

Prof. RNDr. Juraj Ševčík, Ph.D.  
děkan

L.S.

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI  
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA  
KATEDRA GEOINFORMATIKY  
17. listopadu 50, 771 46 Olomouc  
-1-  
  
Prof. RNDr. Vít Voženílek, CSc.  
vedoucí katedry

V Olomouci dne 1. října 2011

# Obsah

Úvod	10
1. Cíl	12
<b>I. Teorie</b>	<b>13</b>
<b>2. Fuzzy logika</b>	<b>15</b>
2.1. Základní definice fuzzy logiky . . . . .	15
2.2. Typy funkcí příslušnosti ( $\mu_A(x)$ ) . . . . .	17
2.3. Operace s fuzzy množinami . . . . .	20
2.4. Fuzzy číslo . . . . .	21
2.5. Fuzzifikace . . . . .	22
2.6. Báze pravidel . . . . .	23
2.7. Fuzzy inferenční systémy . . . . .	23
2.8. Defuzzifikace . . . . .	25
2.9. Fuzzy regulátor . . . . .	27
<b>3. Řízení křižovatky</b>	<b>28</b>
3.1. Normy pro křižovatky . . . . .	28
3.2. Charakteristiky dopravní situace . . . . .	29
3.3. Senzory pro detekci vozidel . . . . .	30
<b>II. Rešerše</b>	<b>32</b>
<b>4. Model FUSICO</b>	<b>33</b>
<b>5. Model FLMuSiC</b>	<b>35</b>
<b>6. Model FLA</b>	<b>37</b>
<b>7. Studie využití fuzzy řízení v Istanbulu</b>	<b>39</b>
<b>8. Model NFM</b>	<b>41</b>
<b>9. Model FLSC</b>	<b>45</b>
<b>10. Fuzzy regulátor podle Dr. Marcina Stanieka</b>	<b>48</b>
<b>11. Model SFTSC + TFTSC</b>	<b>51</b>
<b>12. Fuzzy regulátor podle prof. Zainoiya Stotskoa</b>	<b>53</b>

<b>III. Případová studie</b>	<b>57</b>
<b>13. Popis vybrané křižovatky</b>	<b>58</b>
<b>14. Simulační program PTV Vissim</b>	<b>60</b>
<b>15. Nastavení prostředí PTV Vissim</b>	<b>61</b>
<b>16. Vytvoření křižovatky</b>	<b>62</b>
16.1. Data z reálných detektorů . . . . .	63
16.2. Reálné parametry křižovatky . . . . .	63
<b>17. Fuzzy regulátor (řadič)</b>	<b>67</b>
17.1. Fuzzifikace . . . . .	67
17.2. Báze pravidel . . . . .	69
17.3. Výpočet délky zeleného signálu . . . . .	70
17.4. Návrh fuzzy regulátoru . . . . .	70
17.5. Fuzzy řízení křižovatky . . . . .	71
<b>18. Kód fuzzy regulátoru</b>	<b>75</b>
<b>19. Diskuze</b>	<b>78</b>
<b>20. Závěr</b>	<b>80</b>
<b>Summary</b>	<b>82</b>

## Seznam použitých zkratk

AIMSUN	Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-urban Networks
API	Application Programming Interface
COM	Component Object Model
CORSIM	CORridor SIMulation
FLA	Fuzzy Logic Model with Abnormalities
FLMuSiC	Fuzzy Logic Multi-phased Signal Control
FLN	Fuzzy Logic Model s normálním provozem
FLSC	Fuzzy Logic Signal Controller
FSGV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
FUSICO	Fuzzy Signal Control
GPS	Global Positioning System
GUTS	General Urban Traffic Simulator
HBS	German Highway Capacity Manual
HCM	Highway Capacity Manual
HSB	Hue Saturation Brightness
HUTSIM	Helsinki University of Technology Simulator
INCOME	Integration of signal Control with other Measures
MATLAB	Matrix laboratory
MITSIM	Microscopic Traffic Simulator
NFM	Novel Fuzzy Model
OSM	OpenStreetMap
Prompt	Priority and Informatics for Public Transport
PTV	Planung Transport Verkehr AG
RFID	Radio-frequency identification
RGB	Red Green Blue
RSM	Road Safety Management
SFTSC	Standard traffic signal single-stage fuzzy control



SOS-II	Self Optimising Signal Control
SSZ	Světelné signalizační zařízení
STN	Slovenské technické normy
TFTSC	Traffic signal two-stage fuzzy control
TP 235	Technické podmínky 235
TPMA	Traffic Performance on Major Arterials
TSK	Takagi-Sugeno-Kang fuzzy inferenční systém
UTSG	Universities' Transport Study Group
VA	Vehicle-actuated control
VAP	Vehicle Actuated Programming
Vissim	Verkehr In Städten - SIMulationsmodell

## Úvod

Celá matematika až do nedávna pracovala s reálnými nebo komplexními čísly. Až prof. Lotfi A. Zadeh v roce 1965 popsal v článku „Fuzzy sets” novou metodu, jak přistupovat k číslům, ale i normálním jevům, jako je například barva, velikost, složitost. Jedná se o fuzzy logiku, tedy česky řečeno o vágní, nejistá čísla, která se definují nejen konkrétním číslem, ale i stupněm příslušnosti, který určuje vztah k obecnějšímu jevu.

Je to princip, který jako jeden z mála dokáže pracovat s lidským vnímáním. Lidský mozek dokáže zpracovat nepřehledné množství informací, které ovšem lidské vjemy přijaly ve vágní formě. Nevidíme například jakou rychlostí letí pták nebo necítíme jakým tlakem nám druhá osoba stiskla ruku. Z osobních zkušeností pouze víme, jestli ten pták létá rychle či pomalu, jestli podání ruky bylo silné či jemné. S těmito údaji dokáže pracovat i fuzzy logika. Například jak definovat modrou barvu. Lze jí definovat v RGB jako 0, 0, 255 nebo v HSB 240 °, 100 %, 100 %. V reálném světě ovšem čistá modrá neexistuje (podání barev monitoru, barva v tiskárně, barva oblohy, různé vnímání barev očima a následné zpracování mozkiem jedince). S tím souvisí další problém, jak modrou barvu definovat pro lidské oko a která modrá je ta pravá modrá. Fuzzy logika se tedy bude používat tam, kde je potřeba plynulé regulace či rozhodování (rozjíždění a zastavování vlaků, řazení rychlostních stupňů v automatické převodovce, rozpoznávání obrazu), nebo kde je o získaných datech známo, že nejsou zcela přesná, jsou subjektivně popsána, nebo je dostatečná jen obecná odpověď (například vymezení venkova, „Jak moc vysoko letí letadlo?” „Letí hodně vysoko.”). Je lepší získat přibližně správnou odpověď na málo přesné údaje, než špatnou odpověď na přesné údaje (v domněnku, že údaje jsou opravdu přesné).

V současné době je automobil nedílnou součástí života, podobně jako například internet. Bez auta si dnes většina lidí nedokáže představit svůj každodenní život. Počet automobilů zaznamenává každoroční nárůst. Například za posledních pět let je na Slovensku každoročně registrováno zhruba sto tisíc nových automobilů ročně a v současnosti (30.06.2014) je ve Slovenské republice registrováno 2 675 238 vozidel<sup>1</sup>. Při takovém množství automobilů se začíná prohlubovat problém s mobilitou zejména ve velkých městech (polovina světové populace žije ve městech<sup>2</sup>), kde často dochází k dopravním zácpám (dopravní kongesce<sup>3</sup>). Jedním ze způsobů jak tento problém řešit je použitím fuzzy logiky pro řízení křižovatek.

Předložená diplomová práce se zabývá problematikou fuzzy množin a fuzzy logiky a možnostmi jejich využití v oblasti řízení křižovatek. Práce tak uceleně uvádí možnosti využití fuzzy teorie a logiky pro řízení dopravy a možnost jejího využití v komplexních systémech.

<sup>1</sup><http://www.minv.sk/?celkovy-pocet-evidovanych-vozidiel-v-sr>

<sup>2</sup><http://www.forbes.com/sites/sarwantsingh/2014/06/19/smart-cities-a-1-5-trillion-market-opportunity/>

<sup>3</sup>[http://cs.wikipedia.org/wiki/Dopravní\\_zácpa](http://cs.wikipedia.org/wiki/Dopravní_zácpa)

Diplomová práce je rozdělena do tří logických celků. Na teoretickou část, na řešeršní část a na část zabývající se případovou studií. Po úvodu jsou uvedeny cíle diplomové práce. Následuje teoretická část, která popisuje fuzzy logiku a dává teoretický úvod k problematice řízení křižovatek. Další kapitoly se zabývají řešerší, která obsahuje informace o modelech a studiích, které řeší řízení křižovatky pomocí fuzzy logiky. Případová studie obsahuje kapitoly, které řeší praktickou aplikaci získaných poznatků na konkrétní křižovatku.

## 1. Cíl

Cílem diplomové práce je prozkoumat možnosti využití teorie fuzzy množin a fuzzy logiky v oblasti řízení křižovatek. Pro splnění cíle diplomové práce budou definovány další dílčí cíle (teoretické a praktické):

- Vypracování ucelené teoretické části, která popisuje základní fungování fuzzy logiky.
- Zpracování řešerše týkající se fuzzy řízení dopravy, zejména pro řízení jedné křižovatky.
- Vytvoření případové studie na zvolené křižovatce ve městě Trnava (Slovensko) pomocí získaných znalostí z teoretické a řešeršní části.

Tyto tři dílčí cíle budou zpracovány v diplomové práci, která bude stejným způsobem rozdělena na tři části. Výsledkem bude simulace křižovatky v programu PTV Vissim pomocí pevného signálního plánu a popsání fungování fuzzy regulátoru. Předpokladem pro fungování fuzzy logiky při řízení křižovatky jsou detektory, které by měly být rozmístěné v okolí křižovatky tak, aby byly schopny kvalitního sběru dat. Jedná se především o zjištění délky vytvořené fronty (počet automobilů čekajících ve frontě) a časy průjezdu určitým místem.

---

# Část I.

## Teorie

Počátky fuzzy logiky se datují od roku 1965, kdy prof. Lotfali Aliaskerzadeh (více znám jako prof. Lotfi Asker Zadeh) narozen 4. února 1921 v Ázerbájdžánu, publikoval článek v časopisu *Information and control* (dnes *Information and Computation*) pod názvem *Fuzzy sets* (Fuzzy množiny). Ze začátku tato myšlenka o fuzzy logice a fuzzy množinách nebyla zcela přijata. Až na začátku 80. let 20. století se této ideje chytlo Japonsko, kde vznikaly první projekty a studie. Na konci 80. let 20. století zjistil zbytek světa, že využití fuzzy logiky může přinést užitek a začal s desetiletým zpožděním vytvářet vlastní aplikace. Po vydání článku se prof. Zadeh setkal s velkou kritikou. Jedním z jeho kritiků byl i jeho kolega prof. William Kahan z Kalifornské univerzity v Berkeley v USA, který o článku řekl:

”Fuzzy theory is wrong, wrong, and pernicious. What we need is more logical thinking, not less. The danger of fuzzy logic is that it will encourage the sort of imprecise thinking that has brought us so much trouble. Fuzzy logic is the cocaine of science.”

I před koncem 80. let v roce 1988 prof. Myron Tribus, který se zabýval statistikou, mechanikou kapalin, termodynamikou, teplotním přenosem (například u letadel), se vyjádřil v neprospěch fuzzy logiky, kdy prohlásil:

”Fuzziness is probability in disguise. I can design a controller with probability that could do the same thing that you could do with fuzzy logic.”

Prof. Zadeh ovšem na kritiku moc nedbal, pokračoval dál ve výzkumu a pokládal základní kameny dalším fuzzy teoriím, například fuzzy podobnost, fuzzy metody vícekritériálního hodnocení a rozhodování. Tím vznikaly další a další studie, které prokázaly, že fuzzy logika opravdu funguje a postupem času začaly námitky na fuzzy logiku opadat. (Běhounek, 2012), (Klingenberg). V roce 1973 vyslovil prof. Zadeh princip inkompatibility.

„As the complexity of a system increases, our ability to make precise and yet significant statements about its behavior diminishes until a threshold is reached beyond which precision and significance (or relevance) become almost mutually exclusive characteristics.”<sup>4</sup>

Fuzzy logika se zařadila mezi techniky umělé inteligence po bok expertních systémů a neuronových sítí. Fuzzy logika se snaží simulovat logické řízení situace zkušeným člověkem. Hlavními aplikacemi, kde se fuzzy logika začíná využívat, je řízení, rozhodování a hodnocení. Mezi první aplikace, kdy byla prokázána

---

<sup>4</sup> „S rostoucí složitostí systému klesá naše schopnost formulovat přesné a významné vlastnosti o jeho chování, až je dosažena hranice, za kterou je přesnost a relevantnost prakticky vzájemně se vylučující jevy.”

---

funkčnost fuzzy logiky, bylo obrácené kyvadlo. Dnes by se to dalo přirovnat k vozítku Segway, které reaguje na vertikální pohyby řidiče. Dalšími příklady může být: kontrola výšky letadel, automatická převodovka ve vozidle, různé systémy pro podporu (prostorového) rozhodování, automatické rozeznávání cíle pomocí termálních snímků, kontrola expozice u fotoaparátů, řízení klimatizace, pračky, vytápění, řízení cementové pece (první v Dánsku v roce 1975), automatické řízení vozidel, lékařské diagnostické systémy, řízení robotických ramen, automatické ekvalizéry, zrychlování, brzdění a zastavování vlaků, analýzy venkova, vymezení sklonu svahů. (Klinkhachom, 2004)

Již od zveřejnění publikace prof. Zadeha v roce 1965 byly vznášeny otázky, jak se liší fuzzy logika od pravděpodobnosti. Prof. Zadeh v publikaci *Probability Theory and Fuzzy Logic* (Zadeh, 2002a) uvádí podstatu fuzzy logiky a pravděpodobnosti a snaží se vyvrátit názory typu Myrona Tribuse. Základy teorie pravděpodobnosti jsou zejména v Aristotelově logice, tedy použití dvou hodnot, například 0 a 1, pravda a nepravda, ano a ne. Kvůli tomuto přístupu má teorie pravděpodobnosti řadu omezení a na mnoho otázek nedokáže odpovědět. Hlavním neduhem teorie pravděpodobnosti je její konflikt se skutečným světem. Zde totiž skoro nic není černé nebo bílé, ale většina má nějaký odstín šedé. Další problém nazval prof. Zadeh „dilema možného, ale ne pravděpodobného“. Jako příklad uvedl: „Předpokládáme, že 99 % profesorů má i titul Ph. D. a máme zde jednoho profesora. Jaká je pravděpodobnost, že tento profesor má Ph. D. titul? Na základě teorie pravděpodobnosti bude výsledek mezi 0 a 1.“ Třetí neméně podstatný důvod je, že teorie pravděpodobnosti neumí pracovat s informací na základě smyslového vnímání. Například: „Eva je mladá.“ „Vrací se obvykle kolem 18:00.“ „Je velmi nepravděpodobné, že bude výrazný nárůst cen benzínu v blízké budoucnosti.“ Toto je vážné omezení běžné teorie pravděpodobnosti, protože je to hlavní způsob, kterým člověk komunikuje. Člověk tím dokáže popsat široké spektrum fyzikálních i duševních problémů bez jakéhokoli měření nebo výpočtů. Například: „Překračuješ rychlost vozidla o 23,45 km/h.“ „Do zatáčky jsi vjel o 15,69 km/h rychleji, než jsi měl.“ Většina z nás určitě slyšela spíš: „Nejezdi tak rychle.“ „Je tam zatáčka, tak prosím tě zpomal.“ Nehledě na nepřesnost a nejistotu měřících přístrojů a postupů. Dalším příkladem může být otázka Jamese C. Bezdeka: „Předpokládejte, že máte dvě sklenice naplněné tekutinou. První sklenice je popsána pravděpodobností jako 95% možnost, že je tekutina zdravá a dobrá. Druhá sklenice je popsána fuzzy logikou, jako 0.95 stupně příslušnosti ve třídě zdravá a dobrá tekutina. Jakou sklenici by jste si vybrali? Mějte na paměti, že první sklenice má 5% možnost být naplněna nezdravou vodou s jedem.“ Jak rozšířit klasickou teorii pravděpodobnosti o informace pořízené smyslovým vnímáním se také zabývá prof. Zadeh (Zadeh, 2002b)

## 2. Fuzzy logika

Následující kapitola se zabývá základní teorií fuzzy logiky, kterou navrhl a popsal prof. L.A. Zadeh (dále existují například Łukasiewiczova logika, Novákova logika, Gödelova logika). V České republice je spousta odborníků na fuzzy logiku napříč všemi obory. Na Univerzitě Palackého v Olomouci je to například Doc. RNDr. Jana Talašová, Csc., na Ostravské Univerzitě v Ostravě prof. Ing. Vilém Novák, DrSc., na Vysokém učení technickém v Brně prof. Ing. Petr Dostál, CSc., na Českém vysokém učení technickém v Praze prof. Ing. Mirko Navara, DrSc. Toto je ovšem jen špička ledovce a odborníků v České republice bude nespočet a to nejen z akademické, ale i z odborné sféry.

Následující podkapitoly popisují základní pojmy fuzzy logiky jako je fuzzy množina, fuzzy číslo, funkce příslušnosti, báze pravidel, fuzzy inferenční systémy, fuzzy regulátor.

### 2.1. Základní definice fuzzy logiky

Klasickou (ostrou, anglicky crisp) množinu  $A$  lze popsat charakteristickou funkcí s  $X$  jako definičním oborem.

**Definice 2.1.** Charakteristická funkce  $\mu_A$  množiny  $A$  je definována vztahem

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & \text{pro } x \in A, \\ 0 & \text{pro } x \notin A. \end{cases}, \mu_A : X \rightarrow \{0, 1\}.$$

U fuzzy množiny ovšem nemusí jen platit, že prvek do množiny zcela patří, nebo nepatří. Je to jeden z možných případů, ale lze předpokládat, že prvek bude do množiny patřit jen částečně. To je hlavní rozdíl mezi klasickou a fuzzy množinou. Funkce bude nabývat hodnot z uzavřeného intervalu  $[0, 1]$ .

**Definice 2.2.** Nechť je dána množina  $X$ , tzv. univerzum. Pak fuzzy množina  $A$  na univerzu  $X$  (fuzzy podmnožina  $A$  univerza  $X$ ) je definována zobrazením

$$\mu_A : X \rightarrow [0, 1].$$

Tato charakteristická funkci se nazývá funkce příslušnosti (popis na obrázku 2.1). Pro každý prvek  $x \in X$  je hodnota  $\mu_A(x) \in [0, 1]$ . Toto tvrzení říká, do jaké míry je prvek  $x$  prvkem množiny  $A$ . Hodnotu  $\mu_A(x)$  označujeme jako stupeň příslušnosti prvku  $x$  k fuzzy množině  $A$ . To znamená, do jaké míry, vyjádřené reálným číslem mezi 0 a 1, se ostrá hodnota  $x$  nachází ve fuzzy množině. Například červeno-žluté jablko bude mít stupeň příslušnosti 0,8 k červené barvě a 0,2 k barvě žluté. Funkce příslušnosti je v mnoha případech shodná s fuzzy množinou, proto se může zápis zjednodušovat jen na  $A(x)$ . Někdy je nutné tyto dvě hodnoty striktně rozlišovat, protože fuzzy množina se nemusí zapisovat jen pomocí funkce příslušnosti, ale například výčtem prvku. Potom je nutné zápis fuzzy množiny  $A(x)$  a funkci příslušnosti  $\mu_A(x)$  rozlišovat. Dále je definována množinu  $\mathcal{F}(X)$ , která je tvořena všemi fuzzy podmnožinami univerza  $X$ .

**Definice 2.3.** Výška (anglicky height)  $h(A)$  fuzzy množiny  $A$  na univerzu  $X$ <sup>5</sup>

$$h(A) = \{x \in X : \sup A(x)\}.$$

Dosahuje-li výška fuzzy množiny alespoň v jednom bodě výšky 1 (nabývá stupně příslušnosti 1), potom se mluví o normální fuzzy množině. V ostatních případech se nazývá subnormální.

Jádro (anglicky core)  $CoreA$  fuzzy množiny  $A$  na univerzu  $X$  nazýváme (ostrou) množinu

$$CoreA = \{x \in X : A(x) = 1\}.$$

Jádrem se nazývá ta část, která má hodnotu stupně příslušnosti rovnu 1. Podle tvaru funkce příslušnosti může být hodnota jádra vyjádřena bodem nebo intervalem a u subnormální funkce nebude jádro existovat vůbec.

Nosičem (anglicky support)  $SuppA$  fuzzy množiny  $A$  na univerzu  $X$  nazýváme (ostrou) množinu

$$SuppA = \{x \in X : A(x) > 0\}.$$

Funkcí příslušnosti lze popsat jakákoli fuzzy množina. Pokud je uvažováno, že univerzum fuzzy množiny  $X = \mathbb{R}$ , pak přepis pro fuzzy množiny  $A$  a  $B$  může vypadat následovně.

$$\mu_A = \begin{cases} 0 & \text{pro } x > 0 \\ x & \text{pro } x \in [0, 1] \\ 2 - x & \text{pro } x \in (1, 2] \\ 0 & \text{pro } x > 2 \end{cases}$$

$$\mu_B = \begin{cases} \frac{1}{2} & \text{pro } x = 3 \\ 1 & \text{pro } x = 4 \\ \frac{1}{4} & \text{pro } x = 5 \\ 0 & \text{pro ostatní } x \end{cases}$$

Pro následující vyjádření platí, že reálná funkce na  $X$  je podmnožinou kartézského součinu  $X \times \mathbb{R}$  (množina uspořádaných dvojic). Poté je nutné definovat nulové stupně příslušnosti.

$$\mu_B = \left\{ \left(3, \frac{1}{2}\right), (4, 1), \left(5, \frac{1}{4}\right) \right\}$$

**Definice 2.4.** Necht je dána fuzzy množina  $A$  na univerzu  $X$  a reálné číslo  $\alpha \in [0, 1]$ . Pak  $\alpha$  – řezem (anglicky  $\alpha$  – cut) fuzzy množiny  $A$  nazýváme (ostrou) množinu

$$A_\alpha = \{x \in X : A(x) \geq \alpha\}$$

Necht  $A \in \mathcal{F}(X)$ ,  $\alpha \in [0, 1]$ . Pak  $\alpha$  – hladina fuzzy množiny  $A$  je ostrá množina

$$\mu_A^{-1}(\alpha) = \{x \in X : \mu_A(x) = \alpha\}.$$

<sup>5</sup>sup označuje supremum (horní hranice, maximum)



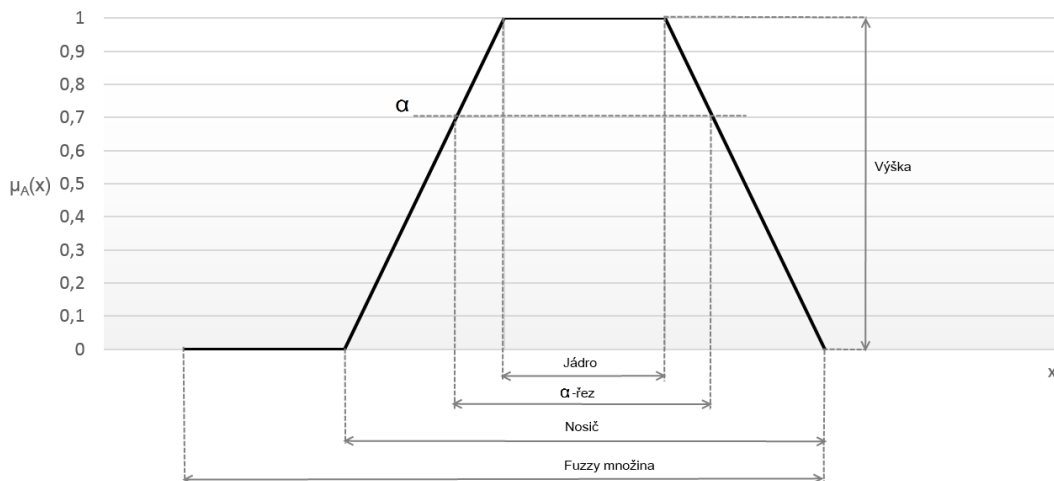
Poté systém řezů fuzzy množiny  $A$  je zobrazení

$$R_A : [0, 1] \rightarrow P(X),$$

které každému  $\alpha \in [0, 1]$  přiřadí  $\alpha$  – řez

$$R_A(\alpha) = \mu_A^{-1}([\alpha, 1]) = \{x \in X : \mu_A(x) > \alpha\}$$

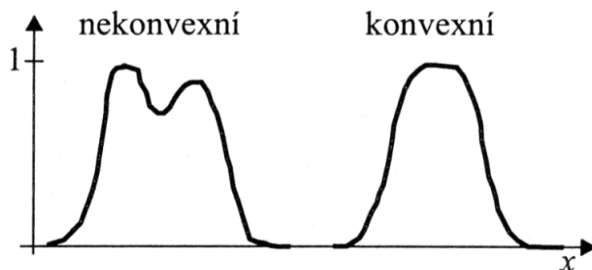
Následující obrázek zobrazuje graficky výše uvedené termíny.



Obrázek 2.1: Vlastnosti fuzzy množiny

## 2.2. Typy funkcí příslušnosti ( $\mu_A(x)$ )

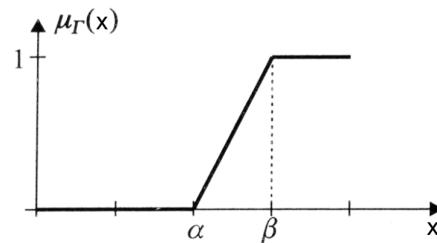
V této podkapitole budou znázorněny základní, nejjednodušší fuzzy množiny vyjádřené jejich funkcí příslušnosti (Jura, 2003). Jedná se o  $\Gamma$ -funkci, L-funkci,  $\Lambda$ -funkci,  $\Pi$ -funkci a S-funkci. Pro jakékoli řízení křížovanky je doporučeno vybírat z těchto možností. Funkce příslušnosti může být i nekonvexní v případě, že pro nenulové  $\alpha$  bude existovat takové  $A_\alpha$ , které nebude obsahovat jen jeden interval hodnot  $x$  (Obrázek 2.2). Při zvolení velmi složitější matematickou funkcí, bude i následná fuzzifikace, ale i možná defuzzifikace, náročná na výpočet a celý systém tím bude zpomalován. Tím by systém ztrácel své „kouzlo“ rychlosti a jednoduchosti návrhů a výpočtů.



Obrázek 2.2: Konvexnost fuzzy množin

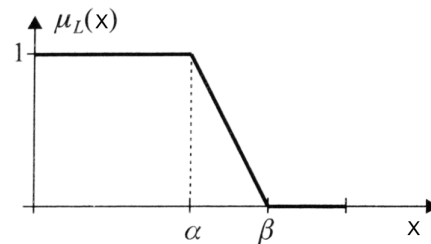
- $\Gamma$ -funkce je definovaná jako

$$\Gamma(x, \alpha, \beta) = \begin{cases} 0 & x < \alpha \\ (x - \alpha)/(\beta - \alpha) & \alpha \leq x \leq \beta \\ 1 & x > \beta \end{cases}$$

Obrázek 2.3:  $\Gamma$ -funkce (gama funkce)

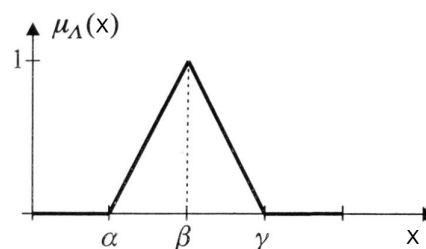
- $L$ -funkce je definovaná jako

$$L(x, \alpha, \beta) = \begin{cases} 0 & x < \alpha \\ (\beta - x)/(\beta - \alpha) & \alpha \leq x \leq \beta \\ 1 & x > \beta \end{cases}$$

Obrázek 2.4:  $L$ -funkce

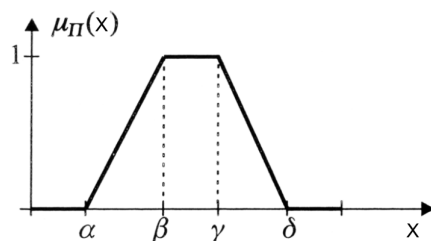
- $\Lambda$ -funkce je definovaná jako

$$\Lambda(x, \alpha, \beta, \gamma) = \begin{cases} 0 & x < \alpha \\ (x - \alpha)/(\beta - \alpha) & \alpha \leq x \leq \beta \\ (\gamma - x)/(\gamma - \beta) & \beta \leq x \leq \gamma \\ 1 & x > \gamma \end{cases}$$

Obrázek 2.5:  $\Lambda$ -funkce (lambda funkce)

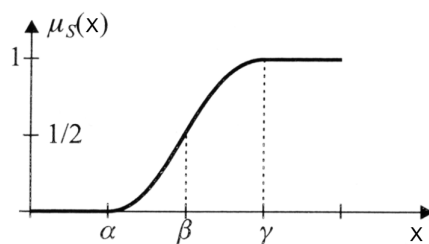
- $\Pi$ -funkce je definovaná jako

$$\Pi(x, \alpha, \beta, \gamma, \delta) = \begin{cases} 0 & x < \alpha \\ (x - \alpha)/(\beta - \alpha) & \alpha \leq x \leq \beta \\ 1 & \beta \leq x \leq \gamma \\ (\delta - x)/(\gamma - \delta) & \gamma \leq x \leq \delta \\ 0 & x > \delta \end{cases}$$

Obrázek 2.6:  $\Pi$ -funkce (pi funkce)

- S-funkce, kterou navrhl prof. Zadeha, je definovaná jako

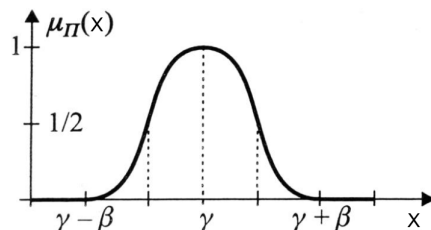
$$S(x, \alpha, \gamma) = \begin{cases} 0 & x \leq \alpha \\ 2(x - \alpha)^2/(\gamma - \alpha)^2 & \alpha < x \leq \beta \\ 1 - 2(x - \gamma)^2/(\gamma - \alpha)^2 & \beta < x \leq \gamma \\ 1 & x > \gamma \end{cases}$$



Obrázek 2.7: S-funkce podle Zadeh

- $\Pi$ -funkce, kterou navrhl prof. Zadeha, je definovaná jako

$$\Pi(x, \beta, \gamma) = \begin{cases} S(x, \gamma - \beta, \gamma)^2 & x < \gamma \\ 1 - S(x, \gamma, \gamma + \beta) & x \geq \gamma \end{cases}$$

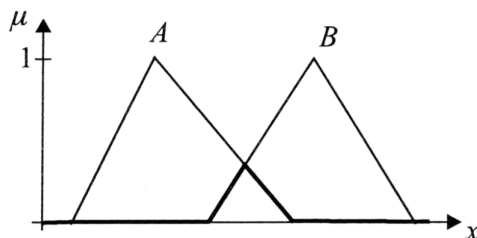
Obrázek 2.8:  $\Pi$ -funkce podle Zadeh (pi funkce)

### 2.3. Operace s fuzzy množinami

Stejně jako s klasickými (ostrými) množinami, lze i s fuzzy množinami počítat a provádět s nimi operace jako průnik, sjednocení, doplněk. Tyto operace mohou být definované různými způsoby s velmi rozdílnými výsledky. Jejich použití závisí čistě na konkrétní aplikaci a požadovaných výsledcích. Následující obrázky operací jsou opět z publikace prof. Jury (Jura, 2003) a jsou to operace, které původně navrhl prof. Zadeh.

- Průnik fuzzy množin A a B, které navrhl prof. Zadeh, je definované jako

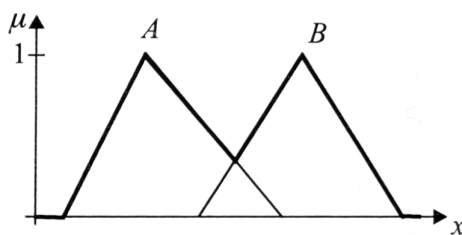
$$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$$



Obrázek 2.9: Průnik fuzzy množin A a B

- Sjednocení fuzzy množin A a B,

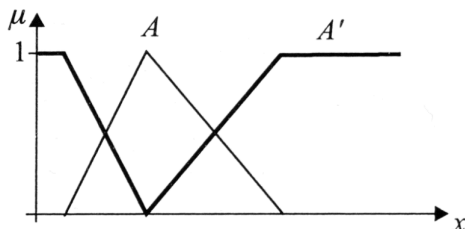
$$\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$$



Obrázek 2.10: Sjednocení fuzzy množin A a B

- Doplněk fuzzy množiny  $A$ ,

$$\mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x)$$

Obrázek 2.11: Doplněk fuzzy množiny  $A$ 

## 2.4. Fuzzy číslo

**Definice 2.5.** Fuzzy interval je taková množina  $A \in \mathcal{F}(\mathbb{R})$ , která splňuje následující podmínky:

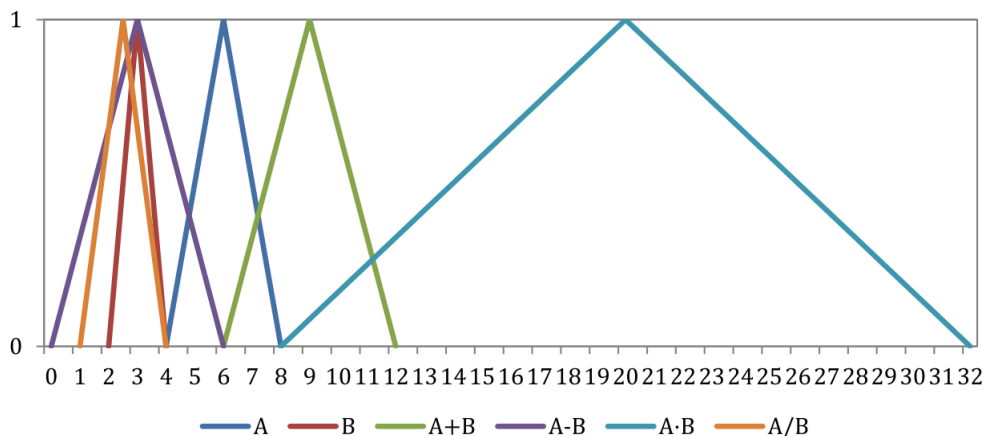
1. Nosič fuzzy množiny  $A$  je omezená množina
2. Pro všechna  $\alpha \in (0, 1)$  je  $R_A(\alpha)$  uzavřený interval
3.  $R_A(1) \neq \emptyset$ , respektive, že  $R_A(1)$  je neprázdný uzavřený interval

Pokud navíc fuzzy interval splňuje podmínku, že  $R_A(1)$  je jednobodová množina, pak se  $A$  nazývá fuzzy číslo. Fuzzy číslo je takové číslo, které kromě hodnoty v množině všech reálných čísel ( $\mathbb{R}$ ), nese i hodnotu stupně příslušnosti. Na tomto staví princip rozšíření, podle kterého se s fuzzy čísly počítá. Princip rozšíření znamená, že body z univerza  $X$  do univerza  $Y$  se zobrazují spolu se svými stupni příslušnosti. Jestliže má bod v univerzu  $Y$  více vzorů, potom rozhoduje největší z jejich stupňů příslušnosti. Pokud existuje fuzzy číslo  $C$  a spojitá funkce  $f$ , pak dosazením fuzzy čísla  $C$  do funkce  $f$  vznikne opět fuzzy číslo  $D$ , jehož funkce příslušnosti je dána

$$D(d) = \max\{C(c) : d = f(c)\}.$$

S využitím principem rozšíření jsou použity operace sčítání, odčítání, násobení a dělení, které jsou běžně používány u reálných čísel, na fuzzy intervaly. Pokud jsou uvažovány ostré intervaly, lze využít tzv. intervalovou aritmetiku. Pro intervalovou aritmetiku platí následující pravidla spolu s jejich grafickým znázorněním (Obrázek 2.12 (Šeda, 2013)):

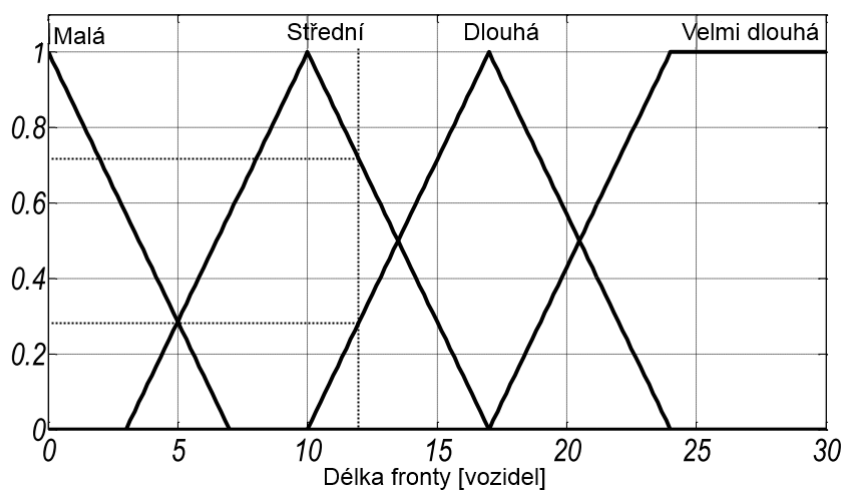
- Sčítání:  $[a, b] + [c, d] = [a + c, b + d]$
- Odčítání:  $[a, b] - [c, d] = [a - d, b + c]$
- Násobení:  $[a, b] \cdot [c, d] = [\min(ac, ad, bc, bd), \max(ac, ad, bc, bd)]$
- Dělení:  $\frac{[a, b]}{[c, d]} = [\min(\frac{a}{c}, \frac{a}{d}, \frac{b}{c}, \frac{b}{d}), \max(\frac{a}{c}, \frac{a}{d}, \frac{b}{c}, \frac{b}{d})]$ , pokud  $[c, d] \notin 0$



Obrázek 2.12: Intervalová aritmetika fuzzy intervalu

## 2.5. Fuzzifikace

Fuzzifikace je proces při kterém se reálné číslo převede na fuzzy číslo. Reálným číslem může být počet vozidel ve frontě zaznamenaných senzorem. Fuzzifikací je převedeno toto reálné číslo na jazykovou proměnou, se kterou se poté mnohem snadněji pracuje. Jazyková aproximace znamená, že je přiřazeno jméno funkci příslušnosti, tak aby vyjadřovala vlastnost jevu, který je popisován. Pro popis délky fronty lze pojmenovat jednotlivé funkce příslušnosti například jako „Malá“, „Střední“, „Dlouhá“ a „Velmi dlouhá“ (Obrázek 2.13). Pokud je ze senzoru přijata informace, že počet aut ve frontě byl 12 a je tato informace fuzzifikována, budou výsledkem dvě fuzzy čísla. První fuzzy číslo spadá pod funkci příslušnosti „Dlouhá“ se stupněm příslušnosti 0,3 a pro funkci příslušnosti „Střední“ se stupněm příslušnosti 0,7. Jakákoli hodnota, která může být fuzzifikována, bude mít minimálně jedno fuzzy číslo, které jí bude reprezentovat.



Obrázek 2.13: Funkce příslušnosti délky fronty (Stotsko, 2013)

## 2.6. Báze pravidel

Bázi pravidel sestavuje expert na daný problém. Tato báze pravidel představuje sadu pravidel ve tvaru

$$JESTLI\check{Z}E < \textit{něco nastalo} >, POTOM < \textit{se stane} > .$$

Tato báze pravidel má předurčený počet pravidel. Počet pravidel musí být odpovídající počtu funkcí příslušností vstupních jevů. Pokud bude převzat příklad z kapitoly Fuzzifikace, pak budou pravidla čtyři. Pokud by k délce fronty byl přidán další jev, například hustotu dopravy, která bude mít také čtyři funkce příslušnosti, bude počet pravidel už šestnáct. Důvod exponenciálního nárůstu pravidel tkví v zabezpečení všech okolností, které mohou nastat. Například při případě, kdy bude délka fronty „Malá“ a hustota dopravy bude také „Malá“, tak i případě, kdy bude délka fronty „Velmi dlouhá“ a hustota dopravy „Velmi velká“. Všechny tyto kombinace budou mít odpovídající vazbu ve výstupní funkci, v tomto případě například délku časového intervalu zeleného signálu. Pravidlo z báze pravidel může vypadat následovně

$$JESTLI\check{Z}E \textit{ délka fronty JE "Malá" A hustota dopravy JE "Malá"}$$

$$POTOM \textit{ délka zeleného signálu JE "Minimální"}$$

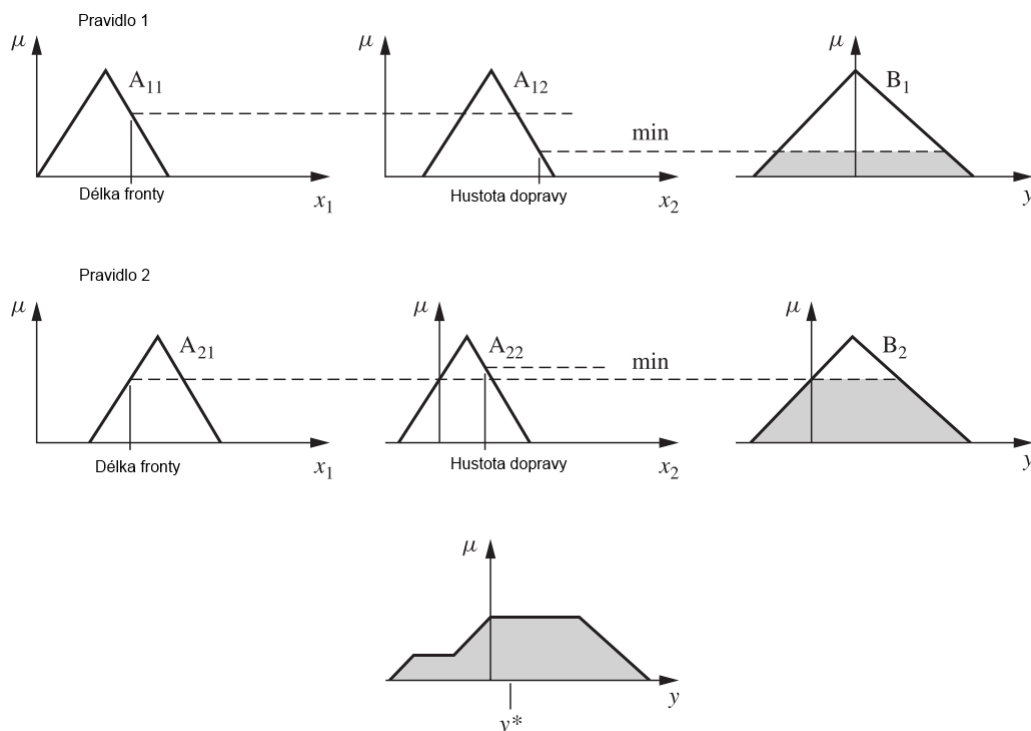
## 2.7. Fuzzy inferenční systémy

Následující kapitola popisuje základní inferenční systémy Mamdani a Takagi-Sugeno-Kang (TSK) (Ross, 2010). Inferenční systémy vyhodnocují podmínky v bázi pravidel a buď vrátí výsledek jako fuzzy množinu (Mamdani) nebo jako ostré číslo (TSK). Tyto systémy ovšem nejsou jediné. V dnešní době se lze setkat, kromě klasických, také s inferenčním systémem založeným na neuronových sítích, celulárních automatech či genetických algoritmech.

### 2.7.1. Mamdani inferenční systém

Nejběžnější inferenční systém, který se používá od roku 1975, je Mamdaniho systém (Mamdani, 1975). Na obrázku 2.14 je zobrazeno složení dvou pravidel, kde symboly  $A_{11}$  a  $A_{12}$  představují vstupní hodnoty délky fronty a hustoty dopravy, respektive  $B_1$  délky časového intervalu zeleného signálu. Symboly  $A_{21}$  a  $A_{22}$  představují tytéž vstupní hodnoty, ovšem pro druhou funkci příslušnosti, které se jí také týkají (viz příklad v sekci 2.5). Díky logickému spojení  $A$  ( $AND$ ) jednotlivých jevů se jednotlivé funkce příslušnosti pravidel spojí dohromady. Funkce pro výslednou funkci příslušnosti bude vypadat následovně

$$\mu_{B^k}(y) = \max_k [\min[\mu_{A_1^k}(\textit{délka fronty}), \mu_{A_2^k}(\textit{hustota dopravy})]]$$



Obrázek 2.14: Grafické znázornění defuzzifikace Mamdaniho (max-min) inferenčního systému

Výsledkem je fuzzy množina (funkce příslušnosti), kterou je nutné defuzzifikovat. Nejběžnější metodou pro defuzzifikaci je metoda středu plochy. Mamdaniho inferenční systém nikdy nedosáhne maximální prahové hodnoty výstupních hodnot, kvůli zvolené výsledné funkci defuzzifikace.

### 2.7.2. TSK

Takagi, Sugeno a Kang přistoupili v polovině 90. let 20. století k problému fuzzy logiky trochu odlišným způsobem, než do té doby například výše uvedený Mamdani. Jejich báze pravidel neměla na výstupu fuzzy množinu (funkci příslušnosti), ale přímo reálnou funkci (většinou polynomickou), respektive přímo reálné číslo s výsledkem. Tím se zbavili defuzzifikace a celý inferenční systém velmi zrychlili. Obecný předpis pravidla je

$$JESTLIŽE x JE \mu_A A y JE \mu_B B, POTOM z JE z = f(x, y)$$

Spojení  $\mu_A$  a  $\mu_B$  probíhá podobně jako u Mamdaniho inferenčního systému pomocí minimální výšky funkce příslušnosti a propojení více dotčených pravidel pomocí váženého průměru.



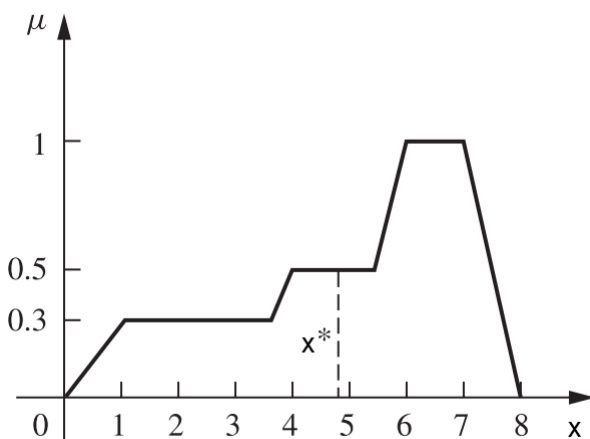
## 2.8. Defuzzifikace

Defuzzifikace je opačný proces k fuzzifikaci. Fuzzy číslo je převedeno zpět na reálné číslo. Jakým způsobem bude defuzzifikace probíhat určuje fuzzy inferenční systém. Určitým principem skládá dohromady fuzzifikované vstupní hodnoty tak, aby co nejlépe vystihovaly situaci, která vznikla. Pokud bude opět převzat příklad z kapitoly Báze pravidel, kdy je sledována délka fronty, hustota dopravy a délka časového intervalu zeleného signálu, tak je vypočítávána taková délka časového intervalu zeleného signálu, která odpovídá aktuální délce fronty a hustoty dopravy.

Délku časového intervalu zeleného signálu opět představuje sada funkcí příslušnosti. Abychom získali reálné číslo, je potřeba výsledek, který nám dala báze pravidel, defuzzifikovat. Nejrozšířenější defuzzifikační rovnice jsou následující.

- Metoda středu plochy (anglicky Center of Area, Center of Gravity) získává reálné číslo ze souřadnic těžiště plochy výstupní funkce příslušnosti.

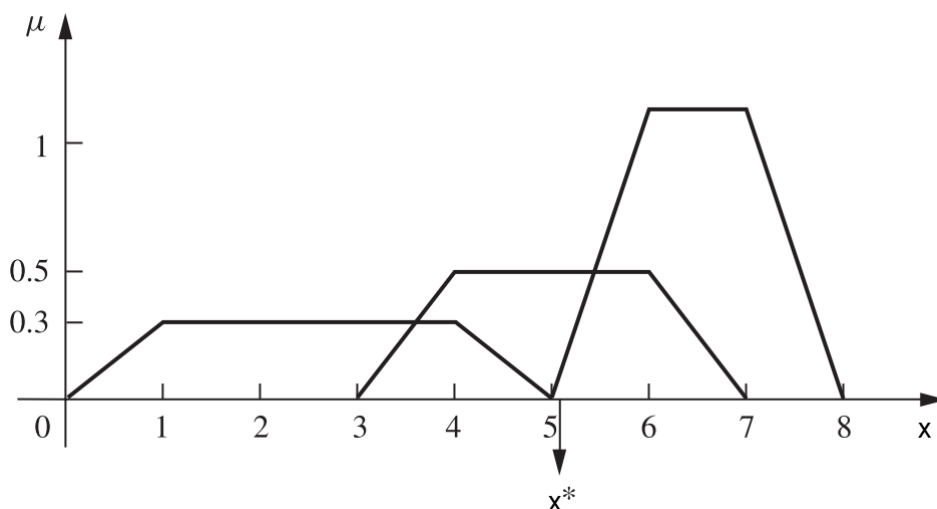
$$x^* = \frac{\int \mu_C(x) \cdot x \, dx}{\int \mu_C(x) \, dx}$$



Obrázek 2.15: Metoda středu plochy

- Metoda středů součtů (anglicky Center of Sum). Je to nejrychlejších z výpočetních metod defuzzifikace. Pro získání reálného čísla se místo sloučení funkcí do jedné funkce příslušnosti se funkce příslušnosti sčítají. Tím dochází ke zdvojení míst průniků fuzzy množin a hledání centroidů pro každou fuzzy množinu zvlášť.  $\bar{x}$  zde znázorňuje vzdálenost k těžišti jednotlivých funkcí příslušnosti.

$$x^* = \frac{\sum_{k=1}^n \mu_{C_k}(x) \int_x \bar{x} dx}{\sum_{k=1}^n \mu_{C_k}(x) \int_x dx}$$



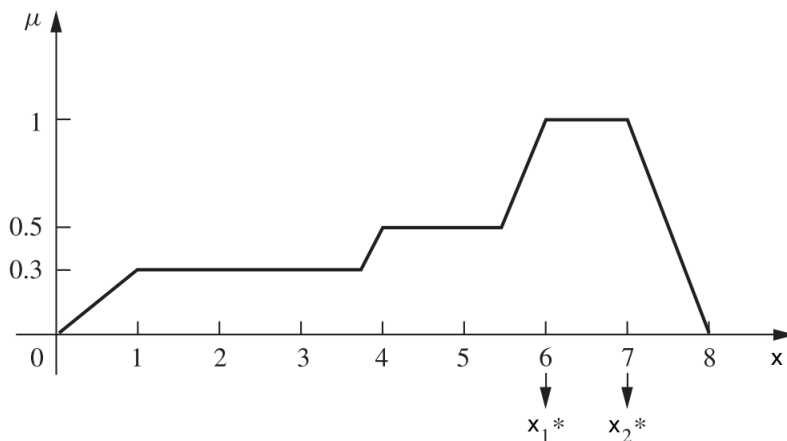
Obrázek 2.16: Metoda středů součtů

- Metoda prvního (minimálního) maxima (anglicky First of Maximum) získává reálné číslo z nejnižší hodnoty maximálního stupně příslušnosti. Nejdříve se zjistí nejvyšší výška výsledné funkce příslušnosti podle Definice 2.3.

$$x^* = \inf_{x \in X} \{x \in X : \mu_{C_k}(x) = h(C_k)\}$$

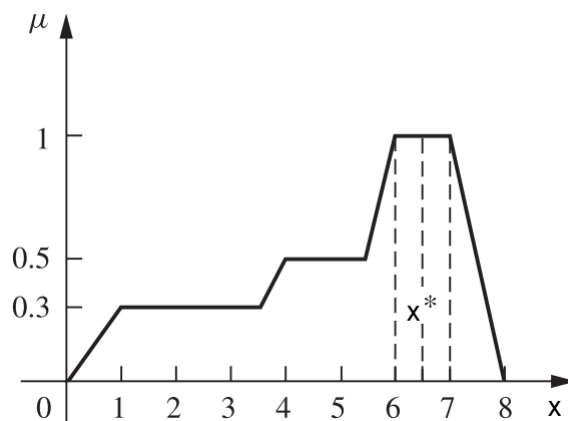
- Metoda posledního (maximálního) maxima (anglicky Last of Maximum) získá reálné číslo z nejvyšší hodnoty maximálního stupně příslušnosti. Stejně jako u metody prvního maxima se nejdříve musí zjistit výška výsledné funkce příslušnosti.

$$x^* = \sup_{x \in X} \{x \in X : \mu_{C_k}(x) = h(C_k)\}$$

Obrázek 2.17: Metoda prvního  $x_1^*$  a posledního  $x_2^*$  maxima

- Metoda středu maxima (anglicky Middle of Maximum) získá reálné číslo z aritmetického průměru minimální a maximální hodnoty maximálního stupně příslušnosti.

$$x^* = \frac{a + b}{2}$$

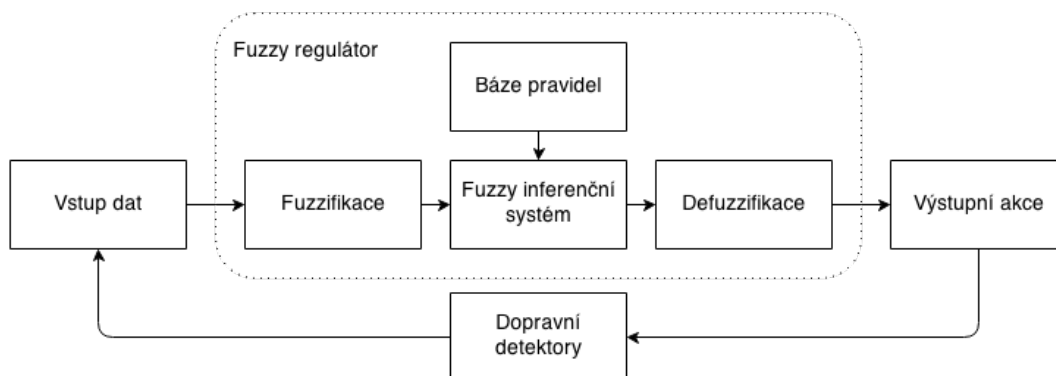


Obrázek 2.18: Metoda středu maxima

Každá metoda defuzzifikace vrací trochu odlišné výsledky. Výběr metody defuzzifikace závisí na konkrétním případě použití a jaké hodnoty jsou požadovány, aby fuzzy inferenční systém vrátil. Pokud by na ose  $x$  byla délka časového intervalu zeleného signálu v sekundách, potom výběrem defuzzifikační metody bude ovlivněna výsledná délka časového intervalu zeleného signálu pro stejnou dopravní situaci. Například pro metodu prvního maxima by byl čas 40 sekund, pro metodu posledního maxima by byla hodnota času 45 sekund.

## 2.9. Fuzzy regulátor

Na následujícím obrázku je zobrazena obecná struktura fuzzy regulátoru řízení křižovatky. Obecná struktura fuzzy regulátoru se skládá z jednotlivých bloků, které jsou vysvětleny v předchozích kapitolách.



Obrázek 2.19: Obecná struktura fuzzy regulátoru

### 3. Řízení křižovatky

V následujících kapitolách budou vysvětleny základní pojmy z řízení křižovatky. Simulovat dopravu je velmi obtížné, protože nejdůležitějším faktorem je jedinečné myšlení, zkušenosti a intuice řidiče jako člověka. Proto se dopravní situace i velmi obtížně předpovídají. Navíc, v reálném světě do dopravní situace vstupují další faktory jako počasí, stav vozovky a i neméně důležitá interakce s ostatními účastníky provozu.

Nejvíce užívanými nástroji v oblasti simulací dopravy jsou například PTV (Planung Transport Verkehr AG) Vissim (Verkehr In Städten - SIMulation-smodell), SIDRA, Paramics, HUTSIM (Helsinki University of Technology Simulator), CORSIM (CORridor SIMulation), MITSIM (Microscopic Traffic Simulator).

Tyto softwary umožňují dostatečně napodobit reálného řidiče, tak aby mohly být výsledky z modelů považovány za průkazné. Každý řidič (vozidlo) se nicméně chová stejně podle nastavených parametrů. Kvůli složitosti simulací se licence prodává za desítky tisíc až stovky tisíc korun. Jen výjimečně se nabízí zkušební verze.

#### 3.1. Normy pro křižovatky

Definování dopravní situace je velmi složité a je mnoho přístupů jak k dopravní situaci přistupovat. První rovnice, které byly navrženy (například Greenshielův lineární model, Greenbergův logaritmický model) nejsou v současnosti použitelné, zejména kvůli rapidnímu nárůstu počtu vozidel, zvýšení průměrné rychlosti vozidel, ale také kvůli zlovyku nadměrného používání osobních automobilů.

Jedny z nejnovějších přístupů jsou shrnuty v publikaci Highway Capacity Manual, ať už z roku 2000, či 2010. Z této publikace (HCM2010) vychází většina simulačních softwaru, ale i metodik jednotlivých států.

V České republice se řízení křižovatek (okružní, úrovňové, mimoúrovňové) řídí podle České technické normy ČSN 73 6102 a podle technických podmínek TP 235. Ve Slovenské republice platí Slovenská technická norma STN 73 6102. Obě tyto normy jsou si velmi podobné a navzájem spolu korespondují. Liší se jen v detailech, které jsou charakteristické pro každou zemi.

Obě tyto normy se inspirovaly v Německých normách od asociace FSGV (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen), která vydává German highway capacity manual (HBS) a je podobně zaměřený jako americký HCM.

Oba tyto „manuály“ slouží k řešení návrhů (jak technických tak teoretických) nejrůznějších křižovatek, sjezdů, tunelů a všeho, co souvisí s dopravou. Popisují jakým způsobem se počítají charakteristiky silnic a dalších silničních prvku (tunelů, křižovatek, sjezdů). Každý stát si ovšem přizpůsobí minimálně konstanty pro časy či vzdálenosti (minimální vzdálenost pro sjezd z dálnice, minimální čas zeleného signálu). Jedná se o doporučující publikace, jakým způsobem by se měla navrhovat dopravní infrastruktura.

### 3.2. Charakteristiky dopravní situace

Pro výpočty dopravních situací, například kapacity křižovatky, vyklizovacího času, úroveň kvality dopravy, saturace dopravy, je mnoho přístupů. V této podkapitole budou přiblíženy jen ty nejzákladnější principy, které platí jak v České republice, tak na Slovensku (Křivda, 2013). Většinou se jedná o modifikaci nebo přímo o definici podle Webstera, který v roce 1958 v článku „Traffic signal settings” popsal základní rovnice pro dopravní situace.

Mezičas je čas od začátku žlutého signálu po začátek zeleného signálu v kolizním směru. Jedná se o čas potřebný k opuštění křižovatky v době, kdy vozidlo, které přijíždí ke křižovatce a skončí doba zeleného signálu, již nestihne zastavit před příčnou souvislou čarou. Je to jediná výjimka, kdy je možné vjet do křižovatky i na žlutý signál. Doba se počítá z velikosti křižovatky, ale obvykle se pohybuje mezi třemi a čtyřmi sekundami (minimální časy podle vyhlášky). Mezičas se určuje kvůli kolizní ploše, kdy se střetávají dva směry. Naopak červeno-žlutý signál (který následuje po červeném signálu) má minimální dobu dvě sekundy. Zelený signál má minimální dobu pěti sekund. Maximální délka časového intervalu jedné fáze (všechny cykly dohromady) by neměla překročit 120 sekund.

Fáze, nebo cyklus je označení pro stavy na semaforu. Jedná se o červený signál, žlutý signál a zelený signál. Pro nastavení semaforu jsou důležité časy červeného a zeleného signálu v rámci jedné fáze (cyklu). Délka časového intervalu jedné fáze (stavy červená, červeno-žlutá, zelená, žlutá, červená) trvá obvykle 60 či 120 sekund, ale je možné jí nastavit libovolně. Změnou fáze se rozumí stav, kdy na jednom semaforu proběhnou popořadě všechny stavy a aktivuje se další semafor.

Saturovaný tok je maximální počet vozidel, které teoreticky mohou projet stop čarou. Vyjadřuje se v jednotkových vozidlech za hodinu (jv/h). Je závislý pouze na šířce jízdního pruhu. Jeho hodnota je 1800, nebo 1900 jv/h pro dobrý povrch vozovky.

Tok je definován jako počet vozidel, která projela daným místem za určitou dobu,  $q = \frac{N}{t}$ . Pokud je vyjádřeno  $t$  jako součet jednotlivých časových intervalu mezi jednotlivými vozidly ( $t = \sum_{i=1}^N h_i$ ) a je zavedena veličina průměrného časového intervalu mezi jednotlivými po sobě jdoucími vozidly  $\bar{h} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i$ , potom tok lze vyjádřit jako  $q = \bar{h}^{-1}$ .

Kapacita směru je poměr saturovaného toku ( $s$  [počet vozidel za hodinu]), délky časového intervalu cyklu ( $C$ ) a doby efektivního časového intervalu zeleného signálu  $c$

$$c = s \frac{z'}{C},$$

kde  $z' = \text{délka zeleného signálu } (z) + \text{jedna sekunda}$ .

Průměrná délka fronty pro každý cyklus je dána jako  $Q = \frac{I}{C - z'}$ , kde  $I$  je intenzita provozu [počet vozidel za hodinu].

Střední doba zdržení na vjezdu do křižovatky je dána pomocí intenzity, saturovaného toku, délky časového intervalu cyklu, doby časového intervalu zeleného signálu.

$$t_w = 0,9 \left( \frac{(C - z)^2 s}{2C(S - I)} + \frac{x^2 3600}{2I(1 - x)} \right), \text{ kde } x = \frac{IC}{Sz}$$

Úroveň kvality dopravy je dána z výpočtu střední doby zdržení (Tabulka 3.1). Intenzita dopravy je tok v jednotlivých pruzích a hustota dopravy je počet aut v pruhu na jednotku délky silnice.

Označení	Char. kvality dopravy	Střední doba zdržení [s]
A	Velmi dobrá	$\leq 20$
B	Dobrá	$\leq 35$
C	Uspokojivá	$\leq 50$
D	Dostatečná	$\leq 70$
E	Nestabilní	$\leq 100$
F	Nevyhovující	$> 100$

Tabulka 3.1: Úroveň kvality dopravy

### 3.3. Senzory pro detekci vozidel

Aby se řízení neopíralo jen o teoretické podklady, je potřeba rozmístit sady senzorů pro detekci vozidel. Existují jak dotykové, tak bezdotykové senzory, které mohou snímat nejrůznější parametry dopravy. Dotykové senzory se umísťují do povrchu vozovky. Mezi nejběžnější sensorové systémy patří detekce pomocí optických kabelů, tenzometrů, piezoelektrického snímače a indukční smyčky. Hlavní nevýhodou těchto systémů je nutnost rozrušení povrchu vozovky. Mezi bezdotykové senzory se řadí video senzory, infračervené brány, laserové či radarové senzory, satelitní sledování pomocí GPS (Global Positioning System), zvukové či ultrazvukové senzory, snímání pomocí RFID (Radio-frequency identification) technologie.(Ni)

Senzory umístěné okolo sledované křižovatky jsou od firmy Xtralis, konkrétně jde o model ASIM Dual-tech Detector DT 351. Detektor obsahuje Dopplerův radar a pasivní infračervené čidlo, které získávají informace o rychlosti, délce a času průjezdu vozidla. Podrobnější popis metod měření a technologií není předmětem řešení práce.

## Reference

- ATHOL, P. 1965. Interdependence of Certain Operational Characteristics Within a Moving Traffic Stream. Highway Research Record. s. 58-87
- BĚHOUNEK, Libor, 2012. Jak je důležité být fuzzy [online]. [cit. 2014-07-21] Dostupný z: <http://www.100vedcu.cz/doc/01-Behounek-Fuzzy.pdf>
- KLINGENBERG, Bryan. History and Objections. RIBEIRO, Paulo. F. Getting Started with Fuzzy Logic [online]. [cit. 2014-07-21]. Dostupný z: <https://www.calvin.edu/~pribeiro/othrlinks/Fuzzy/history.htm>
- KLINKHACHOM, Powsiri, 2004. History of Fuzzy Logic [online]. [cit. 2014-07-21] Dostupný z: <http://www.csee.wvu.edu/classes/cpe521/presentations/Intro.pdf>
- JURA, Pavel. Základy fuzzy logiky pro řízení a modelování. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Nakladatelství VUTIUUM, 2003, 132 s. ISBN 80-214-2261-0
- KŘIVDA, Vladislav a Václav ŠKVAIN. Městské komunikace a křižovatky [online]. 2011-2013 [cit. 2014-07-29]. Dostupné z: <http://kds.vsb.cz/mkk/>
- MAMDANI, E.H. a S. ASSILIAN. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. International Journal of Man-Machine Studies. 1975 DOI: 10.1016/S0020-7373(75)80002-2. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0020737375800022>
- NI, Daiheng. Traffic Sensing Technologies [online]. s. 14–29 [cit. 2014-08-15]. Dostupný z: <http://people.umass.edu/ndh/TFT/Ch01 Sensor.pdf>
- ROSS, Timothy J. Fuzzy logic with engineering applications. 3rd ed. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2010, 585 s. ISBN 978-0-470-74376-8.
- STOTSKO, Zinoviy, Yevhen FORMALCHYK a Ihor MOHYLA, 2013. Simulation of signalized intersection functioning with fuzzy control algorithm. Transport Problems [online]. roč. 8, č. 1, s. 5–16 [cit. 2014-07-18]. Dostupný z: [http://transportproblems.polsl.pl/pl/Archiwum/2013/zeszyt1/2013t8z1\\_01.pdf](http://transportproblems.polsl.pl/pl/Archiwum/2013/zeszyt1/2013t8z1_01.pdf)
- ŠEDA, Martin. Aplikace fuzzy logiky při hodnocení dodavatelů firmy. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta podnikatelská, 2013. 96 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Petr Dostál, CSc.
- ZADEH, Lotfi Asker, 2002a. Probability theory and fuzzy logic [online]. s. 5 [cit. 2014-07-22]. Dostupný z: <http://www.ieeesmc.org/announcements/Newsletter/JAN2003/Probability Theory and Fuzzy Logic.pdf>
- ZADEH, Lotfi Asker, 2002b. Toward a perception-based theory of probabilistic reasoning with imprecise probabilities. Journal of Statistical Planning and Inference [online]. s. 233–264 [cit. 2014-07-22]. ISSN 03783758. Dostupný z: doi:10.1016/S0378-3758(01)00212-9

---

## Část II.

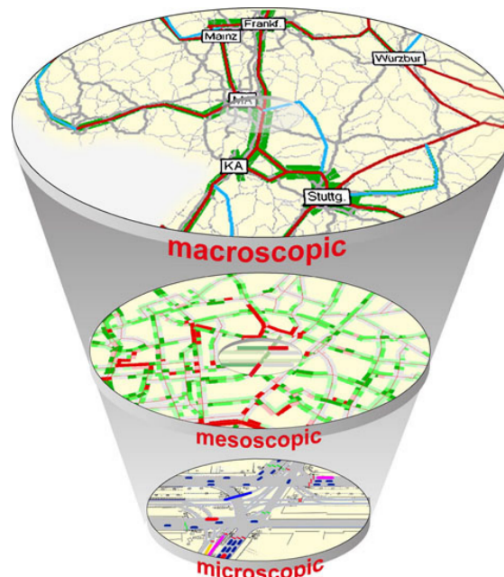
# Rešerše

Tato část se věnuje modelům a studiím, které se zabývají problematikou řízení jedné křižovatky pomocí fuzzy logiky. Modely a studie jsou řazeny od nejstarších k novějším modelům řízení křižovatek. Hlavním cílem všech studií a modelů je snížení čekací doby projetí vozidel křižovatkou. Tím se zvýší průjezdová kapacita křižovatky, zvýší se plynulost provozu a v neposlední řadě se sníží stres řidičů. Zvýšení kapacity křižovatky, až k teoretické úrovni, přispívá také k celkovému odlehčení dopravy ve městě. Průjezd městem se tak v ideálním případě až o třetinu zrychlí a sníží se doba, kdy vozidla stojí před křižovatkou se zapnutými motory, čímž se omezí zvyšující se znečištění a teplota ovzduší.



## 4. Model FUSICO

FUSICO (Fuzzy Signal Control) byl projekt v období 1996 až 1998, který vznikl na Technické Univerzitě v Helsinkách, Finsko a byl zpracován jako disertační práce Jarkka Nittymäkiho (FUSICO, 2006). Měl za cíl prozkoumat účinnost fuzzy řízení na jedné křižovatce a vytvoření fuzzy regulátoru (hardwaru), který by řídil křižovatku. Pilotní systém byl umístěn ve městech Vantaa, Jämsä, Helsinky a Tampere. Fuzzy systém řízení křižovatky běžel na operačním systému Linux, aby byla zajištěna jeho stabilita a spolehlivost i při aplikacích v reálném čase. Cely projekt měl fungovat, nebo se alespoň přiblížit k podobnému chování, jako kdyby uprostřed křižovatky stál policista, který pouští jednotlivé směry podle svého nejlepšího uvážení. Například v případě, kdy se začíná tvořit kolona v jednom směru, je tento směr upřednostněn před ostatními, ale přitom je zabezpečen i průjezd v ostatních směrech. Tato rozhodnutí jsou obsažena v tzv. bázi pravidel. Fuzzy logika v projektu FUSICO pracuje v základním režimu s prodlužováním zeleného cyklu. Další režimy jsou například změny pořadí průběhu fází, priorita hromadné dopravy, priorita těžké dopravy, priorita chodců nebo adaptivní chování podle počasí. Vstupní data nemohou být vždy přímo změřena, např. délka fronty nebo počet přijíždějících vozidel. Proto FUSICO získává tyto data z mikroskopického (jedna izolovaná křižovatka) modelování dopravní situace pro jednu křižovatku v reálném čase. Dalšími měřítky jsou mezoskopické a makroskopické modelování (viz Obrázek 4.1). V roce 2007, irský investor RSM Ltd. (Road Safety Management), koupil práva na duševní vlastnictví základní verze FUSICO. Projekt je dále komerčně vyvíjen irskou společností, která FUSICO představila na exhibici Intertraffic v roce 2010 (Aalto University, 2014).



Obrázek 4.1: Měřítko modelování dopravní situace (PTV America, 2006)

Model křižovatky byl vytvořen v simulačním prostředí programu HUTSIM, který byl stejně jako FUSICO vyvinut na Technické Univerzitě v Helsinkách. Program byl vyvíjen od roku 1989. První komerční verze vyšla v roce 1993

a poslední v roce 1996. Pro systém Microsoft Windows vyšel v roce 1997, přičemž tehdy bylo zastoupení počítačů s MS Windows necelých 70 % v poměru 48 % Windows 3.x a 48 % Windows 95 (Polsson, 2014). Jedna plná licence nejnovější verze stála 2500 liber (kurz byl mezi 45 až 55 Kč za 1 libru (Kurzy.cz, 2014)). Hlavní vývojáři systému HUTSIM byli prof. Matti Pursula, M.Sc. Kari Sane, Lic. Tech. Iisakki Kosonen, M. Sc. Matti Kokkinen, M. Sc. Jarkko Niittymäki, Ph.D. (Smartest, 1997). V roce 2001 byl tento systém oceněn jako práce roku ve stavebnictví, byl základem 20 magisterských prací, 2 doktorských prací a byl objektem zájmu nespočtu publikací. Mezi další projekty, kde byl využit systém HUTSIM se řadí například Prompt - Priority and Informatics for Public Transport, SOS-II - Self Optimising Signal Control, GUTS - General Urban Traffic Simulator, TPMA - Traffic Performance on Major Arterials, FUSICO - Fuzzy Signal Control, INCOME - Integration of signal Control with other Measures (Bargiela, 1997).

## 5. Model FLMuSiC

Turecká Univerzita Pamukkale v Denizli, konkrétně stavební fakulta, ve spolupráci s Istantbulskou technickou univerzitou vytvořili fuzzy model pojmenovaný FLMuSiC (Fuzzy Logic Multi-phased Signal Control) (Murat, 2005). Model se skládá ze dvou fuzzy sub-systémů. Prvním ze sub-systémů vyhodnocuje délku časového intervalu zeleného signálu na semaforu (fuzzy regulátor signálního času), druhý sub-systém se zaměřuje na sestavení ideální posloupnosti fází na jednotlivých semaforech (fuzzy regulátor fází). Stejně jako u všech modelů, které pracují v reálném čase, i tento potřebuje mít v okolí křižovatky senzory, které počítají počty vozidel, aby následně mohl přizpůsobovat délku časového intervalu zeleného signálu. S příchodem fuzzy logiky se odstranila neefektivnost při návrzích změn fází semaforu a tento model toho plně využívá. Oba sub-systémy pracují s Mamdani inferenčním systémem (viz kapitola 2.7 na straně 23).

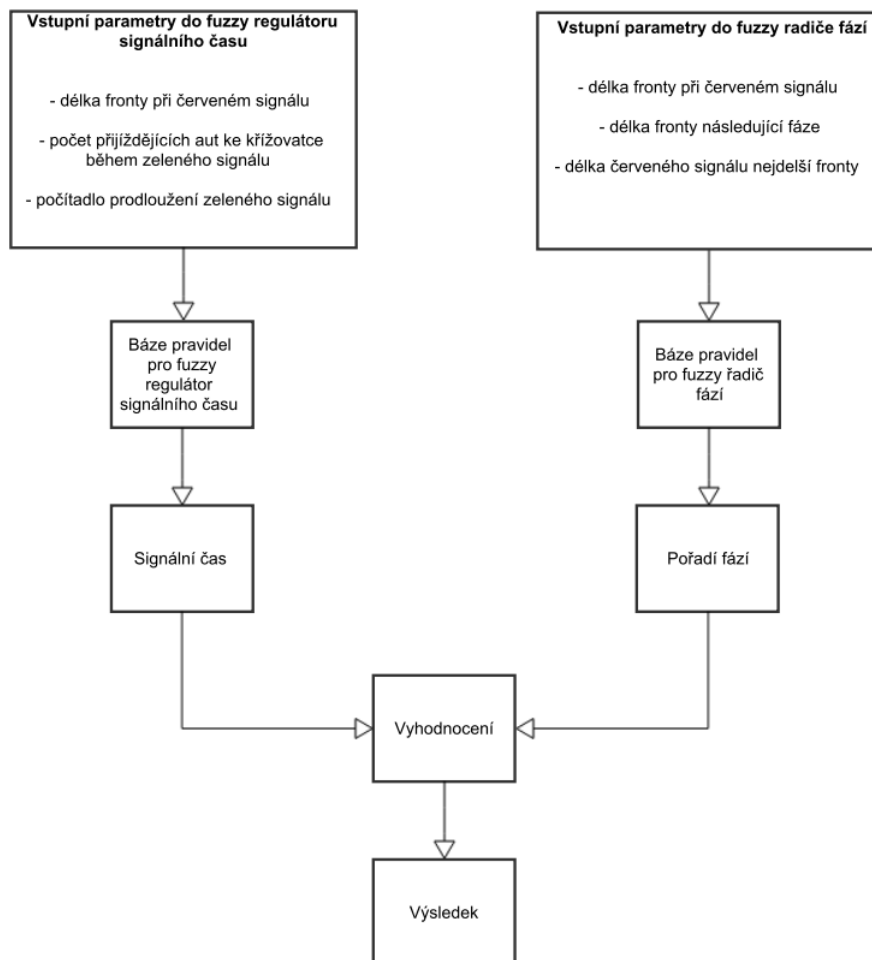
Hlavním cílem tohoto projektu bylo dosáhnout snížení čekací doby vozidel a zvýšení kapacity křižovatky pomocí fuzzy řízení křižovatky. Byl to jeden z prvních projektů, který se zabýval i změnami fází (viz kapitola 3.2 na straně 29), dřívější studie pracovali pouze s prodloužováním doby zelené na semaforu. Vytvoření správné posloupnosti fází a jejich optimalizace, je stejně důležitá, jako správné navrzení signálního času semaforu.

Vstupem do prvního sub-systému (fuzzy regulátor signálního času) jsou parametry: a) délka fronty, která se vytvořila na červený signál, b) počet přijíždějících aut ke křižovatce během zeleného signálu a c) počítadlo prodloužení zeleného signálu (jaký počet zbývá do maximální délky časového intervalu zeleného signálu, který je prodloužována na základě předchozích dvou ukazatelů). Vstupem do druhého sub-systému (fuzzy regulátor fází) jsou parametry: a) délka fronty, která se vytvořila na červený signál, b) délka fronty následující fáze (délka fronty je známá pro všechny směry), c) délka časového intervalu červeného signálu nejdelší fronty. Jako nejdůležitější parametr pro celý systém FLMuSiC je délka fronty která se vytvořila na červený signál. Tento parametr vstupuje do obou sub-systémů. Pro první sub-systém (fuzzy regulátor signálního času) je rozhodujícím parametrem počítadlo prodloužení zeleného signálu, pokud předchozí dva parametry nedokáží rozhodnout, jestli prodloužit, či neprodloužit délku časového intervalu zeleného signálu. Pro druhý sub-systém (fuzzy regulátor fází) je opět rozhodujícím parametrem délka časového intervalu červeného signálu nejdelší fronty. Struktura fuzzy modelu systému FLMuSiC je zobrazena na obrázku 5.1.

Ze schématu vyplývá, že se jednotlivé parametry fuzzifikují, projdou přes báze pravidel (každý sub-systém FLMuSiC má vlastní), následně se defuzzifikují (funkcí středu těžiště) a zhodnotí se, jestli se bude dál prodloužovat zelená, či se změní fáze. Výsledná báze pravidel se skládá ze základních 64 pravidel (z toho 37 pro změnu fází). Přidáváním dalších pravidel se může upravovat výsledná účinnost celého modelu.

Simulace dopravou řízeného modelu, oproti simulacím s pevným signálním plánem, využívá principu rozšíření signálního času. V tomto modelu se porovnává, jestli i po minimálním osmi sekundovém intervalu zeleného signálu, stále

ke křižovatce přijíždí další vozidla. Jestli tomu tak je, dále se zjišťuje, zda-li se v ostatních směrech nevytvořila delší kolona než pěti aut, které čekají při červeném signálu. Pokud je tato podmínka opět splněna, prodlouží se doba zeleného signálu o další 4 sekundy. Zelený signál se prodlužuje tak dlouho, dokud jsou splněny předešlé podmínky a dokud není dosažena maximální doba zeleného signálu. V této simulaci byla maximální hodnota nastavena na čtyřicet sekund. Hodnoty jednotlivých signálních časů se určují na konkrétní křižovatce. Výsledky této simulace byli porovnávány s modelem FUSICO, který navrhoval a prakticky zkoušel Jarkko Niittymäki, Ph.D. v roce 1999 ve Finsku a Polsku, a který měl jako jediný do roku 2005 výsledky ověřené v praxi. Výsledky obou modelů jak FLMuSiC, tak FUSICO jsou téměř srovnatelné a oba modely dokázaly 10% až 20% snížení čekací doby vozidel oproti modelu SIDRA od společnosti Akcelik & Associates Pty Ltd, kterou vede Rahmi Akcelik. Ta od roku 1999 vyvíjí program SIDRA, který dokáže simulovat řízení jedné i více křižovatek pomocí pevně daného signálního času, či řízení křižovatky na základě dopravní situace.



Obrázek 5.1: Struktura FLMuSiC modelu

## 6. Model FLA

FLA (Fuzzy logic with Abnormalities) je model od Jinhaia Caia a Madhavana Balana Naira z Queenslandské univerzity v Brisbane, Australie (Nair, 2007). Tato studie se zaměřuje na vylepšení klasických fuzzy regulátorů křižovatek (FLN - Fuzzy Logic Model s normálním provozem), které nepředpokládají žádné komplikace v křižovatce. Tyto „abnormality” se snaží nasimulovat pomocí dalšího parametru, tzv. průměrné doby opuštění křižovatky. V modelech jako FUSICO, či FLMuSiC není zohledněn vstup žádných komplikací jako jsou například nehody, výmoly, opravy povrchu. Na tyto krátkodobé až střednědobé situace dokáže běžně navržený fuzzy regulátor, který reguluje dobu zeleného signálu a vybírá vhodnou fázi, poměrně slušně reagovat sám bez vážnějších problémů. Ale pokud na tyto nenadálé situace bude fuzzy regulátor připraven, bude čekací doba opět o trochu nižší a i při výskytu překážky dokáže udržet plynulost provozu. Pro simulaci tohoto modelu byl využit program Mathworks MATLAB (matrix laboratory) s nadstavbou Fuzzy Logic Toolbox.

Základní model využívá již klasických parametrů jako jsou: délka fronty při červeném signálu, zbývající čas do maximální doby zeleného signálu a příjezd vozidel během zeleného signálu. Tyto parametry zaručují vysokou průjezdnost křižovatkou s minimální čekací dobou. To platí pouze při ideálních podmínkách, které simulace nabízejí. Pokud by ovšem do simulace zasáhla například nehoda vozidel, špatný povrch vozovky, nebo dočasné omezení, které mají významný vliv na plynulost dopravy, začnou se čekací doby a délky front prodlužovat. Poté parametr délky fronty v jednotlivých směrech začne být do jisté míry nepodstatný. Respektive, i když bude využita maximální doba zeleného signálu, fronta se o moc nezmenší, a to z důvodu neprůjezdnosti křižovatky. Tím se stává prodlužování zeleného signálu neefektivním a může zbytečně zdržovat ostatní směry, které mohou mít volnější průjezd. Díky kratším intervalům zeleného signálu se zabrání tvoření kolon v odjezdových ramenech křižovatky, které mohou být příčinou delší odjezdové doby z křižovatky.

Základní tři parametry (délka fronty při červeném signálu, zbývající čas do maximální doby zeleného signálu a příjezd vozidel během zeleného signálu) jsou rozšířeny o čtvrtý parametr průměrné doby opuštění křižovatky. Tento parametr je definován vzorcem

$$AGDT(n) = \alpha(CDT) + (1 - \alpha) \times AGTD(n - 1),$$

kde  $AGTD$  (Average Green Discharge Time) je průměrná doba opuštění křižovatky,  $\alpha$  je koeficient plynulosti (v této studii je hodnota nastavena na 0.8 kvůli rychlému přizpůsobení i na malé odchylky v časech opuštění křižovatky),  $CDT$  (Current Discharge Time) je čas opuštění křižovatky v konkrétním cyklu zeleného signálu a  $AGTD(n - 1)$  je hodnota předchozí průměrné doby opuštění křižovatky. Zavedením parametru  $AGTD$  se délka časového intervalu zeleného signálu nemusí jen prodlužovat, ale i zkracovat až na hodnotu minimální délky časového intervalu zeleného signálu. Čtvrtý parametr by se dal označit jako ukazatel výhodnosti prodlužování délky časového intervalu zeleného signálu.

Simulace proběhla v programu MATLAB a výsledky byly porovnávány s klasickým fuzzy regulátorem křižovatky (bez čtvrtého parametru  $AGTD$ ) a s dy-

namickým řízením křižovatky na základě dopravní situace (vehicle-actuated, VA). V následujících dvou tabulkách je vidět, že za jakýchkoli podmínek má dynamické řízení křižovatky na základě dopravní situace (VA) o 30 % větší zpoždění, než u fuzzy řízení křižovatky (FLN). V tabulce 6.1 je viditelná shoda obou systémů (FLA a FLN), pokud se v křižovatce nevyskytnou nenadálé události. Pokud ovšem vznikne nenadálá situace v jednom směru (Tabulka 6.2), potom se lépe chová FLA než FLN. Zvýšení čekací doby v ostatních směrech je dáno tím, že se díky překážce v jednom směru vytvořila delší fronta v ostatních směrech a tím dostaly tyto směry větší prioritu a i delší zelený signální čas.

	Průměrné zpoždění [sekundy]		
	FLA	FLN	VA
Fáze 1	22	21	35
Fáze 2	18	18	30
Fáze 3	20	20	33
Fáze 4	20	20	33

Tabulka 6.1: Průměrné zpoždění bez překážek

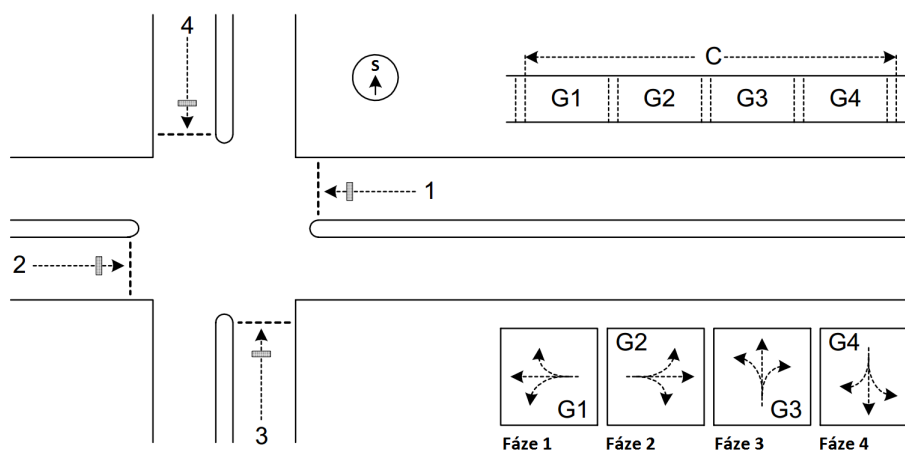
	Průměrné zpoždění [sekundy]		
	FLA	FLN	VA
Fáze 1	32	30	51
Fáze 2	19	25	32
Fáze 3	20	23	33
Fáze 4	20	23	33

Tabulka 6.2: Průměrné zpoždění s překážkami

## 7. Studie využití fuzzy řízení v Istanbulu

Mikroskopický model řízení jedné křižovatky v Istanbulu se zabýval prof. Akbas, tehdy ještě na univerzitě Marama v Istanbulu, Turecko (Akbas,2003). Ve studii se zaměřili na zásadní křižovatkou, která má vliv na celkovou dopravu v oblasti. Na této křižovatce je velmi rozdílný průběh dopravy v rámci jednoho dne. Řízení křižovatky pomocí pevného signálního času by zde znamenalo každodenní zácpy a naprosté zablokování dopravy. Podobně neúčinné byly i varianty, kdy je naprogramováno až několik desítek různých plánů, pro různé časové rozmezí napříč celým dnem. Výkonost a efektivnost pevného signálního plánu je i z pohledu dynamického řízení křižovatky velmi malá.

Čtyř ramenná křižovatka se čtyřmi fázemi signálního cyklu je znázorněná na obrázku 7.1. Signální plán je nastaven tak, že v každé fázi má zelený signál jen jeden směr a v tomto směru lze odbočit vlevo, odbočit vpravo, nebo projet křižovatkou rovně. Požadavek na průjezdnost každého směru je větší než průjezdnost levého či pravého odbočení. Z tohoto důvodu jsou fáze vypočítány z míry nasycení přímého směru, a proto mohou být detektory umístěny uprostřed jízdních pruhů.

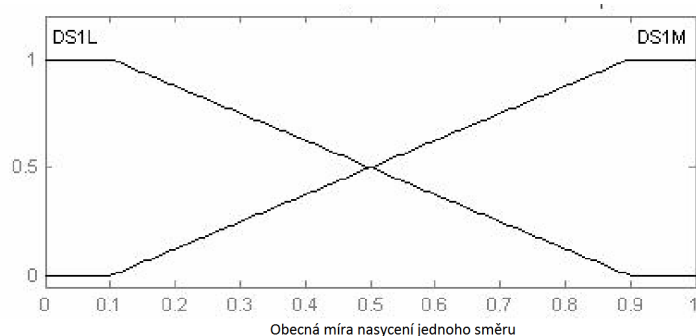


Obrázek 7.1: Schéma křižovatky se signálním plánem

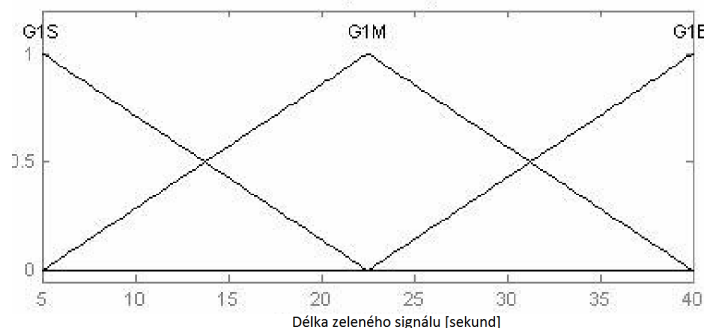
Vstupním parametrem do fuzzy regulátoru je průměrný stupeň nasycenosti směru, jenž je vypočítáván z počtu vozidel a doby zdržení vozidla v křižovatce. Hodnoty jsou získávány detektory v okolí křižovatky. Výstupem z fuzzy regulátoru jsou časy zeleného signálu pro čtyři fáze. Na konci každého cyklu (index  $k$ ), po vykonání G1 až G4, se vypočítává obecná míra nasycení pro celou křižovatkou  $DS$ .  $DS_i(k) = \frac{\sum_{j=1}^{N_i(k)} o_j}{G_i(k)}$ , kde  $i$  je jedna ze čtyř fází ( $i= 1, 2, 3, 4$ ),  $G_i(k)$  je délka časového intervalu fáze v cyklu  $k$ ,  $N_i(k)$  je počet aut, které projeli skrze detektor v rámci zeleného signálního času,  $j$  představuje číslo auta,  $o_j$  je doba zdržení konkrétního vozidla v křižovatce a  $DS_i(k)$  je průměrná míra nasycení pro jednotlivé fáze  $i$  v cyklu  $k$  a hodnoty se pohybují od  $[0,1]$ . Z rovnice také zároveň vyplývá, že průměrná míra saturace je vypočítávána jako součet čekací doby vozidel při zeleném signálu. Tím průměrná míra saturace odpovídá aktuálním podmínkám, které panují v křižovatce. Před dalším cyklem  $k$

je již předpřipravený čas zeleného signálu pro každou fázi. Tím signální plán koresponduje s aktuálním vývojem v křižovatce.

Funkce fuzzy regulátoru je v této studii taková, že rozhoduje o délce zeleného signálu pro další cyklus. Fuzzy regulátor pracuje na principu Mamdani inferenčního systému a defuzzifikace probíhá pomocí centroidu. Báze pravidel obsahuje šestnáct pravidel, které kombinují čtyři vstupní hodnoty  $DS_1$  až  $DS_4$  (Obrázek 7.2) a čtyři výstupní hodnoty  $G_1$  až  $G_4$  (Obrázek 7.3). Výstupními hodnotami jsou časy zeleného signálu pro jednotlivé směry a v této studii je minimální doba zeleného signálu nastavena na pět sekund a maximální na čtyřicet sekund.



Obrázek 7.2: Funkce příslušnosti vstupních hodnot DS



Obrázek 7.3: Funkce příslušnosti výstupních hodnot G

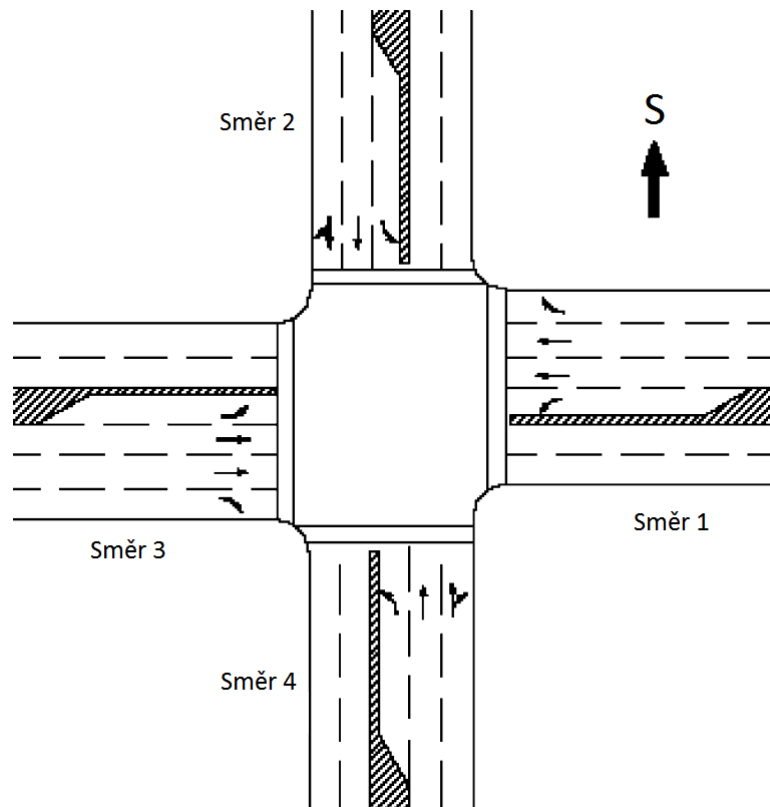
K simulaci tohoto řešení bylo využito simulačního programu PTV Vissim. Byly prováděny dvě simulace. První byla simulace s pevnými signálními časy a druhá simulace byla pomocí fuzzy regulátoru. Nastavení simulovaného prostředí bylo pro obě simulace totožné. Výsledkem bylo o 26 % zkrácení čekací doby (z průměrných 189,7 sekund na 139,2 sekundy) a o 40 % snížení počtu zastávek jednoho vozidla (z 6,46 na 3,83 zastávek) oproti řízení s pevnými signálními časy.



## 8. Model NFM

Nový Fuzzy Model (NFM) a řízení jedné křižovatky v dopravní síti byl vyvinut na Mashhadské Univerzitě v Íránu (Azimirad, 2010). Ve studii bylo navrženo pro vyřešení problému s řízením jedné křižovatky využít rovnice stavového prostoru ve zjednodušeném matematickém modelu, který vede k lepším návrhům signálního řadiče.

Pro čtyř ramennou křižovatku (Obrázek 8.1) platí, že fáze jedna znamená zelený signál pro směr jedna a tři, pro fázi dvě je zelený signál pro směr dva a čtyři.



Obrázek 8.1: Schéma křižovatky

Důležitým parametrem je výpočet délky fronty  $Q$  a je definován jako

$$Q_i(n+1) = Q_i(n) + q_i(n) - d_i(n)S_i(n),$$

kde  $i = 1, 2, \dots, M$  je index směru,  $n = 0, 1, \dots, N - 1$  je diskretní časový úsek,  $Q_i(n)$  je počet vozidel ve frontě v  $i$ -tém směru v  $n$ -tém časovém úseku,  $q_i(n)$  je počet nově přijíždějících vozidel do fronty ve směru  $i$  v  $n$ -tém časovém úseku,  $d_i(n)$  je počet odjíždějících vozidel z fronty v  $i$ -tém směru v  $n$ -tém časovém úseku,  $S_i(n)$  je index, který říká, jestli ve směru  $i$  v  $n$ -tém časovém úseku je zelený signál ( $S_i(n) = 1$ ), nebo červený signál ( $S_i(n) = 0$ ). Pro zjednodušení matematického modelu jsou možné jen dvě kombinace  $S_1, S_2, S_3, S_4 = 0, 1, 0, 1$  nebo  $S_1, S_2, S_3, S_4 = 1, 0, 1, 0$ . Výpočtem délky fronty uvažující čas se získá průměrná čekací doba každého vozidla ve frontě. Pokud jsou časové intervaly

příjezdů vozidel do fronty ( $q_i(n)$ ) dostatečně krátké, potom můžeme uvažovat tento čas za konstantní ( $T$ ). Čas vozidla strávený ve frontě je následně definován jako

$$W_i(n+1) = W_i(n) + TQ_i(n) + \frac{1}{2}Tq_i(n) - \frac{1}{2}Td_i(n)S_i(n),$$

kde  $W_i(n)$  je průměrný čekací čas vozidla stráveného ve frontě od začátku cyklu do začátku dalšího  $n - \text{tého}$  intervalu. Obě tyto rovnice jsou obsaženy ve stavovém prostoru a popisují dynamický vývoj dopravního stavu v křižovatce. Následně počet vozidel a čekací doba jsou základními vlastnosti pro řízení křižovatky pomocí fuzzy regulátoru. Pokud čekací čas bude brán jako hlavní index poté cílová optimalizace matematického vzorce je  $\min \left\{ W(N) = \sum_{i=1}^M W_i(N) \right\}$ . Pro zjednodušení vyjádření lze cílovou optimalizaci a stavový prostor zapsat do matice

$$X(n+1) = AX(n) + B(n)S(n) + C(n),$$

$$y(n) = CX(n),$$

kde  $X(n) = [Q_1(n)Q_2(n)\dots Q_M(n)W_1(n)W_2(n)\dots W_M(n)]^T$  je stavová proměnná a  $S(n) = [S_1(n)S_2(n)\dots S_M(n)]^T$  je kontrolní proměnná. Náhodné koeficienty matic a vektoru jsou

$$A = \begin{bmatrix} I_M & 0 \\ TI_M & I_M \end{bmatrix},$$

$$B(n) = \begin{bmatrix} d_1(n) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & d_2(n) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & d_M(n) \\ \frac{1}{2}Td_1(n) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}Td_2(n) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{2}Td_M(n) \end{bmatrix},$$

$$C(n) = [ Tq_1(n) \quad Tq_2(n) \quad \dots \quad Tq_M(n) \quad \frac{1}{2}Tq_1(n) \quad \frac{1}{2}Tq_2(n) \quad \dots \quad \frac{1}{2}Tq_M(n) ]^T.$$

Vstupní proměnné do fuzzy regulace jsou  $d_i(n)$ ,  $q_i(n)$  a  $S_i(n)$ . Výstupní parametry jsou  $Q_i(n)$  pro  $i = 1, 2, 3, 4$  a jako stavové proměnné  $W_i(n)$ ,  $Q_i(n)$ , které slouží i jako vstup do fuzzy modelu. Dalším krokem je fuzzifikace vstupních, výstupních veličin ( $q_i(n)$ ,  $W_i(n)$  a  $Q_i(n)$ ) do třech fuzzy množin (nízký, střední, vysoký) a následně vytvoření báze pravidel v programu MATLAB. Výsledkem bylo celkem 81 pravidel. Počet vozidel, která opustí křižovatku v  $i$ -té frontě

v  $n$ -tém časovém úseku je vyjádřen rovnicí  $d_i(n) = \min\{Q_i(n) + q_i(n), d_{si}(n)\}$ , kde  $d_{si}(n)$  je hustota provozu ( $d_{si}(n) = d_{konst.}(n) + \beta q_i(n)$ , kde  $d_{konst.} \geq 50$  a  $\beta = [0, 1]$  (Stav dopravy v závislosti na odchylce je vypsán v tabulce 8.1)).

Stav dopravy	
Bez saturace	$\beta \geq 0,7$
Saturace	$0,4 \leq \beta \leq 0,6$
Super saturace	$0,1 \leq \beta \leq 0,3$
Nestabilní	$\beta = 0$

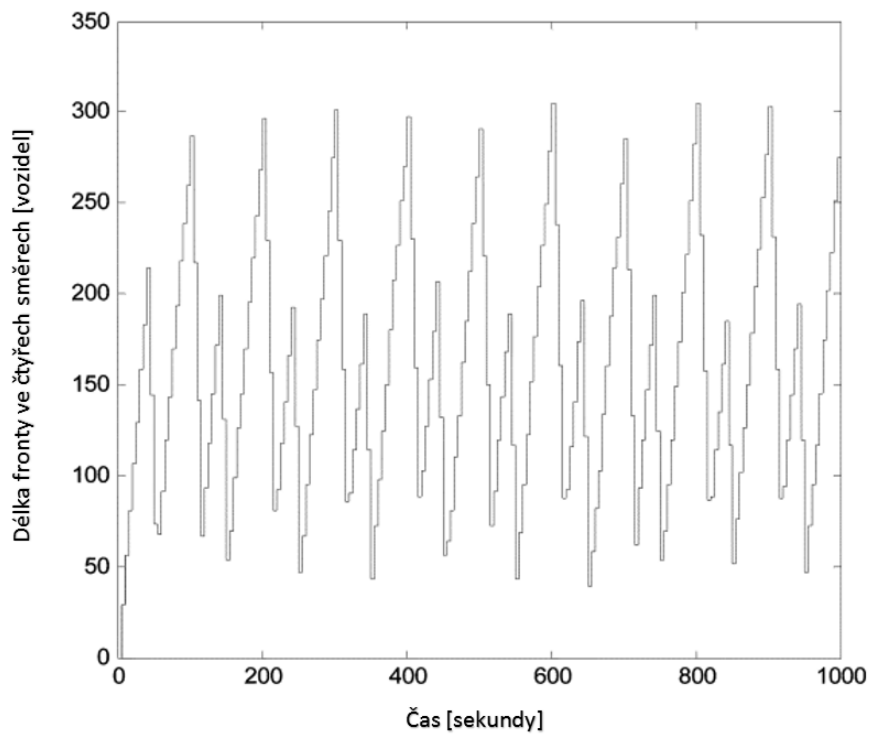
Tabulka 8.1: Stav dopravy v závislosti na odchylce  $\beta$

Pro řízení křižovatky pomocí pevného signálního plánu v simulaci pro první fázi platí, že zelený signál je dlouhý 140 sekund a červený 60 sekund a pro druhou fázi 140 sekund dlouhý červený signál a 60 sekund zelený signál.

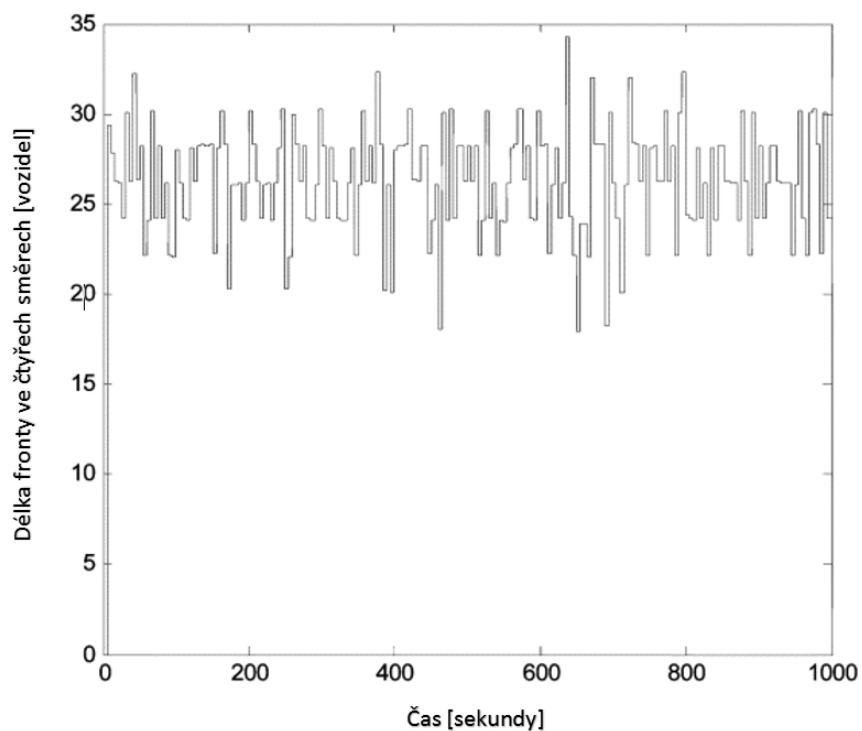
Hlavním cílem této studie bylo navrhnoutí fuzzy modelu a fuzzy regulátoru, který dokáže řídit jak provoz za normálních podmínek, tak při nečekané události. Výsledek časových rozdílů (Tabulka 8.2), výsledek délky fronty (Obrázek 8.2) pro řízení pomocí pevného signálního plánu a pro řízení pomocí fuzzy regulace (Obrázek 8.3).

Průměrný čekací čas [s]	Fronta 1	Fronta 2	Fronta 3	Fronta 4	Součet front
Pevný signální plán	11 000	5 000	11 000	5 000	32 000
Fuzzy regulace	1 350	1 335	1 300	1 313	5300
Procentní zlepšení	87,72	73,30	88,18	73,74	83,43

Tabulka 8.2: Porovnání výsledku průměrného čekacího času ve frontě



Obrázek 8.2: Délka fronty při řízení pomocí pevného signální plánu



Obrázek 8.3: Délka fronty při řízení pomocí fuzzy regulátoru

Z tabulky a obrázků je patrné výrazné procentuální zlepšení řízení křižovatky při použití fuzzy logiky. Z maximální délky fronty až 300 metrů (při pevném signálním plánu) na maximálních 35 metrů při řízení fuzzy regulátorem.

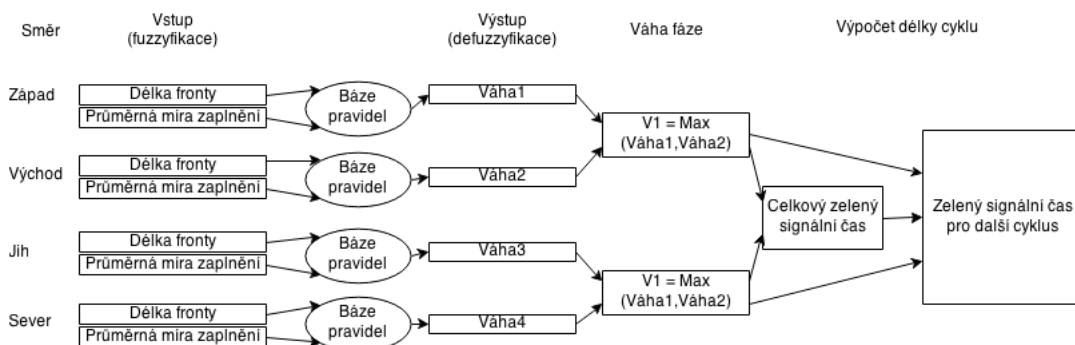
## 9. Model FLSC

Tento model byl vyvinut studentem Budi Yulianto na Newcastlešské Univerzitě a studie vychází z jeho dřívější práce, která byla oceněna Smeedovou cenou na 35. ročníku konference UTSG (Universities' Transport Study Group) konané na Loughboroughské Univerzitě (Yulianto, 2003). FLSC (Fuzzy Logic Signal Controller) model se snaží o simulaci čtyř ramenné křižovatky se smíšenou dopravou (hlavně s podílem motocyklů).

Vstupem do FLSC jsou data zaznamenávána pokročilou videotechnikou. Ta má oproti indukčním smyčkám velké výhody, například: je pokryto velké území, ve kterém lze detekovat vozidla (i v rámci jednotlivých pruhů). Získat lze přesnou délku mezery mezi vozidly, kde se v některých případech mohou skrýt motocykly a v neposlední řadě je výpočet aktuální délky fronty přímo v metrech. Tyto výhody, oproti indukčním smyčkám, jsou pro návrh kvalitní fuzzy regulace podstatné. Jako vstupní parametry byly vybrány maximální délka fronty v metrech a průměrná míra zaplněnosti směru. Průměrná míra zaplněnosti směru je procentní vyjádření, po jakou dobu je sledované místo (v této studii je to jeden metr od stop čáry) obsazeno alespoň jedním vozidlem. Výstupní hodnota je váha, která v rozmezí 0 až 100 ukazuje stupeň potřeby zeleného signálu pro daný směr. Na obrázku 9.1 je popsán proces výpočtu času zeleného signálu pro další cyklus. Výsledné váhy pro fázi jedna a fázi dvě slouží k výpočtu celkové doby zeleného signálu. Váhy fází a celkové doby zeleného signálu jsou vstupem pro výpočet délky časového intervalu zeleného signálu jednotlivých fází. Výpočet definuje jako

$$CČZ = \left( \sum W_n - Min_1 \right) \cdot \left[ \frac{Max_2 - Min_2}{Max_1 - Min_1} \right] + Min_2$$

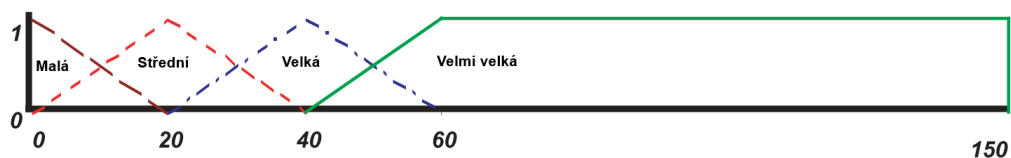
a výpočet délky časového intervalu zeleného signálu pro jednotlivé fáze je  $ČZSF_n = \frac{W_n \cdot CČZ}{\sum W_n}$ , kde  $\sum W_n$  je celková váha fáze  $n$ ,  $Min_1$  a  $Max_1$  jsou minimální a maximální hodnota celkové váhy,  $Min_2$  a  $Max_2$  jsou hodnoty minimální a maximální délky časového intervalu zeleného signálu v cyklu.



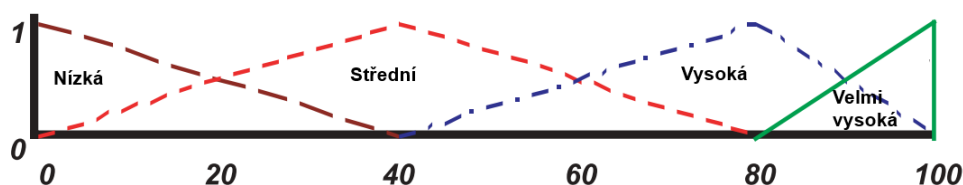
Obrázek 9.1: Schéma výpočtu času zeleného signálu

Pro fuzzyfikaci vstupních veličin byla použita Mamdaniho inferenční metoda, pro defuzzyfikaci je poté použita metoda středů součtů (Center of Sum). Jednotlivé funkce příslušností jsou zobrazeny na obrázcích 9.2, 9.3 a 9.4. Jednotlivé

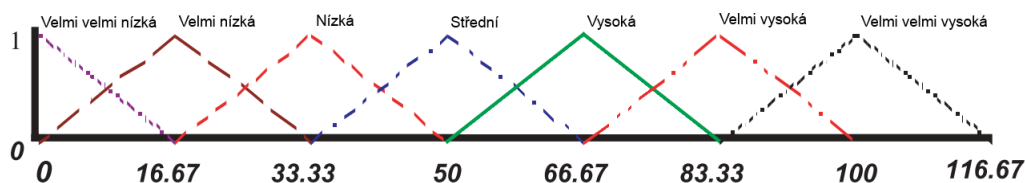
fuzzy množiny byly získány expertním pozorováním systému a byly průběžně nastavovány tak, aby výsledná efektivita byla co nejvyšší. Báze pravidel je sestavena ze šestnácti pravidel (Tabulka 9.1). Příklad klasického zápisu pravidla může být: JESTLIŽE Maximální délka fronty JE Velká A Průměrná míra obsazenosti JE Nízká POTOM Váha JE Střední.



Obrázek 9.2: Vstupní parametr do fuzzy regulátoru - Maximální délka fronty [metry]



Obrázek 9.3: Vstupní parametr do fuzzy regulátoru - Průměrná míra obsazenosti [%]



Obrázek 9.4: Výstupní parametr z fuzzy regulátoru - Váha

		Maximální délka fronty			
		Malá	Střední	Velká	Velmi velká
Průměrná míra obsazenosti	Nízká	Velmi velmi nízká	Nízká	Střední	Vysoká
	Střední	Velmi nízká	Nízká	Střední	Velmi vysoká
	Vysoká	Nízká	Střední	Vysoká	Velmi velmi vysoká
	Velmi vysoká	Střední	Vysoká	Velmi vysoká	Velmi velmi vysoká

Tabulka 9.1: Báze pravidel

K zjištění požadované efektivity FLSC byl využit simulační program PTV Vissim, který využívá k řízení křižovatky programovacího jazyka VAP (Vehicle Actuated Programming). Vissim je model založený na tom, že v jednom pruhu stojí za sebou jednotlivá vozidla. Může však nastat situace, kde v jednom pruhu

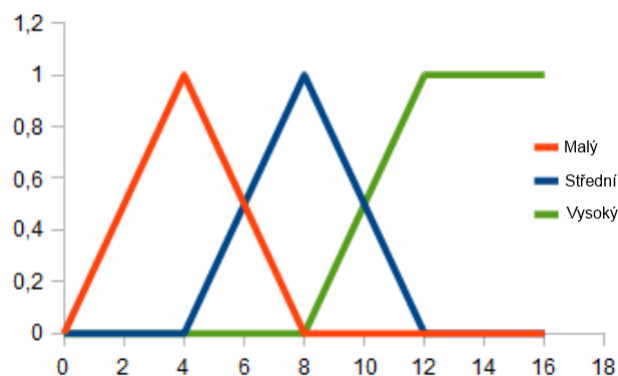
stojí vedle sebe více motocyklů. Proto bylo použito „balíčkového“ přístupu, kdy v jenom balíku jsou dva či čtyři motocykly.

Výsledkem je ověření, že FLSC pro různé scénáře vývoje dopravy je buď podobně účinný jako pevný signální plán (při velmi malé intenzitě dopravy a rozdílů kolem 1% zlepšení je na hranici přesnosti simulace), nebo o mnoho účinnější (při velmi dynamických změnách dopravní situace je zlepšení mezi 30 % až 40 % pro průměrný čas průjezdu křižovatkou a 20 % až 30 % zlepšení průměrného zpoždění vozidla). Tyto výsledky je možné dále vylepšit optimalizací funkcí příslušností pomocí genetických algoritmů.

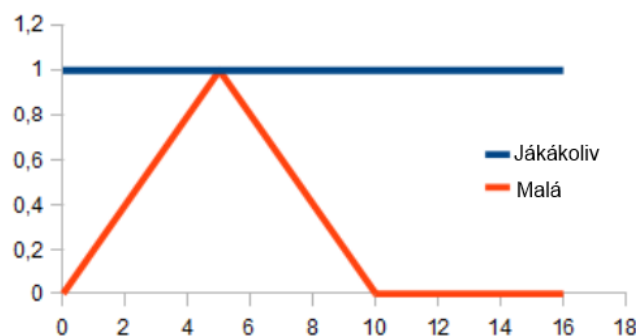
## 10. Fuzzy regulátor podle Dr. Marcina Stanieka

Řízením křižovatky se zabýval ve své studii i Dr. Marcin Staniek, který porovnával efektivitu fuzzy řízení s pevným signálním plánem a acyklickým módem (Staniek, 2012). Stejně jako většina novějších studií, i tato pro objektivní srovnání metod využívá simulační program PTV Vissim. Fuzzy systém využívá data, která jsou pořízena dopravními detektory. Tyto detektory jsou umístěné před vjezdem do křižovatky v určité vzdálenosti. Tím lze „předpovědět“ s šesti až osmi sekundovým předstihem (záleží na vzdálenosti detektoru a průměrné rychlosti vozidla), kolik vozidel přijíždí ke křižovatce. Základní úlohou fuzzy regulátoru pro řízení křižovatky je zahájení změny fáze na křižovatce a prodloužení doby zeleného signálu.

Vstupem do fuzzy regulátoru jsou počty vozidel směřující ke křižovatce a počet čekajících vozidel ve frontě. Výstupem je proměnná definující prodloužení doby zeleného signálu. Pokud prodloužení doby zeleného signálu je nula, tak se spustí změna fáze. Nastavení funkcí příslušnosti pro vstupní parametry je zobrazeno na obrázcích 10.1 a 10.2, pro výstupní hodnoty na obrázku 10.3. Výstupem z fuzzy regulátoru je požadavek na změnu fáze, nebo prodloužení doby zeleného signálu. Regulátor pracuje s Mamdani inferenčním systémem a pro defuzzifikaci byla použita metoda centroidů.

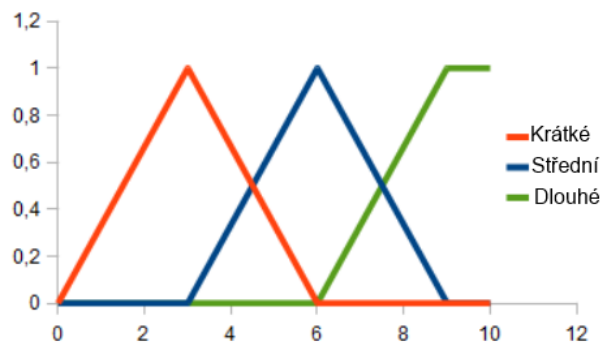


Obrázek 10.1: Funkce příslušnosti pro počet vozidel přijíždějící ke křižovatce



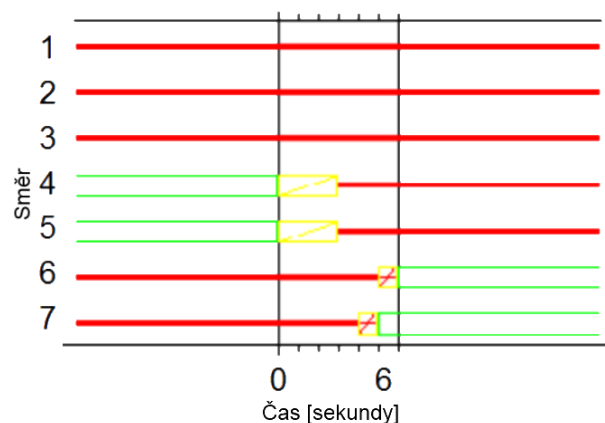
Obrázek 10.2: Funkce příslušnosti pro počet vozidel čekající ve frontě



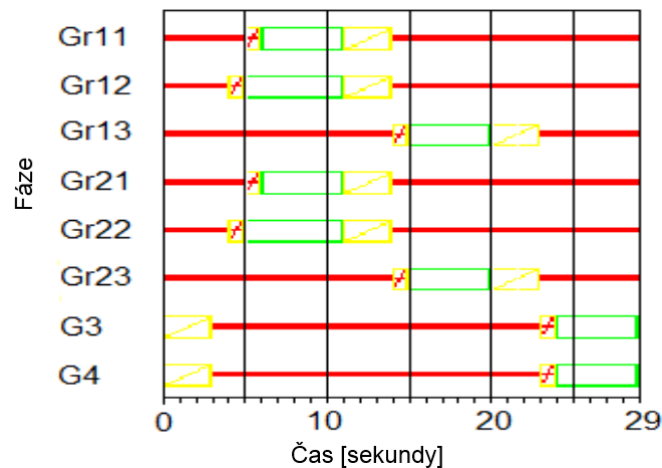


Obrázek 10.3: Funkce příslušnosti pro prodloužení doby zeleného signálu

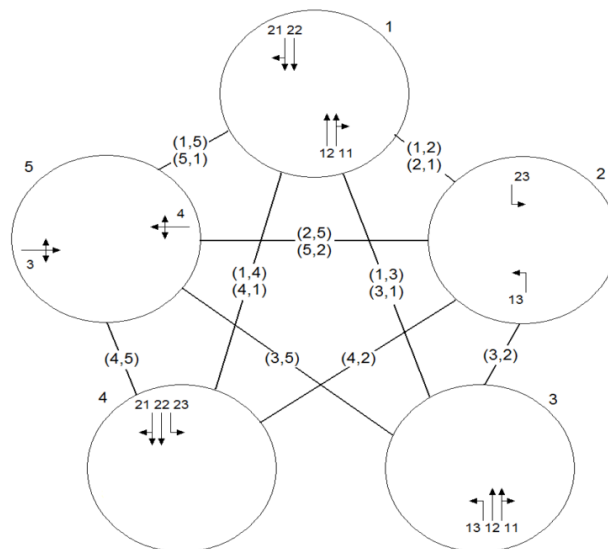
Při návrhu bylo pamatováno i na nastavení signálního času v rámci jedné fáze, respektive nastavení délky časového intervalu žlutého signálu a nastavení, kdy je na všech semaforech červený signál tak, aby byla křižovatka co nejbezpečnější. Tyto časy je ovšem potřeba nastavit tak, aby zbytečně dopravu nezdržovaly. Je zbytečné a nežádoucí, aby fáze, kdy je na všech semaforech červený signál, byla výrazně delší, než doporučují předpisy. V této studii byly časy nastaveny podle polského nařízení ministerstva infrastruktury. Časy v rámci jedné fáze, mimo zeleného signálu, jsou časy, kdy by vozidla neměla křižovatkou projíždět, ale postupně zastavit před semaforem. Pokud by tyto signální časy byly delší než je nutné, zbytečně by se snižovala celková efektivita fuzzy regulátoru. Na obrázku 10.4 je zobrazeno schéma, jak by nastavení těchto signálů mohlo vypadat. Schéma pro pevný signální plán je zobrazeno na obrázku 10.5 a stavový diagram pro acyklický mód je zobrazen na obrázku 10.6, kde se čísla fází pevného signálního plánu shodují s čísly fází acyklického modu. Přechody v acyklickém módu jsou řízené detektory, které jsou umístěné okolo křižovatky.



Obrázek 10.4: Grafické znázornění přechodu z jedné fáze do druhé



Obrázek 10.5: Grafické znázornění pevného signálního plánu



Obrázek 10.6: Znázornění možných přechodu acyklického módu

Výsledky simulací jsou zobrazeny v tabulce 10.1. Z ní jsou patrné rozdíly mezi pevným, acyklickým a fuzzy plánem řízení křižovatky. Při zadaném počtu vozidel, které mají projet křižovatkou, má fuzzy řízení nejnižší celkový čas průjezdnosti křižovatkou a má i nižší celkový počet zastavení vozidel. Použití fuzzy regulátoru je opět lepší volbou nežli použití pevného nebo acyklického plánu řízení křižovatky.

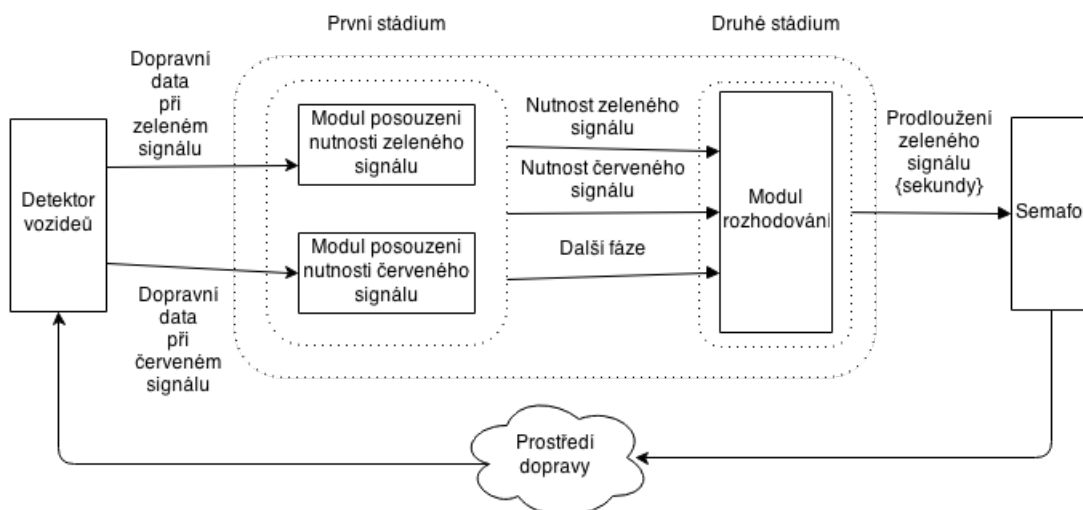
	Fuzzy regulátor	Pevný signální plán	Acyklický mód
Celkový čas průjezdnosti křiž.	18 hodin 35 min.	20 hodin 51 min.	22 hodin 4 min.
Celkový počet zastavení	1092	1102	1181

Tabulka 10.1: Výsledky simulace

## 11. Model SFTSC + TFTSC

Spojením jednoúrovňového (SFTSC - Standard traffic signal single-stage fuzzy control) a dvouúrovňového (TFTSC - Traffic signal two-stage fuzzy control) fuzzy řízení křižovatky pro zajištění efektivity jak pro nízkou, tak vysokou hustotu dopravy se zabývali na Tongjijské univerzitě v Šanghaji, Čína (Yang, 2012). Jednoúrovňový fuzzy regulátor dokáže velmi efektivně řídit provoz na křižovatce, pokud jsou dopravní podmínky mírné a nepředpokládají se žádné komplikace, například v noci. Jediné co stačí jednoúrovňovému fuzzy regulátoru je například délka fronty. Pokud ovšem dopravní situace začne být komplikovanější, zvýší se hustota provozu, nebo se stane nepředvídatelná událost, začne mít jednoúrovňový fuzzy regulátor problémy. V takovém případě je použit dvouúrovňový fuzzy regulátor, který mimo délky fronty pracuje například i s aktuální délkou časového intervalu fáze a může navrhnout optimální sekvenci následujících fází.

Rychlost fuzzy regulátoru závisí hlavně na počtu pravidel v bázi pravidel. Počet pravidel roste exponenciálně s přibývajícimi vstupními (i výstupními) proměnnými. Proto je v tomto případě intenzita dopravy při červeném signálu a intenzita dopravy při zeleném signálu označována jako stupeň nutnosti červeného signálu, respektive stupeň nutnosti zeleného signálu v závislosti na jejich řídicích vlastnostech. Tím jsou vynechána pravidla, která by popisovala vztah mezi zeleným signálem a vyloučeným červeným signálem (Obrázek 11.1). V prvním stádiu se vyhodnocují základní tři parametry (stupeň nutnosti červeného signálu, stupeň nutnosti zeleného signálu a optimální výběr další fáze), které jsou analyzovány v modulech. Optimální výběr další fáze je vybrán na základě porovnání stupňů nutnosti. Druhé stádium má za cíl rozhodnout o prodloužení zeleného signálu na základě stupně nutnosti aktuálního zeleného signálu a aktuálního stupně nutnosti červeného signálu.



Obrázek 11.1: Struktura dvouúrovňové fuzzy regulace

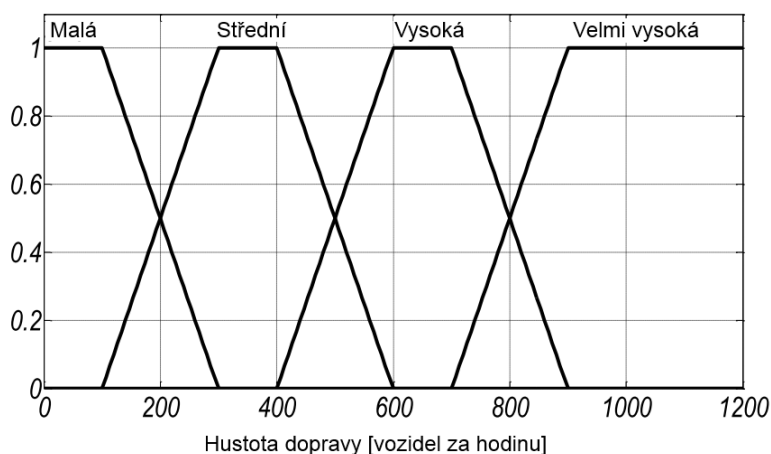
Protože při vysokém nasycení dopravy přijíždí další vozidla do již vytvořené fronty, která stojí na červený signál, je těžké přesně určit stav dopravy pouze s ohledem na délku fronty. Tato nejistota ovšem odpadá, pokud je nasycení dopravy malé a riziko přijíždějících vozidel do již vytvořené fronty je nulové nebo velmi malé. Proto je výhodnější při malém nasycení dopravy využívat jednoúrovňovou fuzzy regulaci dopravy. Volba mezi jednoúrovňovým a dvouúrovňovým fuzzy regulátorem probíhá adaptivně na základě stavu dopravy. Hodnota kdy je již vybrán dvouúrovňový fuzzy regulátor nastává, pokud je obsazenost křižovatky alespoň 33 %.

Pro simulaci byla vybrána klasická čtyř směrná křižovatka se třemi jízdními pruhy (vlevo, rovně, vpravo). Detektory byly umístěny na stop čáře a 150 metrů před stop čarou. Tato studie využívá k simulaci program Paramics. Jednotlivé fuzzy regulátory byly vytvořeny v programu MATLAB. Byly navrženy dva scénáře, které měli zajistit objektivitu výsledku. Každý scénář měl prověřit stabilitu systému za složitých situací a ověřit funkčnost i za nepředvídatelných událostech. První ze scénářů měl prověřit funkčnost dvouúrovňového fuzzy regulátoru a porovnat ho s pevným signálním plánem a vozidly řízeným plánem. Druhý scénář ověřoval funkční spolupráci obou fuzzy regulátorů.

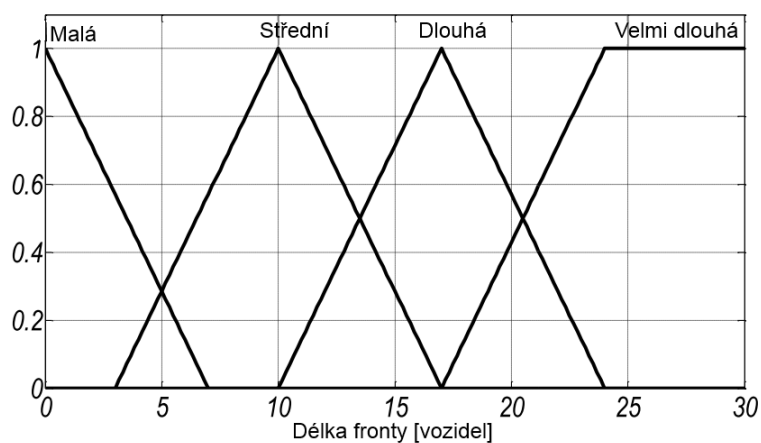
Výsledek testování potvrdil, že kombinací dvou fuzzy regulátorů, lze docílit lepších výsledků, než při použití jen jednoho z nich. Jednoúrovňový fuzzy regulátor bude mít problémy při vyšší intenzitě dopravy, kdežto dvouúrovňový fuzzy regulátor nebude mít tak dobré výsledky při malé intenzitě dopravy. Snížení čekací doby se pohybuje mezi 10 % a 47 %, délka fronty klesla o 7 % až 28 %, kapacita křižovatky se zvedla o 5 % až 27 % a rychlost průjezdu se zvýšila o 21 % až 74 %.

## 12. Fuzzy regulátor podle prof. Zainoiya Stotskoa

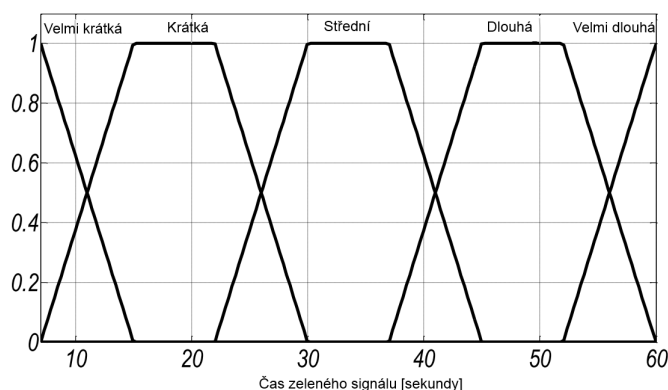
Prof. Zainoiy Stotsko je vedoucím fakulty mechaniky a dopravy na Národní polytechnické univerzitě v Lvově v Ukrajině, se zabýval řízením křižovatky pomocí fuzzy regulátoru (Stotsko, 2013). Jako vstupní parametry byly vybrány délka fronty a množství příjezdících vozidel. Funkce příslušnosti jednotlivých vstupních veličin jsou zobrazeny na obrázcích 12.1 a 12.2. Jako výstupní parametr je považována délka zeleného signálu (funkce příslušnosti je zobrazena na obrázku 12.3). Výsledný graf trojrozměrné funkce, tedy závislost délky fronty a množství příjezdících vozidel na výslednou délku časového intervalu zeleného signálu, je zobrazen na obrázku 12.4. Z něho je patrné, že se zvyšujícím se počtem vozidel ve frontě a s přibývajícím množstvím příjezdících vozidel roste i délka časového intervalu zeleného signálu. V bázi pravidel je celkem šestnáct pravidel.



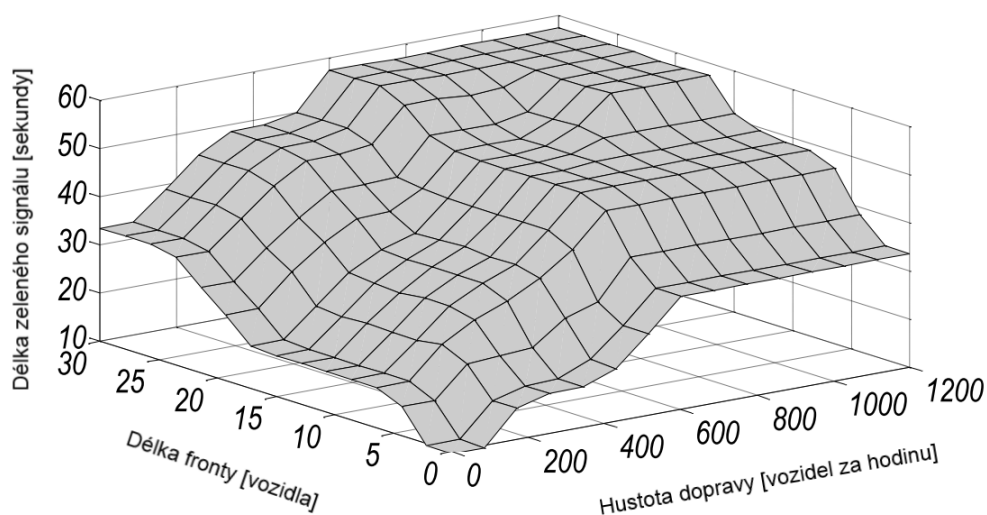
Obrázek 12.1: Funkce příslušnosti hustoty dopravy



Obrázek 12.2: Funkce příslušnosti délky fronty



Obrázek 12.3: Funkce příslušnosti délky časového intervalu zeleného signálu



Obrázek 12.4: Povrch řízení křižovatky

Pro ověření studie byl vybrán simulační program PTV Vissim v kombinaci s MATLAB. Byla vybrána existující křižovatka ve městě Lvov. Porovnání výsledku simulací byl ověřen jak simulačně v programu Vissim, tak terénním šetřením, a proto lze považovat výsledky za věrohodné. Bylo navrženo sedm různých scénářů vývoje dopravy, respektive jaká bude intenzita dopravy v rámci jedné hodiny. Výsledky byly dále porovnány s výsledky pevného signálního plánu, skutečnými hodnotami naměřené na křižovatce a s vypočtenými hodnotami na základě dokumentu Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections z roku 2008, kde jeden z hlavních autorů je i prof. Stanislav Teplý<sup>6</sup>.

<sup>6</sup>V roce 1957 získal magisterský titul na stavební fakultě v Praze. Po roce 1968 emigroval do Západního Německa, kde oživil svojí kariéru v průmyslu pro řízení dopravy a elektrotechniku. V roce 1973 se přestěhoval do Západní Kanady, kde se v roce 1977 stal profesorem dopravního inženýrství na Univerzitě v Alberta.

## Reference

- AALTO UNIVERSITY. Aalto University - School of Engineering - Research Infrastructures [online]. 2014, 14.1.2014 [cit. 2014-06-20]. Dostupné z: [http://civil.aalto.fi/en/research/transportation/research\\_topics/its/research\\_infra/](http://civil.aalto.fi/en/research/transportation/research_topics/its/research_infra/)
- AKBAS, Ahmet a Vedat TOPUZ, Fuzzy Signal Controller for Critical Intersections in Istanbul [online]. 2003. [cit. 2014-07-08]. Dostupný z: [http://www.trafficforum.ethz.ch/vwt\\_2003/beitraege/vwt19proceedings\\_contribution\\_40.1-40.8.pdf](http://www.trafficforum.ethz.ch/vwt_2003/beitraege/vwt19proceedings_contribution_40.1-40.8.pdf)
- AZIMIRAD, Ehsan, Naser PARIZ a Mohammad Naghibi Bagher SISTANI, 2010. A novel fuzzy model and control of single intersection at urban traffic network. *Systems Journal, IEEE* [online]. roč. 4, č. 1, s. 107–111 [cit. 2014-07-09]. Dostupný z: [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=5439987](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5439987)
- BARGIELA, Andrzej. HUTSIM. Intelligent modelling [online]. 1997, 25.11.1997 [cit. 2014-06-20]. Dostupné z: <http://www.intelligentmodelling.org.uk/Projects/hutsim/Projects.htm>
- KURZY.CZ. Kurzy.cz, spol. s r.o. [online]. 2014 [cit. 2014-6-19]. Dostupné z: <http://www.kurzy.cz/kurzy-men/grafy/nr/CZK-GBP/od-1.1.1997/>
- MURAT, Y. Sazi a Ergun GEDIZLIOGLU, 2005. A fuzzy logic multi-phased signal control model for isolated junctions. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* [online]. 2., roč. 13, č. 1, s. 19–36 [cit. 2014-07-03]. ISSN 0968090X. Dostupný z: doi:10.1016/j.trc.2004.12.004
- NAIR, B. Madhavan s J. CAI, 2007. A fuzzy Logic Controller for Isolated Signalized Intersection with Traffic Abnormality Considered. 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium [online]., s. 1229–1233 [cit. 2014-07-07]. ISSN 1931-0587. Dostupný z: doi:10.1109/IVS.2007.4290286
- KOSKINEN, Kari, Niko SETÄLÄ s Iisakki KOSONEN, 2006 [cit. 2014-06-20]. Fuzzy Signal Control – FUSICO [online]. Dostupný z: [http://users.tkk.fi/u/ikosonen/Source/Posters/Poster\\_Fusico.pdf](http://users.tkk.fi/u/ikosonen/Source/Posters/Poster_Fusico.pdf)
- PTV AMERICA, 2006. VISUM Overview [online] [cit. 2014-06-14]. Dostupný z: [http://data.ptvamerica.com/docs/VISUM\\_Slideshow.pdf](http://data.ptvamerica.com/docs/VISUM_Slideshow.pdf)
- SMARTTEST. Smartest Simulation Modelling Applied to Road Transport European Scheme Tests [online]. (1997) [cit. 2014-06-20]. Dostupné z: <http://www.its.leeds.ac.uk/projects/smartest/append3d.html#a12>
- STANIEK, Marcin, 2012. The crossroads lights fuzzy controller development principles in VISSIM environment. *Zeszyty Naukowe. Transport/Politechnika Śląska* [online]. [cit. 2014-07-10]. Dostupný z: [https://www.polsl.pl/Wydzialy/RT/ZN\\_T/pelne\\_teksty/z73/087\\_ZN73\\_Staniek.pdf](https://www.polsl.pl/Wydzialy/RT/ZN_T/pelne_teksty/z73/087_ZN73_Staniek.pdf)

- STOTSKO, Zinoviy, Yevhen FORNALCHYK a Ihor MOHYLA, 2013. Simulation of signalized intersection functioning with fuzzy control algorithm. *Transport Problems : an International Scientific Journal* [online]. roč. 8, č. 1, s. 5–16 [cit. 2014-07-18]. Dostupný z: [http://transportproblems.polsl.pl/pl/Archiwum/2013/zeszyt1/2013t8z1\\_01.pdf](http://transportproblems.polsl.pl/pl/Archiwum/2013/zeszyt1/2013t8z1_01.pdf)
- POLSSON, Ken. Chronology of Microsoft Windows Operating Systems [online]. 2007-2013, 20.2.2014 [cit. 2014-06-20]. Dostupné z: <http://pctimeline.info/windows/win1997.htm>
- YANG, Wenchen, Lun ZHANG, Zhaocheng HE, Yuchen YANG a Yuchen FANG, 2012. Urban traffic signal two-stage combination fuzzy control and Paramics simulation. *International Conference on Systems and Informatics (ICSAI)* [online]. s. 771–775 [cit. 2014-07-17]. Dostupný z: [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=6223124](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6223124)
- YULIANTO, Budi, 2003. Application of fuzzy logic to traffic signal control under mixed traffic conditions. *Traffic Engineering and Control* [online]. s. 332–336 [cit. 2014-07-10]. Dostupný z: [http://sutanto.staff.uns.ac.id/files/2010/05/tec-journal-october-2003\\_final.pdf](http://sutanto.staff.uns.ac.id/files/2010/05/tec-journal-october-2003_final.pdf)



---

## Část III.

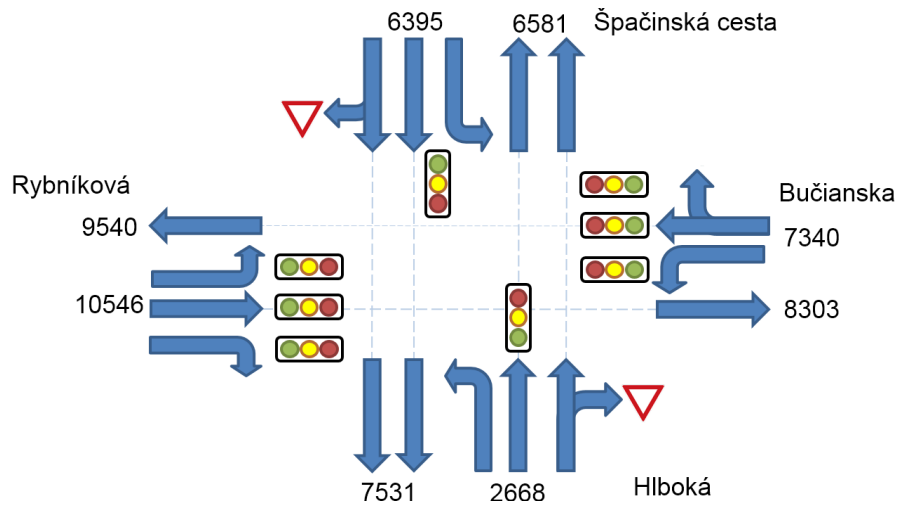
# Případová studie

V této kapitole bude popsána případová studie na městě Trnava, respektive na její křižovatce. Data o provozu na křižovatce byla poskytnuta mezinárodní firmou Asseco C.E. a slouží k zjištění obecného trendu vývoje dopravní situace přes celý den. Data jsou k dispozici za celý den od 00:00:00 do 23:59:59 dne 12. 10. 2011. Data obsahují statistiky jako rychlost vozidla, délka vozidla, z jakého směru a do jakého směru vozidlo jede. Pro případovou studii jsou nejdůležitější informace o maximální intenzitě dopravy a poměru nákladní dopravy k osobní dopravě. Dalším parametrem je délka fronty. Ta bude zjištěna v dopravním simulačním programu PTV Vissim od PTV Group. Výsledkem je snížení délky fronty a tím snížení čekací doby, počty zastavení před projetím křižovatkou a tím i snížení znečišťování ovzduší a celkově plynulejší provoz skrz křižovátku.

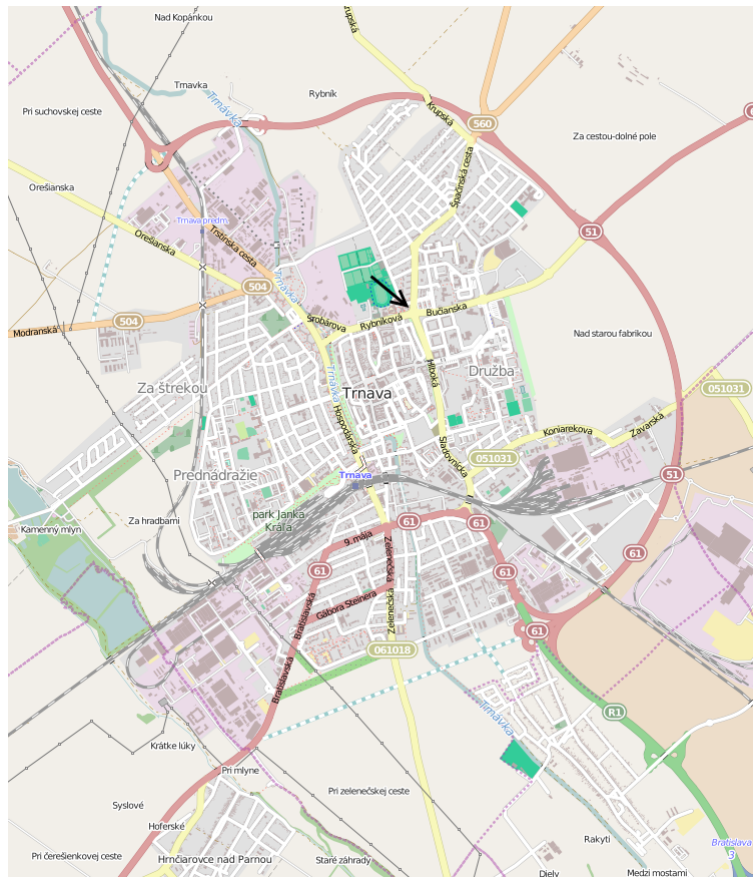
### 13. Popis vybrané křižovatky

Sledovaná křižovatka se nachází ve městě Trnava, Slovensko (Obrázek 13.2). Je téměř v centru města a nachází se na hlavní silnici, která vede mimo dálnici do Trenčína a Hodonína. Trnava je sedmé největší město na Slovensku. Leží v centru Trnavské pahorkatiny a průměrná nadmořská výška je 140 metrů nad mořem. Je situována 45 km severovýchodně od Bratislavy, se kterou je spojena dálnicí D1. Počet obyvatel rostl do začátku 21. století (asi 70 000 obyvatel). Od té doby se počet obyvatel postupně snižuje (k 31. 12. 2013 asi 65 000 obyvatel (Wikipedia)), ale je to dáno hlavně oddělením přilehlých vesnic. Město Trnava má rozlohu asi 71 km<sup>2</sup>. Trnava zažila velký příliv investorů po roce 2000. Mezi nejvýznamnější společnosti patří Datalogic Slovakia, I.D.C. Holding, PSA Peugeot Citroën Slovakia, SACHS Slovakia, Samsing Coderady, SI-BAMAC, TOMA, ŽOS, Johns Manville, FAURECIA Slovakia s r.o., STREIT Trnava s r.o., SONY Slovakia, AGROSTAV Trnava, a.s., SWEDWOOD Slovakia spol. s r.o., METAL DESIGN Slovakia a.s., LYCOS, Tatrachema, Menzolit Fibron Automotive s r.o. Nejen velké nadnárodní firmy přispívají k velkému zatížení celého města Trnava dopravou, ale i místní doprava. Ať se již jedná o nákladní dopravu či osobní dopravu. Již od roku 2008, kdy byl vypracován generel dopravy v Trnavě (Kováčiková, 2008), je křížení cest Rybníková, Bučianska, Hlboká, Špačinská označována za přetíženou. Výhledově obec plánuje postavení kruhové křižovatky. Kruhové křižovatky sice výraznou měrou snižují riziko dopravní nehody, ale velmi záleží na rozměrech kruhové křižovatky a na počtech jízdních pruhů, aby dokázala pokrýt intenzitu na dané křižovatce.

Na schématu křižovatky (Obrázek 13.1) jsou vyznačeny směry spolu s počty vozidel, které přijíždí a odjíždí z jednotlivých směrů. Z celkových počtů vozidel, tvoří asi 20 až 25 % nákladní doprava. Celkem projede křižovatkou asi 30 000 vozidel denně. Data získaná z detektorů v okolí křižovatky byla vybrána pro den 12. 10. 2011. Data byla poskytnuta firmou Asseco C.E. V současné době se o řízení křižovatek ve městě Trnava stará firma Siemens. Firma Asseco C.E. chce nabídnout vylepšení a nabídnout městu další možnosti při řízení křižovatek. Například v Olomouci se o provoz semaforů starají tři firmy: Eltodo Praha, Patriot Brno a AŽD Brno.



Obrázek 13.1: Schéma křižovatky



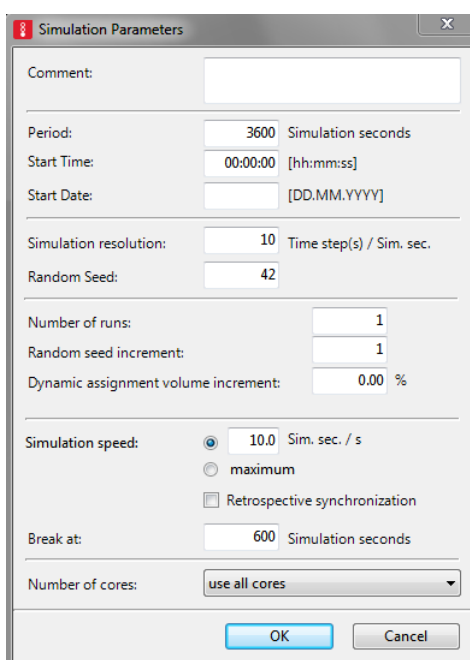
Obrázek 13.2: Poloha křižovatky (© Přispěvatelé OpenStreetMap, CC-BY-SA)

## 14. Simulační program PTV Vissim

Vissim (Verkehr In Städten - Simulationsmodell) je jedním z šesti nabízených řešení od firmy PTV Group. Dalšími jsou Vistro pro návrh makroskopických tras, Vissum pro veřejnou dopravu, Viswalk pro simulaci chodců, Balance pro mezoskopické a makroskopické simulace dopravy a Optima pro sledování dopravy a dopravní předpovědi. Vissim je mikroskopický dopravní simulační program, který pracuje s teoretickým dopravním modelem, který vytvořil v roce 1974 Rainer Wiedemann na Univerzitě Karlsruhe. Tento dopravní model není jediný. CORSIM využívá model od L.A. Pipes (1967), od P.G. Gipps (1975) například program AIMSUN (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-urban Networks), od D.J. Fritzsche (1991) například Paramics (Higgs, 2011). K dispozici jsou dvě bezplatné verze, studentská a demo. Obě verze mají časové omezení na 30 dní. Studentská verze nemá k dispozici pokročilejší funkce a u demo verze nelze uložit projekt a nastavení prostředí. Verze PTV Vissim 6 vyšla v srpnu 2013. Vissim má možnost komunikace s ostatními programy pomocí API (Application Programming Interface) na základě COM (Component Object Model) rozhraní a pomocí programovacích jazyků Visual Basic, C, C++ nebo Python. Vissim je velmi oblíbený simulační program a používají ho firmy ve více než 70 státech. V nové verzi dokáže hodnotit environmentální dopady dopravy, ale není podporováno fuzzy řízení. Dopravní statistiky jsou samozřejmostí a řadí se mezi ně například délka fronty, čas zdržení vozidel, intenzita vozidel, hustota vozidel, tok, průměrná rychlost a mnoho dalších dopravních charakteristik. Tyto charakteristiky jsou získávány z detektorů, které jsou v programu přednastaveny.

## 15. Nastavení prostředí PTV Vissim

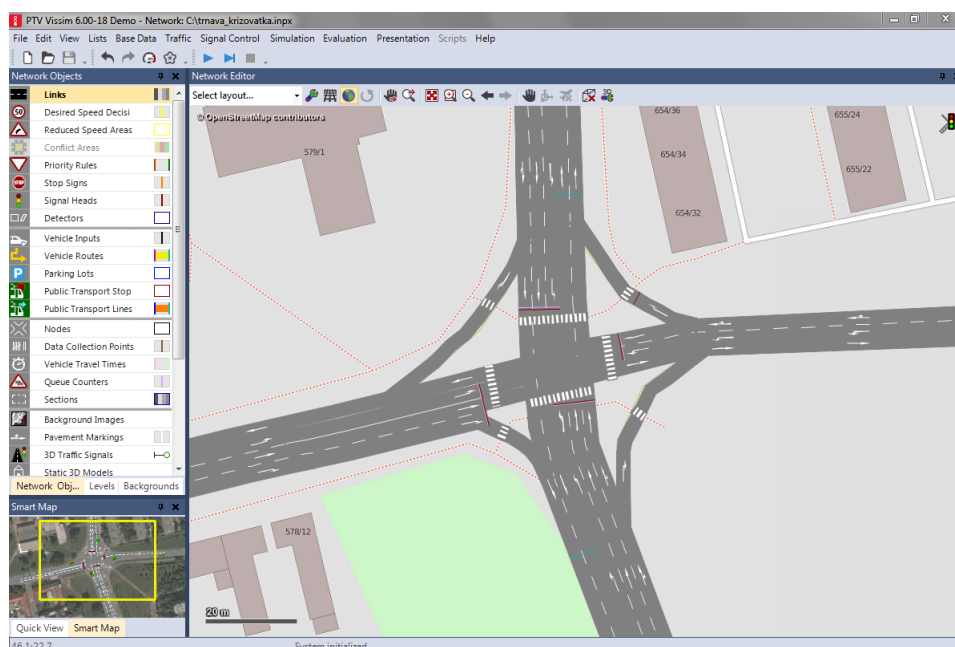
Pro případovou studii je mikroskopická simulace izolované křižovatky v Trnavě nastavena na obvyklé chování vozidel, konkrétně Wiedeman 74, respektive Wiedemann 99 pro odbočení vpravo. Všechny charakteristiky, například vzdálenost mezi auty, akcelerace, decelerace, zůstali na původních hodnotách, které jsou mnohými studiemi ověřeny. Kromě vozidel, lze do simulace zahrnout hromadnou dopravu (autobus, tramvaj), ale i chodce. V této případové studii ovšem nebudou tyto prvky zahrnuty. Pro nastavení průběhu simulace lze ponechat standardní hodnoty (Obrázek 15.1), v tomto případě je délka simulace 3600 simulačních sekund (zastavena po 600 simulačních sekundách), rychlost simulace je 10 simulačních sekund za jednu skutečnou sekundu (simulace je desetkrát rychlejší než ve skutečnosti). Rozlišení simulace nastavuje plynulost pohybu vozidel při simulaci (obvyklých je 10 časových kroků za jednu simulační sekundu).



Obrázek 15.1: Parametry simulace

## 16. Vytvoření křižovatky

Tvorba křižovatky v programu Vissim je poměrně intuitivní a po pochopení základního principu návrhu, lze přibližný model křižovatky vytvořit bez větších obtíží. Základní podklad pro studenskou verzi je silniční mapa od OpenStreetMap (OSM), pro demo verzi je to ortofotomapa od Bing, nebo silniční mapa od OSM. Díky podkladovým mapám, lze relativně přesně navrhnout geometrii křižovatky, včetně geolokace. Program Vissim je jeden z nejlepších dopravně simulačních programů, které lze na trhu najít. Jeho obliba není náhodná. Návrhy cest, semaforů, detektorů a možnosti simulace skýtají velké množství nastavitelných parametrů, které ovšem pro potřeby této případové studie mohou zůstat na obvyklých hodnotách. Pro návrh křižovatky byly použity následující funkce: návrh cesty, umístění semaforu, umístění detektoru pro určení délky fronty, nastavení intenzity vozidel v jednotlivých směrech, nastavení relativního toku jízdnic pruhů (kolik vozidel se rozhodne odbočit), nastavení, kudy vozidla mohou projet (určit pruhy pro odbočení) a vyřešení rizikových míst možné srážky vozidel. Semaforů lze rozdělit do jednotlivých semaforových skupin. Lze vytvořit i více signálních plánů. Jednotlivým semaforům lze určit jakou mají mít podobu. Například klasická červeno-žluto-zelená kombinace, jen zelený signál, blikající žlutý signál a zelený signál. Signální plán se nastavuje pro každou semaforovou skupinu. Lze nastavit minimální doby červeného, zeleného i žlutého signálu pro každou semaforovou skupinu zvlášť. Na následujícím obrázku (Obrázek 16.1) je zobrazena hlavní obrazovka programu Vissim s vytvořenou křižovatkou.



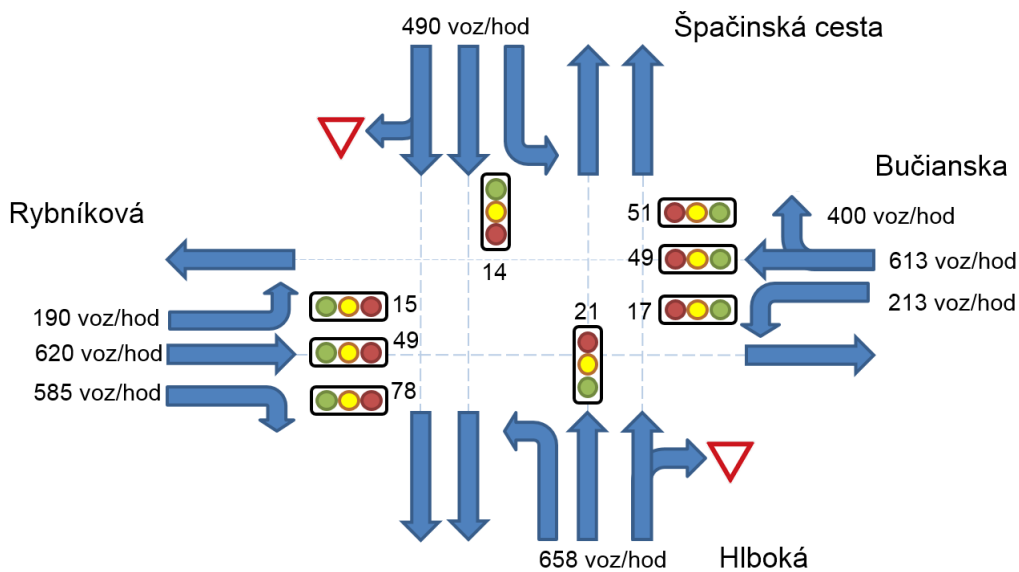
Obrázek 16.1: Vytvořená křižovatka v programu PTV Vissim

## 16.1. Data z reálných detektorů

Data poskytnutá firmou Asseco C.E. obsahující informace o jednotlivých vozidlech a agregované údaje po pěti minutových blocích (patterns). Data slouží pro zjištění základních charakteristik křižovatky. U této studie byla využita maximální intenzita vozidel v jednotlivých směrech, ale i v jednotlivých jízdních pruzích, pokud byla tato informace k dispozici. Data obsahují velkou míru neurčitosti a chyb. Rozdíl mezi detekovanými vozidly, které do křižovatky přijíždí a počty detekovaných vozidel, které z křižovatky odjeli, se liší asi o 15 %. Je to také dáno tím, že detektory jsou umístěné ve vzdálenostech od 200 metrů do 300 metrů od křižovatky a mezi detektorem a sledovanou křižovatkou jsou další menší křižovatky, kam mohla vozidla odbočit a tím se nezapočítat do statistik. Proto je důležitý parametr intenzita vozidel ve směru do křižovatky, kde by hodnoty mohli více souhlasit se skutečností. Jedná se o parametr, který bude nastaven v programu Vissim, tak aby se simulovaná křižovatka zatížila maximální možnou běžnou intenzitou provozu.

## 16.2. Reálné parametry křižovatky

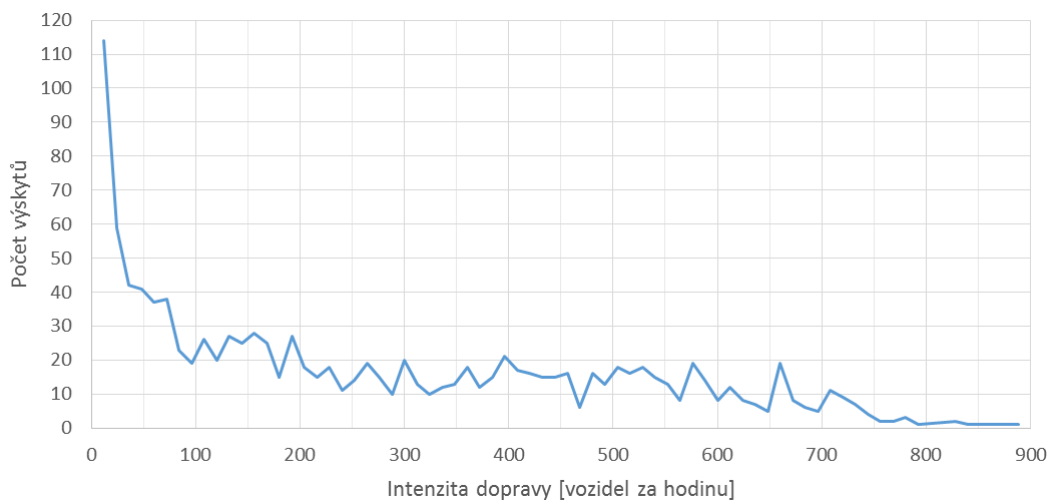
Maximální propustnost křižovatky je 3769 vozidel za hodinu. Jedná se o maximální hodnotu, kterou lze dosáhnout při délce časového intervalu cyklu 120 sekund a při délce časového intervalu zeleného signálu, který je zobrazen u každého semaforu na obrázku 16.2. Na obrázku 16.3 je ovšem patrné, že 83 % všech změřených intenzit bylo pod 500 vozidel za hodinu. Intenzita jednotlivých směrů je zobrazena na obrázku 16.2. V celé Trnavě je pak 86 % všech intenzit pod 500 vozidel za hodinu. Nákladní a těžká nákladní doprava, byla z detektoru získána pomocí délky vozidla. Pokud vozidlo měřilo přes 5,5 metrů, potom bylo označeno za nákladní vozidlo. Jestliže byla délka vozidla vyšší než 16 metrů, pak bylo označeno za těžké nákladní vozidlo. Průměrný podíl nákladní, včetně těžké na celkové dopravě je 25 %. Průměrná délka všech vozidel je 5,5 metrů. Průměrná délka osobního vozidla jsou čtyři metry a průměrná délka nákladních a těžkých nákladních vozidel je 10,5 metru. Na obrázku 16.4 jsou zobrazeny rychlosti pro jednotlivá auta. Průměrná hodnota se blíží  $43 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ , tedy téměř maximální povolené rychlosti ve městě. Veškeré tyto hodnoty jsou pro všechny směry, které vedou do křižovatky. Po korekcích počtu vozidel, které opustili křižovatku (za předpokladu, že křižovatku nemohlo opustit více vozidel, než do ní vjelo), bylo vypočítáno procentuální zastoupení jednotlivých pruhů v rámci jednoho směru (Tabulka 16.1). Například, pokud přijedou 4 vozidla ke křižovatce z ulice Bučianska, potom dvě z těchto vozidel pojedou rovně (do ulice Rybníková), třetí doleva (do ulice Hlboká) a čtvrté doprava (do ulice Špačinská). Jsou to pouze odhady na základě procentních příspěvků ostatních třech směrů. Hodnoty budou použity jako parametry do simulace křižovatky. Z původních dat nebylo možné zjistit, kolik vozidel se řadí do konkrétního pruhu. Detektory pro jednotlivé směry by musely být umístěné i těsně před semaforem, tak aby se dalo zjistit, kolik vozidel projelo konkrétním pruhem.



Obrázek 16.2: Maximální propustnost jednotlivých směrů

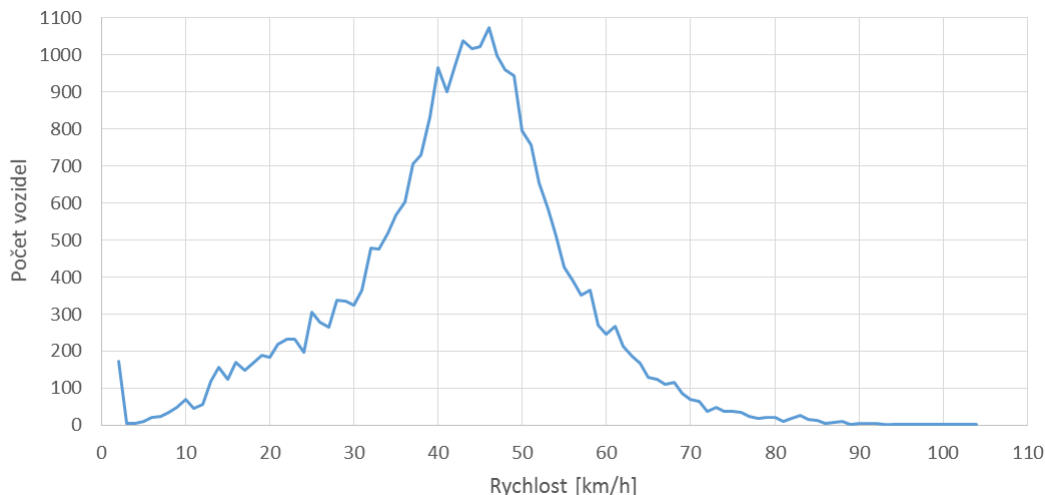
směr	vlevo	rovně	vpravo
Bučianska	25,09	49,76	25,16
Rybníková	30,01	40,04	29,94
Hlboká	46,39	21,79	31,82
Špačinská	31,84	21,74	46,41

Tabulka 16.1: Procentní vytiženost jednotlivých pruhů v jednom směru



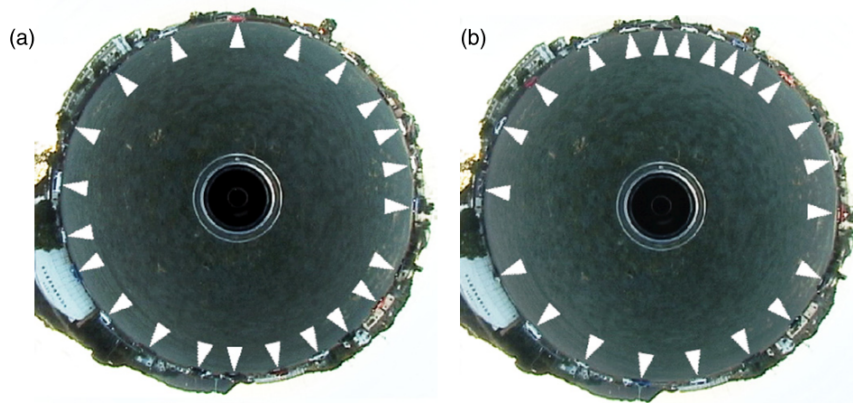
Obrázek 16.3: Graf výskytu intenzit



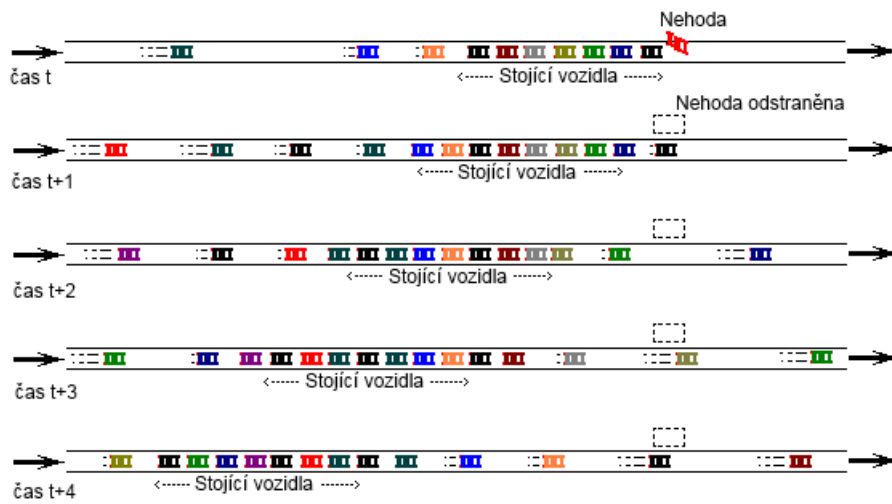


Obrázek 16.4: Graf výskytu rychlostí

Při terénním šetření bylo zjištěno, že pokud ve frontě stojí pouze osobní vozidla (průměrná délka čtyři metry), tak se do fronty o délce 120 metrů, vejde dvacet aut. Z toho vyplývá, že průměrný řidič si nechá rozestup přibližně dva metry. Pokud ovšem stojí ve frontě v průměru pět nákladních vozidel, potom se průměrná délka vozidla prodlouží ze čtyř na pět a půl metru. Pokud zachováme rozestup mezi vozidly na dvou metrech, pak průměrná délka jednoho vozidla se zvýší na sedm a půl metru. V tom případě bude fronta o délce 120 metrů obsahovat šestnáct vozidel. Dále bylo prozkoumáno, že průměrná doba opuštění křižovatky jednoho vozidla, který čeká na zelený signál, jsou dvě sekundy. Pokud by do vytvořené 120m fronty nepřijížděla žádná další vozidla, celá fronta by se vyprázdnila teoreticky za 32 sekund. To je ovšem teoretická hodnota a ve skutečnosti může být spíše vyšší, než nižší. Výsledky terénního průzkumu byly prokázány i simulací v programu Vissim. Velký vliv na provoz, nejen v okolí křižovatky, mají sami řidiči. Fenomén „zpětné fronty“, nebo „vlna dopravní zácpy“, se vytváří velmi nečekaně. Dopravní zácpa nemusí vzniknout pouze vlivem například dopravní nehody, nebo snížením počtu jízdních pruhů, ale může se vytvořit sama od sebe. Na Japonské Univerzitě v Nagoya tento jev studovali a zjistili, že dopravní zácpa se vytvoří naprosto spontánně (Sugiyama, 2008). Při praktické ukázce seřadili vozidla do kruhu a nechali je jet stejnou rychlostí, přibližně  $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ . Postupem času se začala vozidla k sobě přibližovat, až musela některá zastavit. Tím začala vznikat místa dopravní zácpy bez toho, aniž by někde došlo k nehodě. Na obrázku 16.5 (bílé šipky ukazují polohu vozidla) z  $360^\circ$  kamery je vidět situace těsně po rozjetí vozidel (a), kdy se vozidla k sobě na několika místech k sobě začínají přibližovat. Na obrázku (b) je už patrné nutné zastavení sedmi vozidel, které se musí znovu rozjízdit. Kvůli stojícím vozidlům musela zastavovat další a další vozidla, až první, který se rozjel z minulého zastavení, dostihla „zpětná fronta“ a vozidlo se ocitlo na konci fronty, kterou samo začalo. Takže dopravní zácpa se může vytvořit, i když řidiči mají jet stejnou rychlostí, například na dálnicích.



Obrázek 16.5: Dopravní zácpa



Obrázek 16.6: Dopravní zácpa po nehodě (Beaty, 2008)

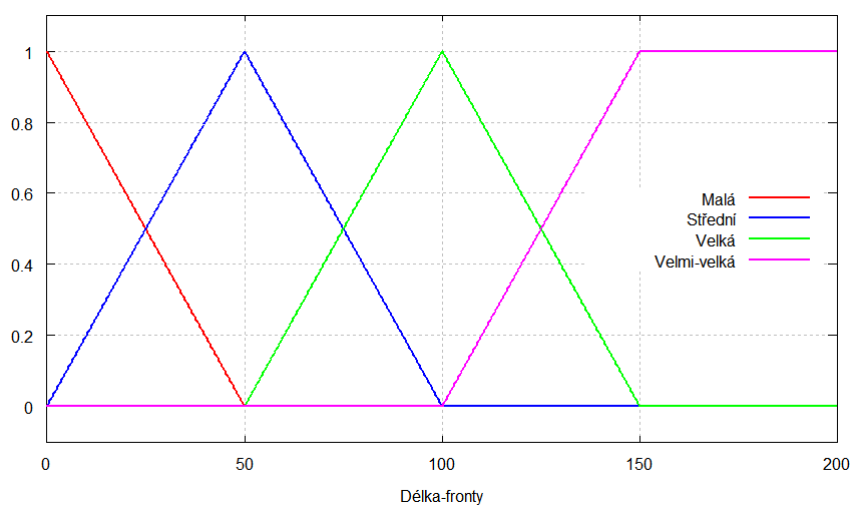
## 17. Fuzzy regulátor (řadič)

Obecná struktura fuzzy regulátoru pro izolovanou křižovatku je zobrazena na obrázku 2.19. Fuzzy regulátor byl vytvořen v programu Octave s grafickou nadstavbou Qt Octave a Fuzzy logic toolkitem. Jedná se o open-source projekt, který se řadí mezi úspěšné projekty jako Projekt R, Maxima, Sage, GeoGebra. Octave je v mnoha případech kompatibilní s komerčním systémem Mathworks MATLAB. Kód fuzzy regulátoru (kapitola 18) lze použít v obou programech bez jakýchkoli změn. Data, která se získají pomocí dopravních detektorů v programu Vissim a které vstupují do „Vstup dat” jsou délka fronty (v metrech) a intenzita dopravy (počet vozidel za hodinu). Fuzzy inferenční systém byl zvolen Mamdaniho typ a defuzzifikace probíhá pomocí metody centra plochy. Ty byly zvoleny pro svojí velkou používanost ve studiích zabývajících se řízením křižovatky pomocí fuzzy regulátorů, jednoduchého návrhu a pro odpovídající vlastnosti při řízení křižovatky. Do „Výstupní akce” se po defuzzifikaci vkládá čas zeleného signálu v sekundách.

### 17.1. Fuzzifikace

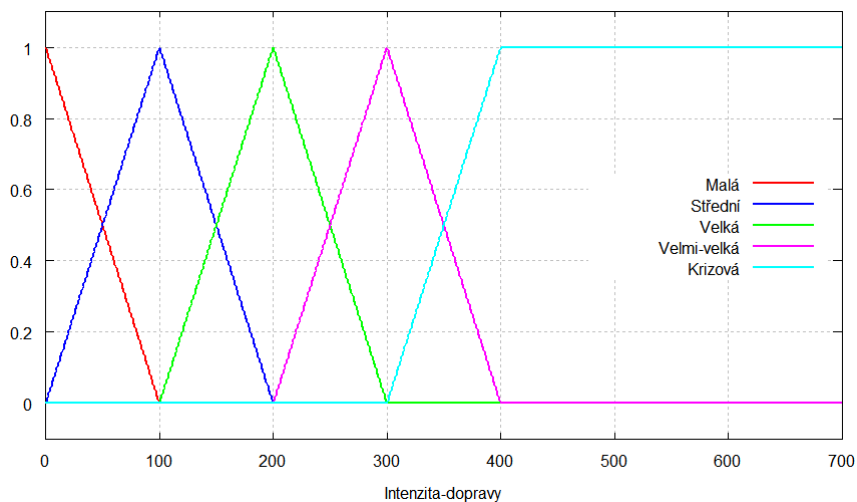
Fuzzifikace je závislá na návrhu jednotlivých funkcí příslušnosti. Pro každou vstupní i výstupní veličinu lze zvolit libovolný počet funkcí příslušnosti. Je nutné ovšem brát zřetel na množství podmínek, které by musely být popsány v bázi pravidel. Pro čtyři funkce příslušnosti délky fronty a pět funkcí příslušnosti pro intenzitu dopravy je celkem dvacet pravidel, které se váží na pět funkcí příslušnosti délky časového intervalu zeleného signálu.

Hraniční hodnoty délky fronty byly vybrány tak, aby co nejlépe vystihovaly dopravní situaci v křižovatce, ale přitom nezatěžovali fuzzy regulátor zbytečnými podmínkami. U funkce příslušnosti „Velká” je délka fronty zvolena na 100 metrů, která by křižovatkou dokázala projet za 27 sekund. To by ovšem nesměla do křižovatky přijíždět žádná nová vozidla.



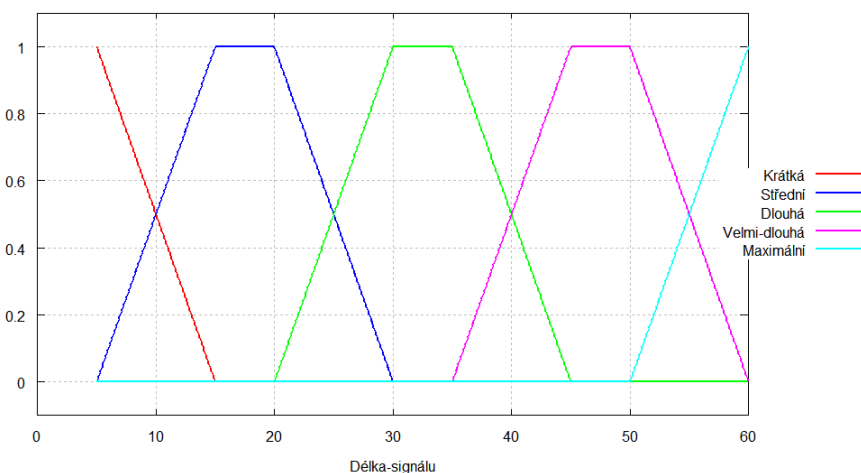
Obrázek 17.1: Funkce příslušnosti délky fronty

Pro intenzitu dopravy bylo zvoleno pět funkcí příslušností. Hraniční hodnoty byly vybrány po 100 vozidlech za hodinu. Je brána v úvahu vyšší četnost intenzit do hodnoty 500 vozidel za hodinu. Je to z toho důvodu, že téměř veškeré situace (téměř 90 %) měly hodnotu intenzity dopravy pod hranicí 500 vozidel za hodinu. Od intenzity 400 vozidel za hodinu je považována za krizovou. Nejen, že riziko tvorby dlouhé fronty je vysoké, ale i kvůli zpětné frontě se potencionálně vytvořená fronta nebude zkracovat dostatečně rychle.



Obrázek 17.2: Funkce příslušností intenzity dopravy

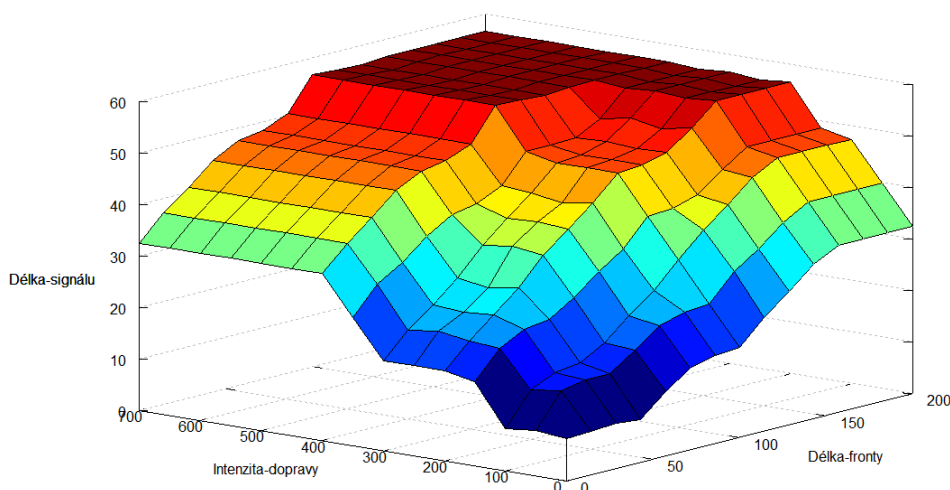
Délka časového intervalu zeleného signálu byla rozdělena na pět částí. Maximální hodnota intervalu zeleného signálu byla zvolena na 60 sekund. Při této hodnotě by mělo být schopno odjet 30 vozidel, tedy v průměru 225 metrů. Délka časového intervalu zeleného signálu by ovšem neměla být kratší než pět sekund, proto univerzum délky časového intervalu zeleného signálu začíná od pěti sekund.



Obrázek 17.3: Funkce příslušností délky časového intervalu zeleného signálu

## 17.2. Báze pravidel

Bázi pravidel tvoří dvacet podmínek, které popisují celé řízení křižovatky (Tabulka 17.2). Báze pravidel se může zobrazit i pomocí grafu trojrozměrné funkce (Obrázek 17.4). Délka fronty je důležitější parametr než intenzita dopravy. Proto, i když je intenzita vozidel malá, tak pokud je dlouhá fronta, bude i výsledný časový interval zeleného signálu delší, než když je krátká fronta a vyšší intenzita dopravy.



Obrázek 17.4: Výsledný graf báze pravidel

Tabulka 17.1: Báze pravidel

JESTLIŽE Délka-fronty JE Malá A Intenzita-dopravy JE Malá POTOM Délka-signálu JE Krátká
JESTLIŽE Délka-fronty JE Malá A Intenzita-dopravy JE Střední POTOM Délka-signálu JE Krátká
JESTLIŽE Délka-fronty JE Malá A Intenzita-dopravy JE Velká POTOM Délka-signálu JE Střední
JESTLIŽE Délka-fronty JE Malá A Intenzita-dopravy JE Velmi-velká POTOM Délka-signálu JE Střední
JESTLIŽE Délka-fronty JE Malá A Intenzita-dopravy JE Krizová POTOM Délka-signálu JE Dlouhá
JESTLIŽE Délka-fronty JE Střední A Intenzita-dopravy JE Malá POTOM Délka-signálu JE Krátká
JESTLIŽE Délka-fronty JE Střední A Intenzita-dopravy JE Střední POTOM Délka-signálu JE Střední
JESTLIŽE Délka-fronty JE Střední A Intenzita-dopravy JE Velká POTOM Délka-signálu JE Dlouhá
JESTLIŽE Délka-fronty JE Střední A Intenzita-dopravy JE Velmi-velká POTOM Délka-signálu JE Dlouhá
JESTLIŽE Délka-fronty JE Střední A Intenzita-dopravy JE Krizová POTOM Délka-signálu JE Velmi-dlouhá
JESTLIŽE Délka-fronty JE Velká A Intenzita-dopravy JE Malá POTOM Délka-signálu JE Střední
JESTLIŽE Délka-fronty JE Velká A Intenzita-dopravy JE Střední POTOM Délka-signálu JE Dlouhá
JESTLIŽE Délka-fronty JE Velká A Intenzita-dopravy JE Velká POTOM Délka-signálu JE Velmi-dlouhá
JESTLIŽE Délka-fronty JE Velká A Intenzita-dopravy JE Velmi-velká POTOM Délka-signálu JE Velmi-dlouhá
JESTLIŽE Délka-fronty JE Velká A Intenzita-dopravy JE Krizová POTOM Délka-signálu JE Maximální
JESTLIŽE Délka-fronty JE Velmi-velká A Intenzita-dopravy JE Malá POTOM Délka-signálu JE Dlouhá
JESTLIŽE Délka-fronty JE Velmi-velká A Intenzita-dopravy JE Střední POTOM Délka-signálu JE Velmi-dlouhá
JESTLIŽE Délka-fronty JE Velmi-velká A Intenzita-dopravy JE Velká POTOM Délka-signálu JE Maximální
JESTLIŽE Délka-fronty JE Velmi-velká A Intenzita-dopravy JE Velmi-velká POTOM Délka-signálu JE Maximální
JESTLIŽE Délka-fronty JE Velmi-velká A Intenzita-dopravy JE Krizová POTOM Délka-signálu JE Maximální

### 17.3. Výpočet délky zeleného signálu

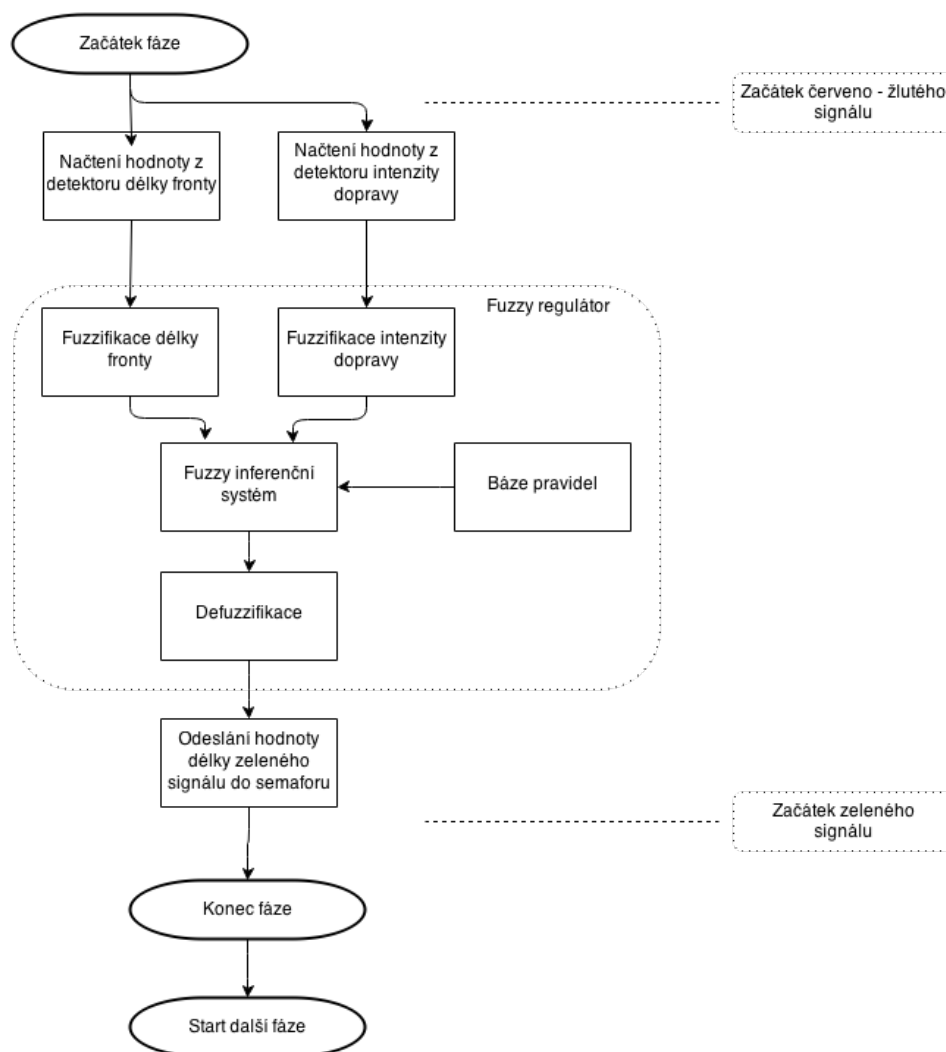
Při určování délky časového intervalu zeleného signálu je podstatné nejen prodloužení doby zeleného signálu, ale i jeho zkrácení. Pokud se před křižovatkou vytvoří dlouhá fronta vozidel je potřeba dobu zeleného signálu prodloužit na dostatečnou hodnotu, tak aby mohlo projet co nejvíce vozidel a netvořila se tak zbytečně velká fronta. Pokud se v okolí křižovatky ovšem nebude vyskytovat velké množství vozidel, je nutné, aby délka časového intervalu zeleného signálu byla co nejmenší. Tím se zkrátí délka časového intervalu jedné fáze a mohou být obslouženy další směry v křižovatce. V tabulce 17.3 jsou zobrazeny příklady délek zeleného signálu při určité délce zeleného signálu a intenzitě dopravy. Větší prioritu zde má délka fronty, tak aby nedocházelo k velkému zdržení vozidel a fenoménu zpětné fronty. Tyto hodnoty byly dále porovnávány se simulací pomocí pevného signálního plánu.

Tabulka 17.2: Příklady časů zeleného signálu

Délka fronty [m]	Intenzita dopravy [voz/hod]	Doba zeleného signálu [s]
50	100	17,5
70	100	23,7
120	100	38,7
70	200	38,7
100	200	47,5
150	250	56.1

### 17.4. Návrh fuzzy regulátoru

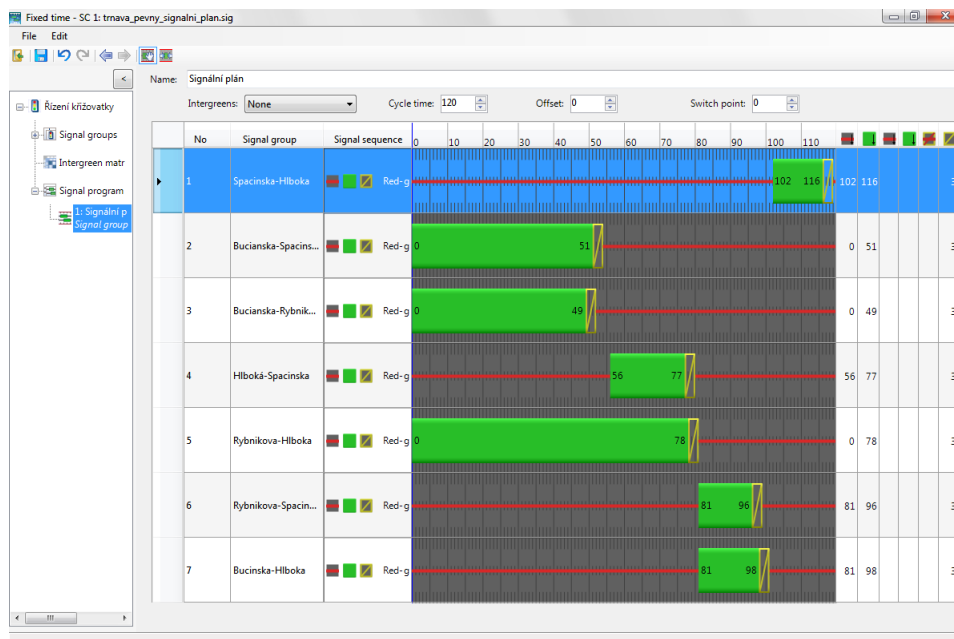
Na obrázku 17.5 je zobrazen diagram, který pomocí fuzzy regulátoru určuje délku časového intervalu zeleného signálu. Vissim nemá funkční logiku pro fuzzy regulátor. Proto by pod tímto prvkem musel být podprogram, který by rozložil fuzzy logiku na elementární matematiku, která by se poté dala naprogramovat s běžnými algoritmy. Funkce řízení křižovatky je závislá na detektorech umístěných v okolí křižovatky, které dokáží sbírat data o aktuální dopravní situaci. Jedná se o detektor délky fronty a intenzity dopravy. Tento detektor(y) poskytuje reálné hodnoty (například 100 metrů délky fronty a 200 vozidel za hodinu), které vstupují do fuzzy regulátoru. Ve fuzzy regulátoru se tato data zpracují a výsledná reálná hodnota časového intervalu délky zeleného signálu se odešle do semaforu, který nastaví časovač na tuto hodnotu. Celý proces netrvá déle než dvě sekundy, proto je možné spustit fuzzy regulátor během červeno-žlutého signálu a nastavit tak hodnotu časového intervalu zeleného signálu podle aktuálních dopravních podmínek.



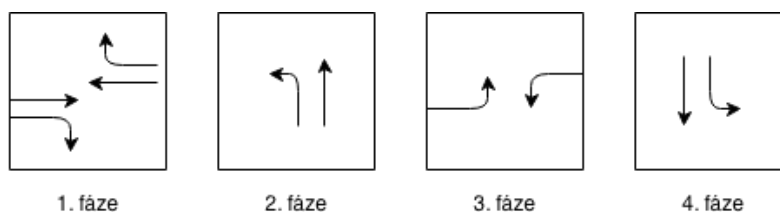
Obrázek 17.5: Diagram řízení křižovatky pomocí fuzzy regulátoru

## 17.5. Fuzzy řízení křižovatky

Pro získání základních informací o reálném chování křižovatky, byla vytvořena simulace řízení křižovatky pomocí fixního signálního plánu, který je aktuálně na křižovatce používán. Na obrázku 17.6 je znázorněn signální plán, který byl vytvořen na základě délky časového intervalu zeleného signálu semaforu. Pořadí fází, který tento plán vytvoří je na obrázku 17.7. Pomocí tohoto signálního plánu byla simulována křižovatka.



Obrázek 17.6: Pevný signální plán



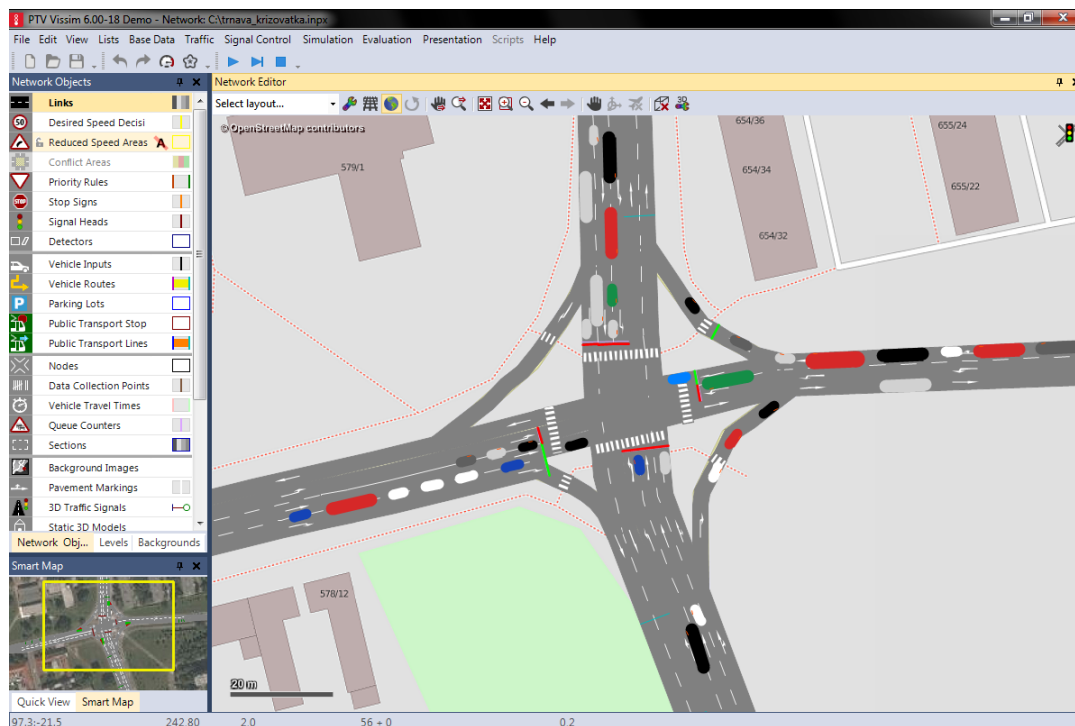
Obrázek 17.7: Pořadí fází

Simulace trvala 600 simulačních sekund, kde jedna simulační sekunda je deset reálných sekund. Celkově simulace trvala reálných 100 minut provozu a proběhlo 50 cyklů všech fází. Detektory pro měření délky fronty jsou umístěné v každém směru do křižovatky, těsně před hranicí semaforu. Intenzita provozu je nastavena na 700 vozidel za hodinu pro celý průběh simulace a pro všechny směry. Složení dopravy bylo nastaveno na 70 % automobilu, 20 % nákladních vozidel a 10 % autobusů. V jednom směru bylo nastaveno procentní zastoupení vozidel, které odbočí vlevo či vpravo, a které pojedou rovně, na základě přepočtu, kolika procenty se každý směr podílí na odjezdovém směru (Tabulka 16.1). V datech není možné určit do jakého směru vozidlo jelo, pouze z jakého směru vozidlo ke křižovatce přijelo a kolik vozidel z křižovatky odjelo. Velký vliv na délku fronty má vzdálenost odkud auta v simulaci vyjždí, respektive jaká je vzdálenost vstupu vozidel od hranice křižovatky. Vzdálenost mezi semaforu a vstupem vozidel je 200 metrů. Maximální délka fronty, která v simulaci dosahuje zmíněných 200 metrů, je způsobena hlavně fenoménem zpětné fronty. Průměrná délka fronty ve směru Rybníková je 95 metrů, ve směru Špačinská 50 metrů, ve směru Bučianska 40 metrů a ve směru Hlboká 35 metrů. Hodnoty vyjadřují průměrnou délku fronty v rámci celé simulace. Pro fuzzy řízení



křižovatky je ovšem podstatná aktuální délka fronty. Ta vstupuje i do výpočtu průměrné délky fronty.

Při simulaci (Obrázek 17.8) docházelo k dvěma závažným problémům při řízení křižovatky. První a vážnější problém byl, že semafor s pevným signálním plánem nemůže reagovat na délku fronty. Tím vznikla fronta 150 metrů dlouhá v ulici Rybníková v jízdním pruhu pro odbočení vlevo. Semafor pro odbočení vlevo má délku časového intervalu zeleného signálu jen patnáct sekund. Tím bylo odbaveno jen sedm vozidel (přibližně 50 metrů z fronty). Fuzzy regulátor by délku časového intervalu zeleného signálu nastavil na 56,674 sekundy, čímž by bylo odbaveno až 210 metrů fronty. Tím by se odbavila celá fronta a pokryla by se i část nově přijíždějících vozidel. Tímto nastavením delšího času zeleného signálu, by byly posunuty ostatní fáze. Protože načtení a vyhodnocení dopravní situace dochází těsně před zeleným signálem, byla by situace na další fázi, kde by se vytvořila delší fronta než v případě použití pevného signálního plánu, vyřešena prodloužením doby zeleného signálu tak, aby bylo kompenzováno prodloužení předešlé fáze. Druhý závažný problém při simulaci vznikl, kdy délka časového intervalu zeleného signálu byla nepřiměřeně dlouhá. Tím vznikla situace, kdy 1. fáze (viz Obrázek 17.7) ze směru Bučianska, která má délku časového intervalu zeleného signálu 49 sekund, blokovala ostatní fáze i přesto, že se nevytvořila dostatečná fronta na to, aby musela být obsluhována 49 sekund. Fuzzy regulátor by vyhodnotil situaci tak, že vytvořené padesáti metrové frontě by nastavená délka časového intervalu zeleného signálu patnácti sekund stačila na projetí většiny vozidel. Zrychlení změn fází by umožnilo rychlejší odbavení dalších fází, ve kterých se vytvořila fronta. Tím by bylo dosaženo odpovídající optimalizace provozu na křižovatce v Trnavě. Došlo by tak nejen ke snížení průměrné i maximální délky fronty, zkrácení čekací doby na průjezd křižovatkou, ale i snížení škodlivých látek produkované vozidly či snížení nervozity řidičů.



Obrázek 17.8: Simulace křižovatky v Trnavě

## 18. Kód fuzzy regulátoru

Fuzzy regulátor byl vytvořen v programu Octave. Následující kód lze použít i v prostředí Mathworks MATLAB. V části kódu [System] jsou definovány vlastnosti fuzzy inferenčního systému, podle kterého bude probíhat následná defuzzifikace, počet vstupních a výstupních parametrů a počet pravidel. V kódu následuje [Input1], [Input2] a [Output1] kde jsou nadefinované tvary a rozsahy funkcí příslušností pro vstupní a výstupní parametry řízení. V poslední části [Rules] jsou indexově znázorněny podmínky, které tvoří bázi pravidel. První číslo značí první vstupní parametr (délku fronty), druhé číslo oddělené mezerou vyjadřuje druhý vstupní parametr (intenzitu dopravy) a číslo za čárkou označuje index výstupního parametru (délka časového intervalu zeleného signálu). Číslo v závorce udává váhu příslušné podmínky. Poslední číslo za dvojtečkou popisuje spojovací argument mezi pravidly. Jednička znamená A (anglicky AND) a dvojka NEBO (anglicky OR).

```
[System]
Name='Fuzzy_regulator_Trnava'
Type='mamdani'
Version=2.0
NumInputs=2
NumOutputs=1
NumRules=20
AndMethod='min'
OrMethod='max'
ImpMethod='min'
AggMethod='max'
DefuzzMethod='centroid'

[Input1]
Name='Délka-fronty'
Range=[0 200]
NumMFs=4
MF1='Malá':'trimf',[-1 0 50]
MF2='řStední':'trimf',[0 50 100]
MF3='Velká':'trimf',[50 100 150]
MF4='Velmi-velká':'trapmf',[100 150 200 201]

[Input2]
Name='Intenzita-dopravy'
Range=[0 700]
NumMFs=5
MF1='Malá':'trimf',[-1 0 100]
MF2='řStední':'trimf',[0 100 200]
MF3='Velká':'trimf',[100 200 300]
MF4='Velmi-velká':'trimf',[200 300 400]
MF5='Krizová':'trapmf',[300 400 700 701]
```

```
[Output1]
Name='Délka-signálu '
Range=[5 60]
NumMFs=5
MF1='Krátká':'trimf',[0 5 15]
MF2='řStední':'trapmf',[5 15 20 30]
MF3='Dlouhá':'trapmf',[20 30 35 45]
MF4='Velmi-dlouhá':'trapmf',[35 45 50 60]
MF5='Maximální':'trimf',[50 60 61]
```

```
[Rules]
1 1, 1 (1) : 1
1 2, 1 (1) : 1
1 3, 2 (1) : 1
1 4, 2 (1) : 1
1 5, 3 (1) : 1
2 1, 1 (1) : 1
2 2, 2 (1) : 1
2 3, 3 (1) : 1
2 4, 3 (1) : 1
2 5, 4 (1) : 1
3 1, 2 (1) : 1
3 2, 3 (1) : 1
3 3, 4 (1) : 1
3 4, 4 (1) : 1
3 5, 5 (1) : 1
4 1, 3 (1) : 1
4 2, 4 (1) : 1
4 3, 5 (1) : 1
4 4, 5 (1) : 1
4 5, 5 (1) : 1
```

## Reference

- BEATY, William. Traffic Jams: The Physics Behind Traffic Jams. Smartmotorist [online]. 2008 [cit. 2014-08-16]. Dostupné z: <http://www.smartmotorist.com/traffic-and-safety-guideline/traffic-jams.html>
- HIGGS, Bryan, Montasir M. ABBAS a Alejandra MEDINA, 2011. Analysis of the Wiedemann Car Following Model over Different Speeds using Naturalistic Data [online]. s. 1–22 [cit. 2014-05-08]. Dostupný z: <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/conferences/2011/RSS/3/Higgs,B.pdf>
- KOVÁČIKOVÁ, Lucia a Tatiana BLANÁROVÁ, 2008. Generálny dopravný plán mesta Trnava [online]. 2008. Dostupný z: [http://www.trnava.sk/userfiles/download/attachment/ourak\\_GDP\\_2\\_Textovaca-st.pdf](http://www.trnava.sk/userfiles/download/attachment/ourak_GDP_2_Textovaca-st.pdf)
- SUGIYAMA, Yuki, Minoru FUKUI, Macoto KIKUCHI, Katsuya HASEBE, Akihiro NAKAYAMA, Katsuhiko NISHINARI, Shin-ichi TADAKI a Satoshi YUKAWA, 2008. Traffic jams without bottlenecks - experimental evidence for the physical mechanism of the formation of a jam. *New Journal of Physics* [online]. roč. 10, č. 3, s. 7 [cit. 2014-13-08]. ISSN 1367-2630. Dostupný z: [doi:10.1088/1367-2630/10/3/033001](https://doi.org/10.1088/1367-2630/10/3/033001)
- Trnava. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-07-30]. Dostupné z: <http://sk.wikipedia.org/wiki/Trnava>

## 19. Diskuze

Z výše uvedeného textu vyplývá, že použití fuzzy logiky je za určitých okolností účinnější, nežli řízení křižovatky s pevným signálním plánem, nebo dopravou podmíněné (VA) řízení. Fuzzy řízení je účinnější a robustnější řešení zejména v situacích, kdy křižovatkou v rámci dne projíždí nerovnoměrné počty aut (například ranní, odpolední a večerní špička). Ve městech ovšem ve většině případů nebývá jen jedna křižovatka řízená světelným signalizačním zařízením (SSZ). Pokud by se fuzzy řízení reálně aplikovalo, bylo by tak vhodné rozšířit fuzzy řízení i na ostatní křižovatky. Každý semafor by ovšem musel komunikovat s ostatními semaforů, které jsou s ním přímo spojené. Tím by vznikla ve městě propojená síť komunikujících semaforů, která by dokázala výrazně omezit tvorbu dopravních zácp a zvýšit plynulost provozu (vytvoření tzv. zelené vlny na městském okruhu, která při pevném signálním plánu málo kdy splňuje předurčené cíle).

Příklad fungování dvojice semaforů může být následující. První semafor při fázi jedna (zelený signál) zašle zprávu dalšímu semaforu v daném směru s informací, že se k němu blíží určitý počet vozidel. Podle vzdálenosti a průměrné rychlosti je možné odhadnout příjezd těchto aut k druhému semaforu. Druhý semafor na základě těchto informací ovlivní své řízení a nastaví větší prioritu danému směru tak, aby eliminoval vznik fronty, kterou by bylo složité obsloužit.

Ve velkých městech se fuzzy řízení nabízí jako vhodný systém pro omezení dopravních komplikací zapříčiněných neoptimálním fungováním (nemožností se adaptovat aktuálním dopravním podmínkám) světelných signalizačních zařízení. Vyžaduje to ovšem velmi komplexní a složitý návrh funkční logiky a zatím poměrně vysoké finanční náklady na pořízení detekčního zařízení v okolí křižovatek. Jak ovšem v budoucnu začne přibývat počet křižovatek s fuzzy řízením, bude k jejich vzájemnému propojení mnohem jednodušší cesta.

Novým pojmem při správě města je přístup nazývaný Smart Cities (chytrá města). Tento přístup se snaží zefektivnit využívání zdrojů. Jedním z předních propagátorů tohoto principu je IBM s projektem Smarter Planet. Při investování do tvorby chytrých měst se tak klade důraz zejména na využívání nových technologií (např. WiFi, GPS, detektory, kamery) a na účinnější využívání informací. To povede k zpříjemnění života ve městě a k celkovému snížení znečišťování přírody (snížení spotřeby, ...). Více informací k chytrým městům lze nalézt například na stránkách firmy IBM, která je jedním z předních propagátorů tohoto principu (projekt Smarter Planet, Smarter Cities). Fuzzy řízení dopravy se řadí mezi technologie, které bude v budoucnu možné využít ke zlepšení dopravy a tím podpořit budování Smart Cities.

Pochopení dopravních principů a zákonitostí je velmi složité a navrhnutí fungující křižovatky s robustním světelným signalizačním zařízením je při nespočtu pravidel, nařízení a omezení velmi složité a brání nasazení takových systémů do skutečného provozu. Nehledě na jeho finanční náročnost, který vyžaduje několik detektorů pro jednu křižovátku, navrhnutí fuzzy řízení a jeho následnou aplikaci. Mnohé studie ovšem ověřily, že tento systém podstatnou měrou zvyšuje plynulost provozu. Je předpokládáno, že se tím sníží znečištění

ovzduší zplodinami z vozidel, hluk a v neposlední řadě i stres řidičů.

V posledních pár letech přistupují větší města k zavádění nízkoemisních zón. Proslulé je v tomto směru Německo, které nízkoemisní zóny začalo vytvářet jako jedna z prvních zemí. Studie ovšem poukázaly na skutečnost, že rozdíl v množství emisí před a po zavedení emisních zón není tak rapidní, jak bylo předpokládáno, a že několikamilionové investice se nikterak neprojevily ve zlepšení ovzduší. Vhodnějším řešením (místo zavádění dalších omezení v provozu vozidel) je snaha o eliminaci produkce škodlivých látek. Jedná se zejména o čas, kdy vozidlo stojí a motor běží na volnoběžné otáčky. V tomto stavu má motor nejnižší účinnost spalování a množství gramů CO<sub>2</sub> na ujetý kilometr se šplhá vysoko nad povolené limity. Řešením může být systém start-stop<sup>7</sup>, který je instalován do nových aut a který může snížit množství škodlivých látek uniklých do ovzduší. Dalším (komplexnějším) řešením problému je vyřešení průjezdnosti městem a tím minimalizování počtu zastávek vozidel.

Dalším vývojem případové studie ve městě Trnava by bylo rozšíření fuzzy regulátoru o fuzzy regulátor fází. Ten by doplňoval řízení délky časového intervalu zeleného signálu o možnost volby směru, který má být upřednostněn před ostatními tak, aby se netvořily v tomto směru fronty. Po rozšíření fuzzy řízení ve městě Trnava by se naskytla možnost propojení těchto křižovatek do komplexního systému dopravního řízení.

---

<sup>7</sup><http://www.autoforum.cz/technika/system-start-and-stop-nikdo-ho-nechce-vsichni-ho-maji>

## 20. Závěr

Předložená diplomová práce se zabývala problematikou fuzzy množin a fuzzy logiky a možnostmi jejich využití v oblasti řízení křižovatek. Práce uceleně uvedla možnosti využití fuzzy teorie a logiky pro řízení dopravy a možnosti jejího využití v komplexních systémech. Výsledky práce ukázaly, jakým způsobem je možné pomocí fuzzy logiky dosáhnout zlepšení průjezdnosti křižovatek, což při správném použití může umožnit kontrolovat dopravu ve velkých městech, kde je předpokládán vyšší provoz.

V teoretické části byly uceleně popsány základy fuzzy logiky, včetně fuzzy regulace, příkladů operací s fuzzy množinami, funkcí příslušností a fuzzy čísel. Dále byly shrnuty informace o fuzzifikaci, bázi pravidel, základních inferenčních systémech a defuzzifikaci. Ve druhé části teorie byla nastíněna pravidla pro řízení dopravy, konkrétně izolované křižovatky. Byly popsány normy a doporučení k řízení křižovatek se světelným signalizačním zařízením, základní charakteristiky dopravní situace a typy senzorů pro detekci vozidel.

V rešeršní části bylo popsáno devět světových případových studií, které se zabývají řízením křižovatky pomocí fuzzy regulátorů. Studie byly chronologicky seřazeny od roku 1996 (projekt FUSICO) až po případovou studii prof. Zainoiya Stotskoa z roku 2013. Každá studie přistupovala k problému řízení křižovatky pomocí fuzzy regulátoru jiným způsobem. Bylo zde ovšem dokázáno, že fuzzy regulace má oproti běžným metodám velký výkonnostní náskok. Nejhorší výsledky vždy mělo řízení pomocí pevného signálního plánu. Jediný případ, kdy bylo vhodné použít pevný signální plán byly situace, kdy přes křižovatku projížděly konstantní počty vozidel. Tím by bylo možné signální plán nastavit tak, aby pracoval efektivně a za velmi nízkou pořizovací cenu. Lépe, než řízení pevným signálním plánem, si vedlo řízení na základě dopravní situace (VA). Toto řešení vyžaduje, aby v okolí křižovatky byly rozmístěny detektory vozidel. Za normálních podmínek si tento systém vedl velmi dobře. Ovšem pokud nastala nenadálá událost (například nehoda v křižovatce), řízení selhávalo a v okolí křižovatek se tvořili fronty vozidel. V porovnání s předchozími systémy si nejlépe vedlo řízení křižovatky pomocí fuzzy regulace, kdy za jakýchkoli podmínek, pokud byla fuzzy regulace správně nastavena, nenastávaly žádné komplikace (ani při vzniklé nehodě). Fuzzy regulátor zajišťoval plynulý provoz, snížil dopravní fronty, snížil čekací čas vozidel v křižovatce a z toho plynoucí snížení emisí a stresů řidičů. Fuzzy regulátor se dokázal nejlépe adaptovat na špičky v intenzitě dopravy a tím zvýšit kapacitu křižovatky.

Případová studie ve městě Trnava (Slovensko) popsala kroky potřebné k vytvoření fuzzy regulátoru a navržení simulace křižovatky v programu PTV Vissim. Vytvořená simulace v programu Vissim využívala pevného signálního plánu, na kterém byla demonstrována nevhodnost pevného signálního plánu při velmi zatížené křižovatce. Ten způsoboval, že jeden směr měl zelený signál aniž by jím projížděla vozidla, kdežto ve druhém směru se tvořila několik desítek metrů dlouhá fronta. Vytvořený fuzzy regulátor v programu Octave pracoval s aktuální délkou fronty a aktuální intenzitou dopravy a jako výsledek vracel délku časového intervalu zeleného signálu přímo v sekundách. Délka fronty byla omezena na 200 m a intenzita byla omezena na 700 vozidel



za hodinu. Při maximálních hodnotách délky fronty a intenzity vozidel, nastavil fuzzy regulátor maximální časový interval zeleného signálu na 60 sekund. Z principu fungování Mamdani inferenčního systému nebyla maximální nastavená doba 60 sekund nikdy dosažena, ale velmi se k ní blížila. Fuzzy regulátor řešil dva vzniklé problémy při simulaci křižovatky. První problém byl, že nastavený pevný časový interval pro zelený signál byl moc dlouhý, a i když neprojížděla vozidla, byly ostatní směry zablokovány. Fuzzy regulátor tento problém řešil nastavením kratšího časového intervalu zeleného signálu, minimálně však pět sekund. Druhý problém nastal, pokud nastavený pevný interval zeleného signálu byl nastaven na krátkou dobu a vytvořená fronta nestačila opustit křižovatku. Fuzzy regulátor vyřešil tuto vzniklou situaci lépe, protože během červeno-žlutého signálu (dvě sekundy před zeleným signálem) zjistil délku fronty a intenzitu dopravy a nastavil časový interval zeleného signálu přesně pro potřeby dopravní situace.

Propojením více křižovatek pomocí fuzzy řízení tak, aby komunikovaly mezi sebou (a ideálně i s řidiči), přispěje k eliminaci dopravních zácp a snížení celkového času na průjezd městem. Fuzzy řízení je tak jedním z přístupů, které mohou z pohledu řízení dopravy dopomoci k vytvoření takzvaných chytrých měst (Smart Cities).

## Summary

Presented diploma thesis focused on problems related to fuzzy sets and fuzzy logic and their possible usage in crossroad traffic control systems. Thesis thoroughly describes possible application of fuzzy theory and logic for traffic control systems and within complex systems. Results of this thesis demonstrates the way how it is possible to use fuzzy logic to reach significant improvement in traffic capacity of crossroads. This could allow to control a traffic in big cities, if fuzzy logic is used in the right way.

Diploma thesis was divided into three parts. First part described basic of fuzzy logic, which included fuzzy control, examples of fuzzy sets operations, membership functions and fuzzy numbers. Then fuzzyfication, rule base, inference systems and defuzzyfication were defined. In the second section of theory part basic rules for traffic control, especially for crossroads were described. Finally, standards and recommendation for control traffic intersection with signal light devices, basic characteristics about traffic conditions and detectors types for vehicle recognition were presented.

Second part of thesis described nine world papers, which concern with fuzzy logic traffic signal control of intersection. Papers was chronologically arranged from 1996 (project FUSICO) to 2013 when prof. Zainoiy Stotsko presented his paper about simulation of signalized intersection functioning with fuzzy control algorithm. Each paper had different approach of how to deal with fuzzy control of intersection. However, in all papers was proved, that fuzzy logic traffic signal control of intersection has very big performance advantage. Traffic control with fixed-time plan always took the worst results. A traffic control with fixed-time plan give good results only in case, when fixed number of vehicles drive through intersection. In that case a fixed-time control is cheaper and sufficient way how to control intersection. Better then fixed-time control was vehicle-actuated control (VA), which could deal with unbalanced traffic conditions very well. But, if unexpected traffic conditions were created, for example an accident, this approach failed too. Only fuzzy controller was able to deal with unexpected, unbalanced traffic conditions and still provided smooth traffic flow, low traffic queues. As a consequent of that it is possible to reach lower air pollution or lower drivers stress. Fuzzy logic traffic signal controller was able adapt to traffic rush hour and rose intersection's capacity.

Third part of thesis was case study on city Trnava in Slovakia. Case study described necessary steps for creation of fuzzy traffic controller and design intersection simulation in PTV Vissim software. Created simulation in Vissim used with fixed-time signal plan for control of intersection. It was demonstrated that fixed-time signal plan for control intersection was unsuitable for heavy intensity of traffic flow. Fixed-time signal plan caused that one way had green signal without any vehicle passed and other way had red signal with increasing queues. Created fuzzy control in Octave software worked with actual queue length, actual traffic intensity and as result fuzzy controller returned time interval for green signal in seconds. Minimum time interval for

green time was five seconds and maximum was 60 second. Fuzzy controller solved two basic problem. First problem was that time interval of green signal was too long, and within green signal was not passed any vehicles. Second problem was that time interval for cleared time for queue was too short and queue did not pass through intersection. That caused a very long queues. Next step for future work will be second fuzzy controller for phase sequence. That will be next big step to increase efficiency of fuzzy traffic controller of intersection.

It is possible to eliminate traffic jams or decrease time needed for drive through a city, when many traffic controllers based on fuzzy logic are interconnected to complex system, where every controller communicate to each other (and possibly with drivers too). Fuzzy control systems is one approach which can help (from a transportation point of view) to build a Smart Cities.