



Akademie věd České republiky
Ústav teorie informace a automatizace, v.v.i.

Academy of Sciences of the Czech Republic
Institute of Information Theory and Automation

VÝZKUMNÁ ZPRÁVA

Koukol M.

**Přehled současných vědeckých a aplikačních výsledků
v řízení světelné signalizace
pomocí fuzzy logiky**

Výzkumná zpráva

č. 2327

prosinec 2012

TA01030603

Abstrakt

Zpráva popisuje základní principy fuzzy přístupu k řízení světelných signalizačních zařízení na pozemních komunikacích, podává přehled publikované literatury a vysvětluje postup implementace jednoduchého fuzzy systému řízení v rámci mikrosimulačního software PTV VISSIM.

Klíčová slova: fuzzy řízení, světelné signalizační zařízení, dopravní řízení, mikrosimulace, PTV VISSIM.

Seznam zkratek:

SSZ	Světelné signalizační zařízení
SCOOT	Split Cycle Offset Optimisation Technique
SCATS	Sydney Coordinated Adaptive Traffic System
HUTSIM	Helsinki University of Technology Simulator
FUSICO	Fuzzy Signal Control
PI	Performance Index
MATLAB	Matrix Laboratory
GUI	Graphical User Interface
VISSIM	Verkehr In Städten SIMulationsmodell
VAP	Vehicle Actuated Programming
VisVAP	Visualization Vehicle Actuated Programming
COG	Centre of Gravity
COA	Centre of Area
MOM	Middle of Maxima
COS	Centre of Sum
CAM	Centre Average Method
SOM	Smallest of Maximum
FOM	First of Maximum

Obsah

Seznam zkratk:.....	1
1. Aplikace fuzzy logiky v systému řízení SSZ	3
2. Fuzzy systém řízení SSZ v aplikaci PTV VISSIM	27
1. Závěr	33
Citovaná literatura.....	34

1. Aplikace fuzzy logiky v systému řízení SSZ

Jedním z podoborů matematické logiky je tak zvaná *fuzzy logika*, která vychází z teorie fuzzy množin. Fuzzy logiku můžeme česky pojmenovat například mlhavá logika (fuzziness = mlhavost). U klasické výrokové logiky (angl. *crisp logic*) používáme pojmy pravda, nepravda (stav 0 nebo 1), zatímco fuzzy logika výroky ohodnocuje tak zvanou *mírou pravdivosti*, což znamená, že může pracovat se všemi hodnotami z intervalu $\langle 0,1 \rangle$, kterých je nekonečně mnoho. Mohlo by se zdát, že míra pravdivosti je vlastně to samé, co pravděpodobnost (ta také nabývá hodnot z intervalu $\langle 0,1 \rangle$, v oblasti fuzzy množin ale míra pravdivosti vyjadřuje nejistotu výroku, zatímco pravděpodobnost je považována za míru nevědomosti). Hodnotu míry pravdivosti pro z z intervalu $\langle 0,1 \rangle$ pro nějaký výrok nazýváme *stupněm příslušnosti*. Čím vyšší stupeň příslušnosti, tím vyšší pravděpodobnost, že prvek patří do vybrané fuzzy množiny. Fuzzy množiny na rozdíl od klasických množin připouštějí i částečné členství. Nesmíme zapomenout zmínit, že stupeň příslušnosti je prvku přiřazen pomocí funkce příslušnosti.

Fuzzy logika nabízí jazyk s vlastní syntaxí a sémantikou, který nám umožňuje použití kvalitativně formulovaných zkušeností a znalostí o řešeném problému. Z podstaty věci patří fuzzy logika do vícehodnotové logiky, tzn. že, výroky vícehodnotové logiky nabývají více než dvou pravdivostních hodnot. Fuzzy logika a teorie fuzzy množin byla poprvé použita v roce 1965 L.A. Zadehem [1], tímto datem byl zahájen rozvoj modifikované teorie množin, kde fuzzy množiny jsou nástrojem pro matematický popis vágních a nepřesných dějů. V dalším článku [2] autor definoval tzv. princip inkompatibility: *"Roste-li složitost systému, klesá naše schopnost formulovat přesné a významné soudy o jeho chování, až je dosaženo hranice, za níž jsou přesnost a relevantnost prakticky vzájemně se vylučující charakteristiky"*. První aplikace fuzzy logiky se datuje rokem 1970, kdy E.H. Mamdani navrhl kontrolní systém pro turbíny [3]. Pro řadu reálných rozhodovacích úloh může být fuzzy logika vhodnější než logika klasická založená na booleovské logice, analytických modelech, ostré klasifikaci a deterministickém prohledávání. Záběr použití fuzzy logiky v různých regulačních systémech řízení je poměrně rozsáhlý – zmiňme například různé domácí spotřebiče (pračky, vysavače), automatizované řízení podzemní dráhy (Japonsko), řízení rychlovýtahů v mrakodrapu, řízení stavebních pozemních strojů (rypadla, lesní stroje), automobilový průmysl (ABS, převodovky) atd. [4].

Recenze se soustřeďuje pouze na aplikaci fuzzy řídicí logiky v automatickém řízení světelného signalizačního zařízení (SSZ). Nesmíme ale opomenout fakt, že fuzzy logika našla uplatnění, v mnoha dalších dopravně inženýrských úlohách (více viz [5], [6]).

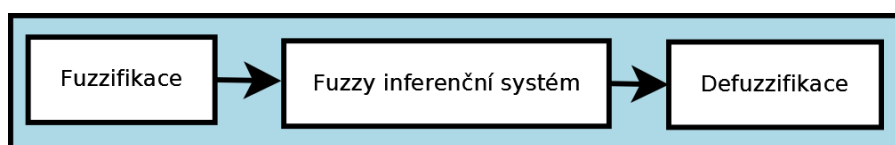
Základní otázkou je, proč jsme vlastně motivovaní aplikovat fuzzy logiku k řízení křižovatky se SSZ. Výše jsme uvedli, že fuzzy logiku lze použít jako nástroj pro matematický popis vágních či přesně nepopsatelných dějů. A právě z tohoto důvodu, lze fuzzy logiku úspěšně použít jako nástroj pro řízení signálního plánu křižovatky. Existuje zde totiž způsob, jak jazykovou řídicí strategii (vyjádřenou pomocí *IF, THEN, ELSE, END*) převést do řídicího algoritmu. Fuzzy logika má tu vlastnost, že dokáže „porozumět“ jazykovým instrukcím a ty přenést do zmíněné kontrolní strategie založené na verbální komunikaci. Motivací pro návrh a použití fuzzy systému řízení je přímá souvislost mezi jazykovým

výrazem regulační strategie a možným ručním řízením SSZ: např. policista řídící SSZ a odhaduje délku kolony vozidel ve smyslu velmi krátká, středně krátká, krátká atd. Fuzzy logika nám nabízí jazyk s vlastní syntaxí a sémantikou, který nám umožňuje bezprostřední použití kvalitativně formulovaných zkušeností a znalostí o řešeném problému. Je ale zřejmé, že pro vytváření řídicího vstupu je nutná určitá odborná znalost a zkušenosti s návrhem světelné signalizace pro úroňovou křižovatku.

Před vlastní recenzí si pro celkové pochopení řešené problematiky vysvětlíme několik pojmů, (definic) fuzzy logiky a fuzzy množin. První si definujeme tři základní procesy fuzzy logiky:

- Proces fuzzifikace – přiřazování naměřených („ostrých“) hodnot vstupních veličin do fuzzy množin pomocí funkce příslušnosti.
- Fuzzy inferenční systém – vyhodnocení rozhodovacích pravidel. V Inferenčním mechanismu můžeme použít např. metodu fuzzy logická dedukce (použití pravidel *IF, THEN, ELSE*). Dále si v souvislosti s aplikací fuzzy inferenčního systému zavedme definici Mandamihovo implikace - funkce příslušnosti výstupní množiny je dána sjednocením oříznutých funkcí příslušnosti vstupních množin (grafické znázornění **Obr. 8**).
- Proces defuzzifikace – má za úkol přiřadit výstupní fuzzy množině definovanou ostrou výstupní akční veličinu (akční zásah, cílová veličina řízení atd.). Pro určení ostré hodnoty akční veličiny lze použít několik metod: Metoda středu plochy COA (těžiště - COG), Metoda středu součtů COS, Metoda průměrů středů CAM, Metoda prvního maxima FoM (SoM), Metoda středu maxima MoM.

Uvedené procesy jsou ve fuzzy řídicím systému použity v předepsaném sledu dle **Obr. 1**.

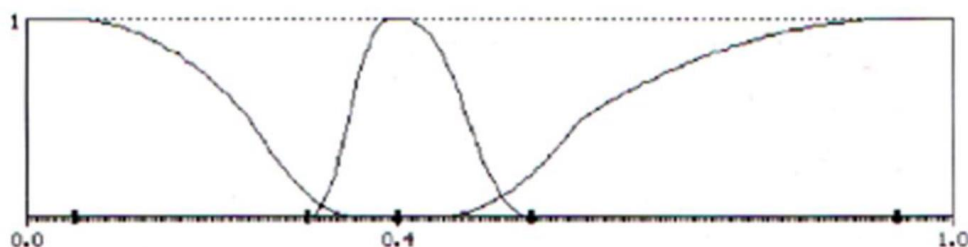


Obr. 1. Základní blokové schéma fuzzy řídicího systému

Pokud se na problematiku využití fuzzy aproximací a jejich vlastností pro řízení a regulaci podíváme z praktického hlediska, musíme dodržet následující postup [7]:

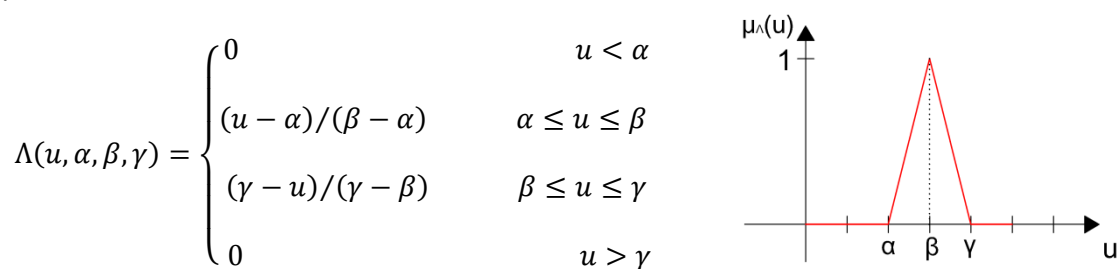
- Změřit vstupní veličiny.
- Zobrazit změřené veličiny ve vhodném měřítku na aplikovanou univerzu. Řečeno srozumitelněji: Zvolit mezní hodnoty na ose X tak, aby to odpovídalo realitě a systém dobře fungoval, v případě SSZ například měřit dopravní tok jako jv/min a maximum určit podle platných TP – tzv. „technických podmínek“ – a příjezdového modelu tak, aby bylo smysluplné.
- Přiřazení naměřené charakteristiky do fuzzy množiny pomocí funkce příslušnosti (fuzzifikace).
- Nalézt výstupní fuzzy množinu (fuzzy inferenční systém).
- Přiřadit-nalézt k výstupní množině vhodnou ostrou hodnotu akční veličiny (defuzzifikace).

Nyní se krátce věnujme popisu fuzzy množin. Fuzzy množiny slouží pro modelování sémantiky evaluačních jazykových výrazů. V oblasti fuzzy množin, se všeobecně uznává, že používané fuzzy množiny odpovídají jazykovým výrazům „malý, střední, velký“ – říkáme tomu základní evaluační trichotomie (třídění na tři části) [4]. Takto definované množiny by měly mít tvar znázornění na **Obr. 2**, kdy tyto tvary označujeme jako S^- , Π , S^+ (bráno zleva doprava).

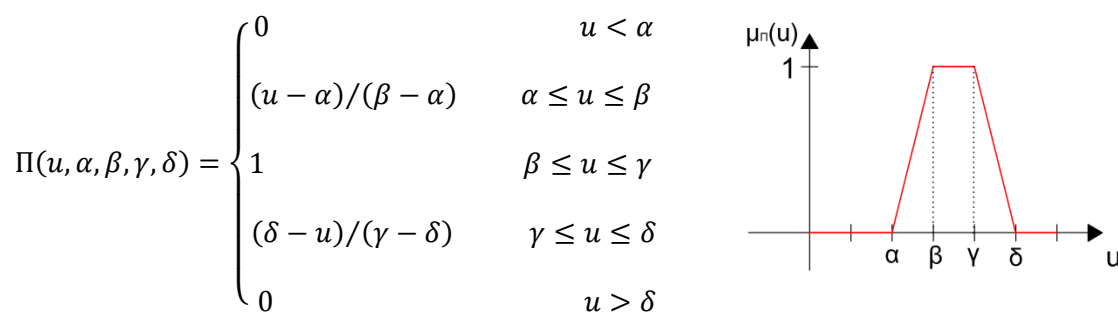


Obr. 2. Fuzzy množiny používané v modelech sémantiky základní evaluační trichotomie [4]

V praxi se přikláníme k určitému zjednodušení fuzzy množin. Výsledkem je použití trojúhelníkové nebo trapezoidní funkce příslušnosti. Je nutné zdůraznit, že použitím těchto funkcí příslušnosti dochází k hrubému zjednodušení. Fuzzy množiny Λ, Π totiž neodpovídají dostatečně dobře skutečnému významu jazykových výrazů. Pro přehlednost si uvedme definici těchto dvou po částech lineárních funkcí - Λ -funkce (funkce trojúhelníková), Π -funkce (funkce lichoběžníková). Důvodem je, že tyto funkce jsou nejčastěji používané v dopravně inženýrských úlohách při návrhu fuzzy řídicího systému.

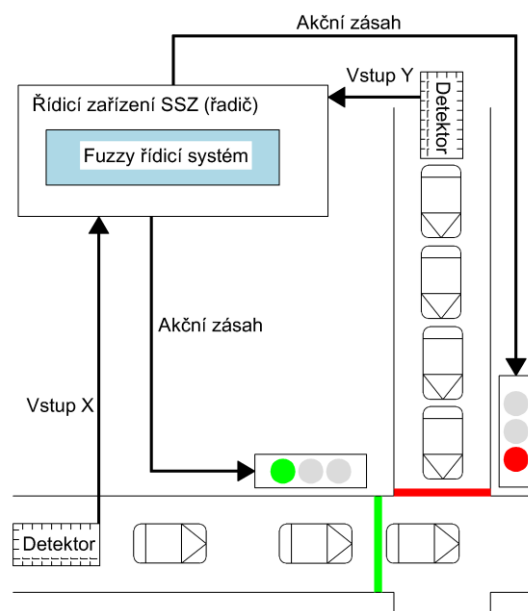


Obr. 3. Definice a průběh Λ funkce



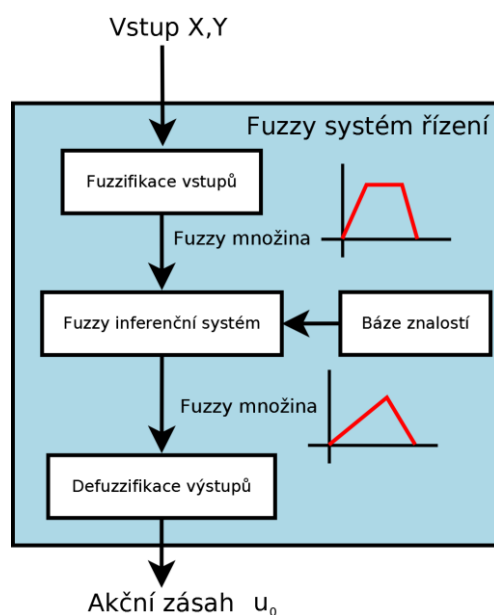
Obr. 4. Definice a průběh Π funkce

Na **Obr. 5** je znázorněno schéma křižovatky se SSZ obsahující fuzzy řídicí systém. Ve své podstatě se jedná o znázornění „klasického“ dynamického (automatického) řízení SSZ. Specialitou a zvláštností systému řízení je právě použití fuzzy logiky.



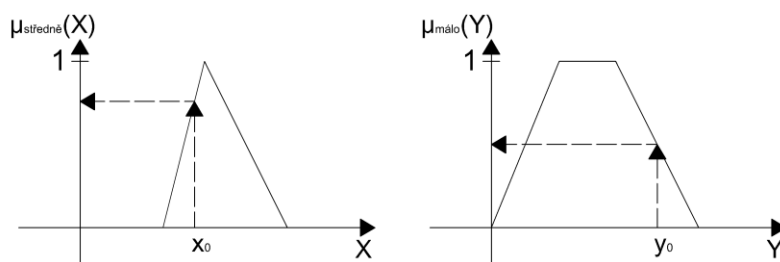
Obr. 5. Schematické znázornění řídicího systému SSZ s aplikací fuzzy logiky

Na následujících řádcích si detailně popíšeme „Fuzzy řídicí systém“ použitý pro řízení SSZ **Obr. 6.**



Obr. 6. Detailní zobrazení fuzzy řídicího systému

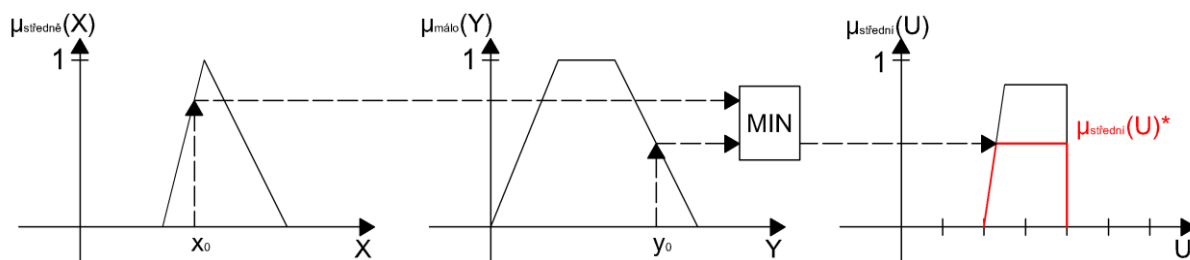
Prvním krokem je přiřazení naměřených vstupních charakteristik X, Y do fuzzy množiny pomocí funkce příslušnosti – proces fuzzifikace (fuzzifikace vstupů, grafické znázornění pro dvě vstupní hodnoty **Obr. 7**). Vstupní veličinou může celá řada dopravně inženýrských hodnot jakou je: intenzita, rychlosti vozidel, obsazenost detektorů, časový odstup vozidel nebo délka kolon.



Obr. 7. Grafické znázornění procesu fuzzifikace

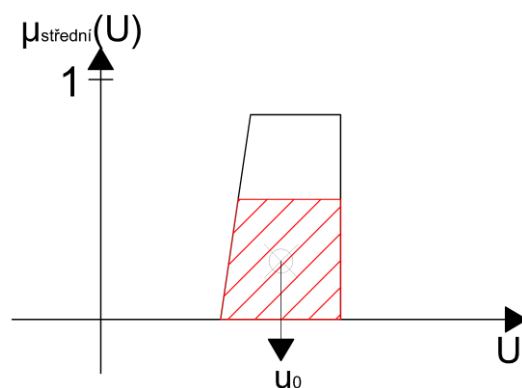
Druhým krokem je použití rozhodovacích pravidel – fuzzy inferenční systém. Fuzzy inferenční systém využívá bázi znalostí, jež obsahuje množinu pravidel *IF-THEN*. Bázi pravidel a bázi dat souhrnně nazýváme znalostní bázi („*knowledge base*“) fuzzy systému. V bázi dat jsou umístěny údaje o fuzzy množinách (jejich tvaru a poloze v univerzu) všech proměnných v systému. Báze pravidel obsahuje všechna pravidla fuzzy množiny. Na základě báze znalostí a změřených vstupních hodnot nezávisle proměnných se provede přibližná dedukce, jejímž výsledkem je výstupní fuzzy množina. Uvedme si příklad jednoho pravidla pro dvourozměrný příklad s použitím operátoru *AND* (Mamdaniho implikace). Grafické znázornění pravidla je ukázáno na **Obr. 8**.

IF (X je střední) AND (Y je málo) THEN (U je střední)



Obr. 8. Definování výstupní množiny pro jedno pravidlo a dvourozměrnou závislost

Výsledkem předešlého kroku je fuzzy množina. Z praktického hlediska ale potřebujeme, aby konečnou odpovědí fuzzy algoritmu byla jedna ostrá hodnota. Je proto nutné přiřadit výstupním lingvistickým proměnným ostrou hodnotu akční veličiny (cílová veličina řízení) v přípustném rozsahu. Proces, který transformuje, fuzzy množinu na konkrétní číslo nazýváme defuzzifikace („aproximace neostrých termů“), kde funkce příslušnosti výstupní množiny je dána sjednocením oříznutých funkcí příslušnosti vstupních fuzzy množin (Mamdaniho implikace).



Obr. 9. Grafické znázornění určení akční veličiny u_0

Nejpoužívanější metodou pro určení ostré hodnoty je metoda středu plochy COA (COG). Ostrou hodnotu akční veličiny u_0 určíme jako souřadnici těžiště plochy – lze také určit souřadnici těžiště plochy, která vznikla sjednocením dílčích ploch. U této metody nedochází k zohlednění překrytí funkcí, ze kterých se skládá výsledná funkce příslušnosti. Plocha překrytí je tedy započtena pouze jednou. Rovnice (1) platí pro funkci příslušnosti typu singleton a pro ostrou hodnotu platí:

$$u_0 = \frac{\sum_{j=1}^m u_j * \mu(u_j)}{\sum_{j=1}^m \mu(u_j)} \quad (1)$$

Tvar jedné funkce příslušnosti typu singleton je tvořen jednou ostrou svislou čarou na pozici slovní hodnoty. Tento tvar funkce příslušnosti používáme pouze pro výstupní veličiny. Důvodem pro tento tvar (svislá čára) je menší výpočetní náročnost při procesu defuzzifikace.

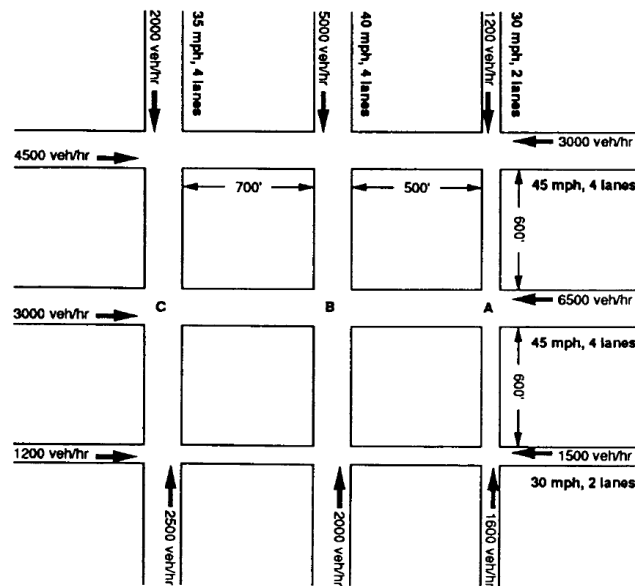
První známé použití fuzzy logiky v systému řízení SSZ představili v roce 1977 Pappis a Mamdani [8]. Autoři plynule navazují na svůj předešlý článek [3], kde byl řešen fuzzy algoritmus řízení pro parní turbínu. Publikace [8] popisuje teoretický model aplikace fuzzy řídicí logiky („fuzzy logic control – FLC“) na izolované křižovatce se SSZ. Autoři srovnávali jimi navržený fuzzy model řízení s adaptivním řízením SSZ s optimální délkou cyklu. Testované geometrické uspořádání bylo velmi jednoduché, jednalo se o dvě jednosměrné křižující se komunikace (*one way streets*). Vstupem do systému řízení jsou příjezdy vozidel [jv/hod], délka kolony [jv] a čas [s]. Pro proces fuzzifikace autoři využívají vícerozměrnou Mamdaniho implikaci [9]. Výstupem je prodloužení délky zelené (s) pro příslušnou fázi. Autoři si kladli za cíl minimalizovat časové zdržení vozidel. Výsledkem je, že fuzzy systém řízení vykazuje snížení časového zdržení vozidel o 10 až 21% než adaptivní řízení (detailně viz **Tab. 1**) a účinnost systému řízení není ovlivněna velikostí zatížení křižovatky. Bohužel se autoři u adaptivního řízení omezili pouze na konstatování, že se jedná o konvenční řešení dynamického řízení dopravního uzlu (není řešeno detailně).

N - S traffic (veh/hr)	E - W traffic (veh/hr)	Average overall delay (secs/veh)		Improvement %
		Vehicle-actuated controller	Fuzzy-logic controller	
360	360	7.2	5.7	+21
360	720	7.4	6.1	+18
360	1080	7.9	6.6	+17
360	1440	8.4	7.3	+13
360	1800	9.3	8.4	+10
360	2160	12.3	10.0	+19
360	2520	15.8	13.6	+14
720	720	9.7	7.4	+21
720	1080	10.8	8.8	+19
720	1440	12.7	10.9	+14
720	1800	15.9	14.1	+11
720	2160	21.8	18.5	+15
1080	1080	13.6	12.0	+12
1080	1440	17.9	15.4	+14
1080	1800	25.8	21.6	+16
1440	1440	27.3	22.9	+16

Tab. 1. Porovnání výsledků systémů řízení SSZ [8]

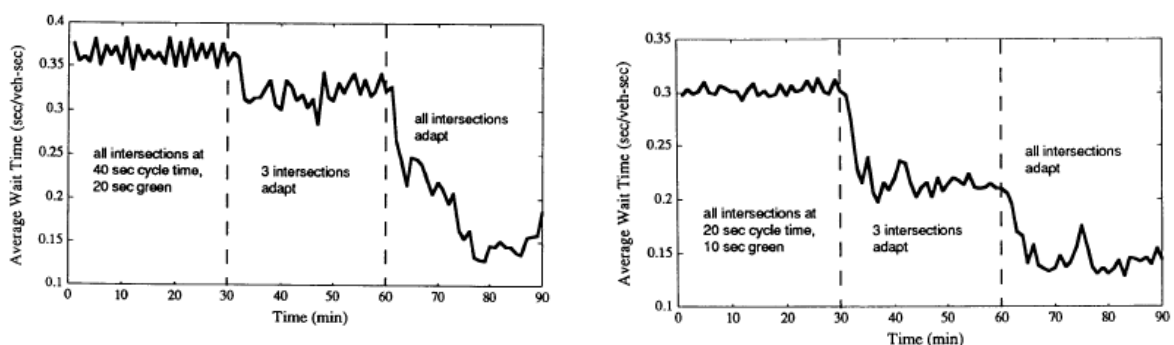
Lze konstatovat, že hned první aplikace fuzzy logiky do systému řízení SSZ přinesla velmi zajímavé výsledky a dala podnět dalším autorům věnovat se dané problematice a dále ji rozvíjet. Jak ale dále uvidíme, pravý „rozkvět“ aplikace fuzzy logiky do systémů řízení SSZ přinesla až devadesátá léta. Z osmdesátých let zmiňme pouze publikaci Nakatsuyamy a kol. [10] která popisuje použití fuzzy logiky pro koordinaci dvou za sebou jdoucích jednosměrných průsečných křižovatek. Fuzzy logika je použita ke stanovení parametru offsetu tzn. určení časového rozdílu mezi začátkem zelené fáze na první křižovatce a začátkem zelené na druhé křižovatce. Autoři mezi sebou porovnali tři typy řízení a to: „*interchange controller (FC)*“, „*fuzzy logic controller (FLC)*“ a „*fuzzy logic phase controller (FPC)*“. Nejlepších výsledků dosáhl systém řízení *IC*, a byl autory označen jako perspektivní pro řízení koordinace křižovatek, pokud je přímý směr hlavní komunikací (dopravní tepnou).

Na začátku devadesátých let vznikla celá řada zajímavých publikací. Mezi prvními autory věnujícím se řešené problematice byl na začátku devadesátých let Stephen Chiu [11]. Autor publikace byl první, kdo použil fuzzy logiky na řízení většího počtu křižovatek **Obr. 10.** Jedná se o obousměrné komunikace (*two-way streets*) bez odbočovacích pohybů, vozidla nemohou měnit jízdní pruhy a pokud se vozidlo zastaví, pohybuje se dále rychlostí definovanou pro danou ulici (vše z důvodu zjednodušení modelu). Fuzzy logika byla použita k nastavení délky cyklu, parametru offsetu a přerušení fází křižovatek na základě stupně saturace.



Obr. 10. Řešená síť v modelu [11]

Chiu [11] se zaměřil na nedostatky systémů řízení oblasti ve městech pomocí systémů UTCS (*Urban traffic control system*). Jedná se například o systému SCOOT (*Split Cycle Offset Optimisation Technique*) a SCATS (*The Sydney Coordinated Adaptive Traffic System*), které dokáží reagovat na nepředvídatelné události v dopravě a řešit tento problém postupnou optimalizací signálních plánů, offsetem a přerušení fází na řízených křižovatkách (metoda centralizovaného řízení). Fuzzy rozhodovací pravidla byla aplikována na „adaptivní“ řídicí systém. Architektura řízení je řešena tak, že parametry řízení jsou na křižovatkách upravovány dle naměřených lokálních dat a údajů z přilehlých křižovatek. Dopravní síť křižovatek tvořilo šest ulic (Obr. 10) a výsledek simulace ukázal, že pokud je pouze malá část křižovatek (3) řízena pomocí „fuzzy-adaptivního“ systému, tak účinnost takto řízených křižovatek je velmi omezená vzhledem k velikosti sítě a je spíše vhodné ponechat všechny křižovatky jako neřízené Obr. 11. Pro úplnost dodejme, že ve fuzzy systému byly použity Δ funkce a jako parametr určující kvalitu řízení byla zvolena průměrná čekací doba [s/jv].

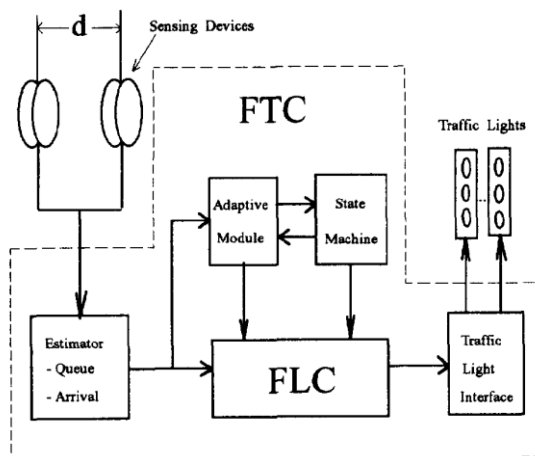


Obr. 11. Výsledky testování fuzzy adaptivního řízení v síti křižovatek

Dalším zajímavým článkem je publikace z roku 1992 autorů Bissetta a Kelseyho [12]. Autoři jsou první, kdo použili grafickou simulaci (*X window system*) řešené křižovatky, což byl výrazný posun oproti předešlým publikacím. V podstatě se dá říct, že to byla jedna z prvních grafických

mikroskopických simulací, jak ji chápeme dnes (PTV VISSIM, AIMSUN). Článek je zaměřen a porovnání konvenčního adaptivního řízení (v článku je podrobně popsán) a fuzzy řízení SSZ pro izolovanou křižovatku. Jedná se o pravoúhlou průsečnou křižovatku s levým i pravým odbočením ale bez určení poloměrů oblouků. Geometrie křižovatky mohla být upravována (počty řadících pruhů) a spolu s ní i intenzity vozidel, směřování vozidel a lokace detektorů (každý jízdní pruh obsahoval dva detektory). Vstupem do řídicího systému byly hodnoty intenzit a délka cyklu - použití Δ , Π funkce. Výstupem byl stupeň nutné změny signálu na SSZ. V závěru autoři konstatují, že nezáleží, jaký typ řízení použijeme (saturace je vždy dosaženo). Navržený a testovaný fuzzy systém řízení vykazoval vyšší účinnost (vyšší propustnost) blízko bodu saturace, než adaptivní řízení. Zmíníme ještě jeden článek Kelseyho a kol. [13]. Ten je zajímavý tím, že autor do fuzzy proměnných zahrnul hustotu dopravy na pozemní komunikaci, rozlišení volných a uzavřených směrů dopravní cesty, uplynulý čas od poslední změny fáze a stupeň nutné změny řízení na izolované křižovatce.

Publikace [14] autora Favilly a kol. přinesla oproti předchozím článkům jednu zajímavost a to použití fuzzy systému řízení dopravy „*FTC – fuzzy traffic controller*“, který obsahuje vlastní fuzzy systém řízení „*FLC – fuzzy logic controller*“ (nastavení délky zelené podle dopravních podmínek,) ale i stavový automat „*state machine*“ (řízení pořadí stavů *FTC*) a tzv. adaptivní modul (mění nastavení *FLC* z důvodu zlepšení „výkonu“ systému řízení) schéma viz **Obr. 12**. Systém řízení byl aplikován na samostatnou vícepruhovou křižovatku. Další zajímavostí je, že se jednalo o skutečnou křižovatku z města São Paulo (Brazílie).



Obr. 12. Blokové schéma fuzzy systému řízení dopravy [14]

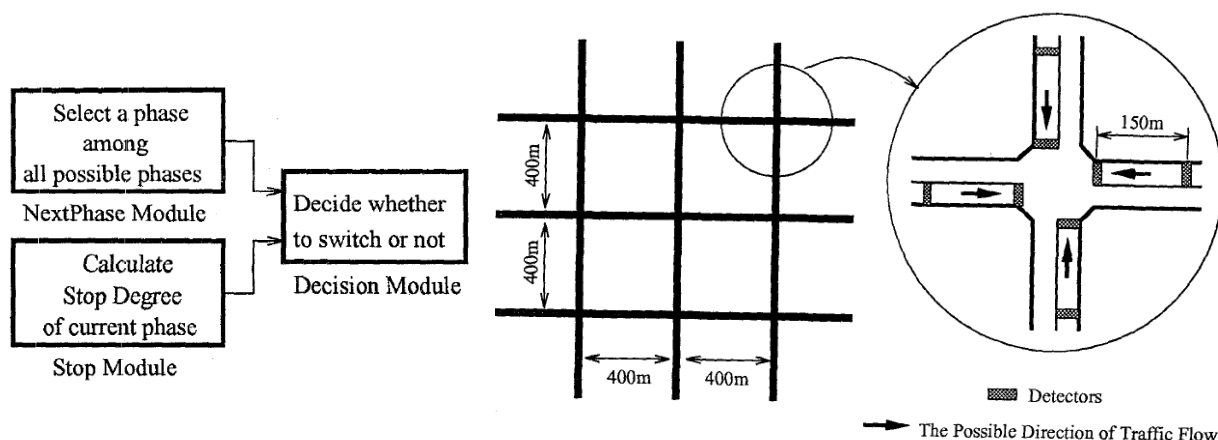
Vstupem do systému řízení jsou příjezdy vozidel (počet vozidel), délka kolony (počet vozidel) a výstupem je prodloužení zelené (s) pro příslušnou fázi - - použití Δ funkce. Další zajímavostí publikace je, že autoři se zaměřili na porovnávání svého navrženého systému řízení s fuzzy systémem řízení typu „Mamdani“ [8], kdy jimi navržený systém vykazoval nižší hodnoty průměrného zpoždění vozidel. Výsledkem modelu byl prokázán přínos fuzzy řídicího systému obsahující tzv. adaptivní modul. V závěru článku byla nastíněna teze budoucího využití neuronových sítí v systému řízení SSZ právě pro účel optimalizace fuzzy systému řízení (adaptivní modul).

Hoyer a Jumar [15] pojali fuzzy systém řízení SSZ velmi originálně oproti zatím citovaným autorům. Systém řízení je navržen tak, aby zpracovával dopravní informace z každého řadícího pruhu na křižovatce. Bylo použito 12 hlavních toků (příjezdů) křižovatky a fuzzy pravidla rozhodovala o použití dvou, tří, nebo čtyřfázového signálního plánu, tak aby jednotlivé dopravní proudy nebyly konfliktní. V závěru autoři uvádějí zajímavou myšlenku v podobě zahrnutí fuzzy pravidel do systému řízení, které obsahují informace o počasí (vliv na dopravní situaci) nebo dopady dopravy na životní prostředí (ekologické aspekty).

První vlašťovkou v oblasti kombinace odlišných (matematicky) systémů řízení pro jednu SSZ je disertační práce Kima [16]. Vědecká práce pojednává o vývoji dynamického systému řízení pro SSZ s aplikací fuzzy logiky a petriho sítí (diskrétní distribuovaný systém). Řešená křižovatka obsahovala samostatné řadící pruhy pro levé i pravé odbočení a řídicí algoritmus prodlužoval délku zelené na základě vyhodnocení dat na konci každé fáze.

Sayers a kolektiv [17] se zabývali popisem nedostatků dopravně závislého řízení na izolované křižovatce, pokud je vstupem nelineární charakteristika a odstraněním těchto nedostatků pomocí fuzzy systému řízení. Autoři [17] hlavně vyzdvihují a zdůrazňují přednosti fuzzy systému řízení na SSZ z důvodu transparentnosti a intuitivnosti návrhu. Např. jednoduchá kombinace vstupních proměnných časové mezery a obsazenosti detektoru v podobě podmínek *IF, THEN*.

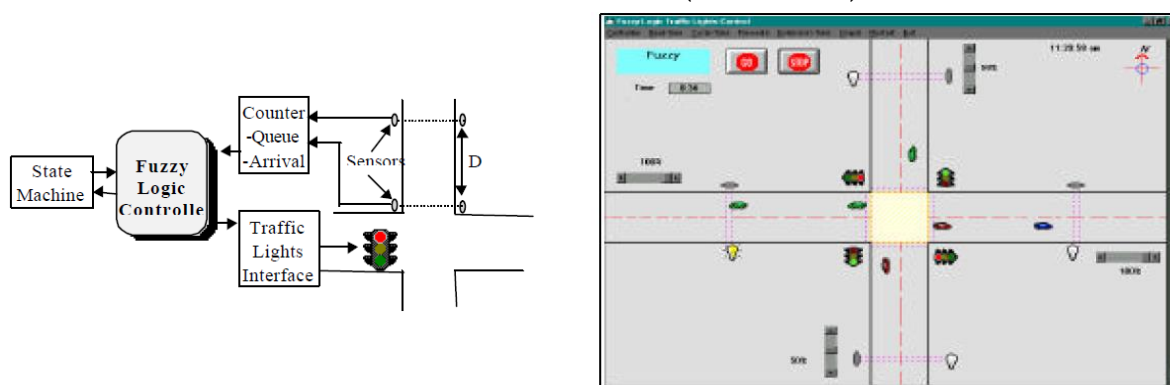
Lee a kolektiv [18] navrhli fuzzy systém řízení pro skupiny křižovatek, kdy na každé křižovatce je pořadí fází a délka cyklu upravována na základě lokální dopravní situace a dopravní situace na přilehlých křižovatkách. Zajímavostí je, že každá křižovatka obsahuje vlastní dopravní řadič, který je složen ze tří modulů **Obr. 13**, kdy každý modul obsahuje vlastní fuzzy pravidla: modul pro výběr další fáze, „stop“ modul pro výpočet stupně zastavení vozidel v signálu „volno“ a rozhodovací modul. Pro úplnost dodejme, že ve fuzzy systému byly použity Δ funkce a jako parametr určující kvalitu řízení byl zvolen průměrný ztrátový čas všech vozidel za celou křižovatku. Navržený systém řízení vykazoval dobré výsledky při vysokém zatížení křižovatky.



Obr. 13. Fuzzy moduly řízení SSZ (vlevo), schéma řešené sítě (vpravo) [18]

Tan a kolektiv [19] popisují návrh implementace fuzzy do systému řízení SSZ. To samo osobě v porovnání s předešlými články není až tak zajímavé, ale co činí publikaci zajímavou je, že autoři naprogramovali (Visual Basic) grafické rozhraní pro testování systémů řízení SSZ **Obr. 14**. V podstatě se jedná o jednoduchý mikrosimulační software. Navržená aplikace slouží pro testování a vzájemné porovnání dvou systémů řízení a to fuzzy řízení a pevného signálního plánu. Použití softwaru umožňuje flexibilně testovat různé varianty směřování vozidel a zatížení křižovatky. Výsledky simulace zřetelně ukazují na lepší výkonost fuzzy systému řízení SSZ z pohledu hustoty dopravního proudu, čekací doby, doby pohybu vozidel a funkce ceny. „*Cost function*“ autoři definují podle rovnice (2). Nižší hodnota funkce ceny značí vyšší výkon systému řízení z důvodu menší čekací doby = nižší spotřeba paliva.

$$Cena = \left(\frac{Vozidla\ In}{Vozidla\ Out} \right) * \left(\frac{\text{Čekací doba}}{\text{Doba jízdy}} \right) \quad (2)$$



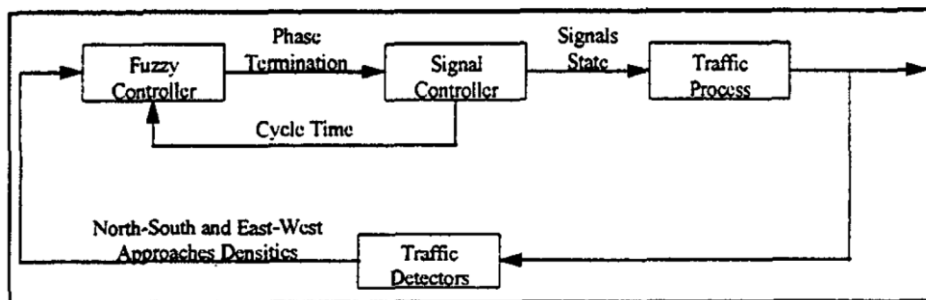
Obr. 14. Schéma umístění detektorů (vlevo), okno simulačního softwaru (vpravo) [19]

Na **Obr. 14** vlevo vidíme návrh autorů pro rozmístění detektorů v křižovatce společně s definováním vstupních proměnných - příjezdy vozidel, délka kolon (ve fuzzy systému byly použity Δ funkce).

Kim [20] ve svém článku představil regulátor založený na fuzzy logice (FLC – *fuzzy logic controller*) určený pro adaptivní řízení dopravy. Kim vycházel z předpokladu, že konvenční systém řízení SSZ (pevný signální plán, dynamické řízení) není dostatečně účinný na křižovatkách s extrémně kolísavou hodnotou zatížení (intenzit) a směřování vozidel. Navržený fuzzy systém řízení [20] naopak dostatečně pružně reaguje na příjezdy vozidel a délky kolon (ve fuzzy systému byly použity Δ funkce) a tak přispívá ke snížení dopravní kongesce. Kim [20] provedl ověření přínosu fuzzy řídicího algoritmu na simulaci izolované křižovatky. Výsledkem je, že navržený fuzzy systém řízení překonává jak konvenční systém řízení tak Mamdaniho fuzzy regulátor [9] ve všech vybraných parametrech určujících kvalitu řízení a to v: propustnost křižovatky (počet vozidel), průměrném zpoždění vozidel a stupni saturace.

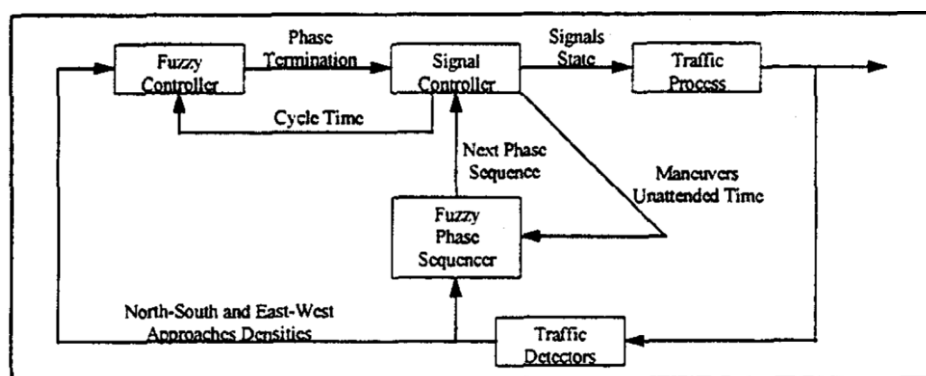
Zajímavou (novou) myšlenku vnesl do řešené problematiky fuzzy řízení SSZ Beauchamp-Baez a kol. [21]. Fuzzy logika byla v systému řízení použita nejenom k vlastnímu řízení SSZ, ale také k výběru fází křižovatky a k určení kdy fázi změnit. Autoři [21] nejdříve navrhli „klasický“ fuzzy systém řízení pro

izolovanou křižovatkou s označením FLC-TS „Fuzzy Logic Controller for Traffic Systems“, blokové schéma Obr. 15.



Obr. 15. Blokové schéma systému řízení izolované křižovatky „FLC-TS“ [21]

Dalším krokem bylo zařazení modulu pro „řadič“ fází „phase sequencer“ (PS), který také využíval fuzzy logiku, blokové schéma Obr. 16.



Obr. 16. Blokové schéma systému řízení izolované křižovatky „PS+FLC-TS“ [21]

Výsledky kvality řízení dvou výše uvedených systémů řízení byly porovnány s řízení SSZ s pevným signálním plánem. Výsledkem je, že oba nově navržené systémy („FLC-TS“, „PS+FLC-TS“) řízení překonávají řízení s pevným signálním plánem. Výsledky neukazují na výraznější rozdíly v kvalitě řízení mezi „FLC-TS“ a „PS+FLC-TS“ ale autoři poukazují na možné „vyladění“ systému „PS+FLC-TS“ úpravou funkcí příslušnosti a báze dat modulu „FPS“ „Fuzzy phase sequencer“. Pro úplnost dodejme, že ve fuzzy systému byly použity Λ , Π funkce.

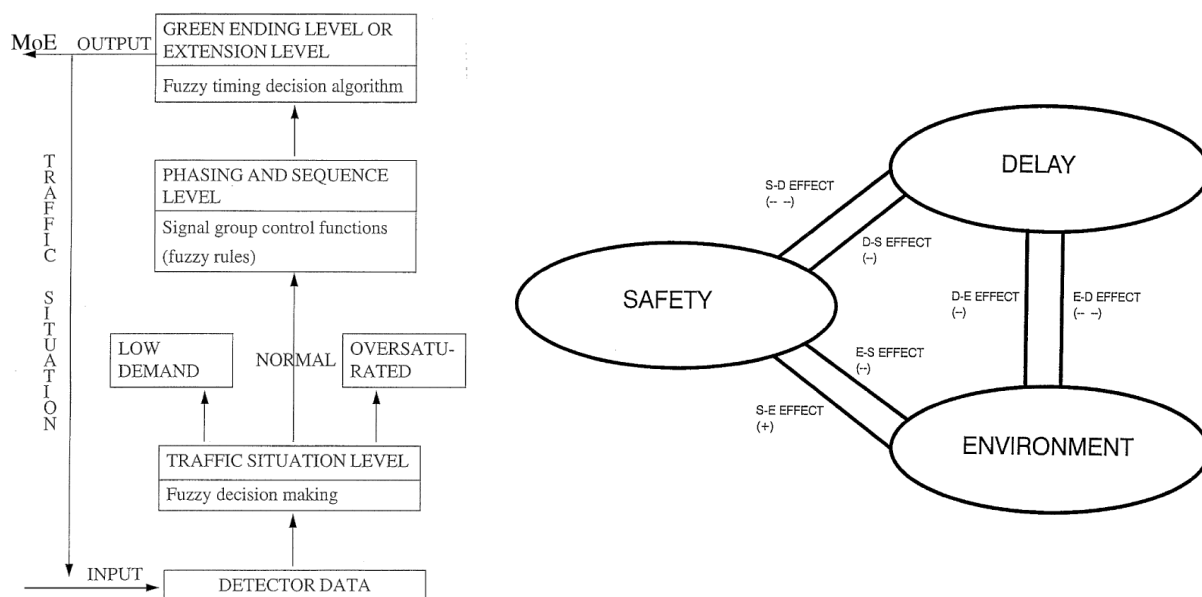
Významným osobností v oblasti použití fuzzy systému řízení v dopravně inženýrské úloze je Jarkko Niittymäki. Tento vědec je hlavním autorem celé řady článků, které budou popsány v následujícím textu. Nyní si stručně uvedeme jeho první článek [22], který zabývá problematikou optimalizace rozhodovacího procesu pro řízení přechodu pro chodce pomocí SSZ. Autoři [22] řešili dva protichůdné cíle a to minimalizaci zpoždění pěších a minimalizaci ztrátového času vozidel. Fuzzy systém řízení byl nastaven tak, aby našel kompromis pro minimalizaci časových ztrát jednotlivých dopravních proudů (auta, chodci). Zajímavostí je, že vlastní modelování a vyhodnocení proběhlo v mikrosimulačním softwaru HUTSIM (Helsinki University of Technology Simulator) vyvinutým na

Helsinské Univerzitě. Opět, stejně jako v předešlých případech, fuzzy systém řízení vykazoval stejné nebo lepší výsledky než konvenční (výzvoové detektory) dopravně závislé řízení.

Sayers a kol. [23] popisují návrh flexibilního fuzzy řídicího systému, který je aplikovatelný na vybranou úlohu (dle potřeby) na základě výběru několika kritérií. Tvůrci dále v publikaci [23] popisují citlivost řízení při změně parametrů. Autoři použili vícekritériální optimalizační genetický algoritmus (MOGA - multi-objective genetic algorithm) jako optimalizační techniku k odvození optimálního řešení pro fuzzy systém řízení.

Trabii a kol. [24] navrhli adaptivní systém řízení s aplikací „dvoustupňové“ fuzzy logiky. Opět se jedná o samostatnou křižovátku se samostatným řadícím pruhem pro levé odbočení. Jedná se „klasický“ adaptivní systém, kdy na základě informací o dopravním proudu dochází k úpravě signálního plánu. Vybrané vstupní data (Intenzita, počet vozidel v koloně, intenzita vozidel na „zelenou“, intenzita vozidel na „červenou“) jsou následně použita v dvoustupňové fuzzy logice. V prvním stupni systém odhaduje intenzitu dopravního proudu na každém příjezdu. V druhém stupni řízení systém stanoví prodloužení nebo ukončení aktuální fáze. Systém fuzzy řízení vykazuje zlepšení průměrného časového zdržení vozidel o 9.5% oproti dopravně závislému řízení. Pro úplnost dodejme, že ve fuzzy systému byly použity Δ , Π funkce a jako parametr určující kvalitu řízení byl zvolen průměrný ztrátový čas a počet zastavení vozidel.

Určitým fenoménem, pokud to tak můžeme napsat v oblasti aplikace fuzzy systému řízení v dopravně inženýrské úloze, je Fin Jarko Niittymäki. Zatím byla zmíněna jeho první publikace věnující se aplikaci fuzzy logiky v systému řízení SSZ pro přechod pro chodce. Niittymäki se věnuje popisované problematice od druhé poloviny devadesátých let dvacátého století a je autorem nebo spoluautorem několika velmi zajímavých článků věnujících se fuzzy logice a systémům řízení. Jeho následující publikace [25], kterou napsal společně s kolegou Pursulou, popisuje vývoj řídicího algoritmu FUSICO (*Fuzzy Signal Control*). Systém FUSICO obsahoval třístupňové fuzzy řízení **Obr. 17** (vlevo). V první fázi, bylo na základě vyhodnocení intenzity a obsazenosti detektoru rozhodnuto o stupni zatížení křižovatky (nulový, normální, vysoký). V druhé fázi bylo rozhodnuto o výběru fází a jejich pořadí. V poslední třetí fázi se rozhodovalo o ukončení signálu „volno“ vybrané fáze anebo o jejím prodloužení.



Obr. 17. Blokové schéma třístupňového algoritmu FUSICO (vlevo), znázornění hlavních cílů pro zavedení systémů řízení křižovatky a jejich vzájemný vliv (vpravo) [25]

Autoři [25] ve své práci dále definovali tři hlavní důvody (cíle) pro aplikaci systémů řízení SSZ. Jsou to: zvýšení bezpečnosti dopravy, minimalizace časového zpoždění vozidel a minimalizace dopadu na životní prostředí **Obr. 17** (vpravo). Definované cíle jsou často vzájemně v rozporu, ale autoři se snažili svým návrhem najít rovnováhu mezi těmito protichůdnými požadavky na kvalitu dopravy.

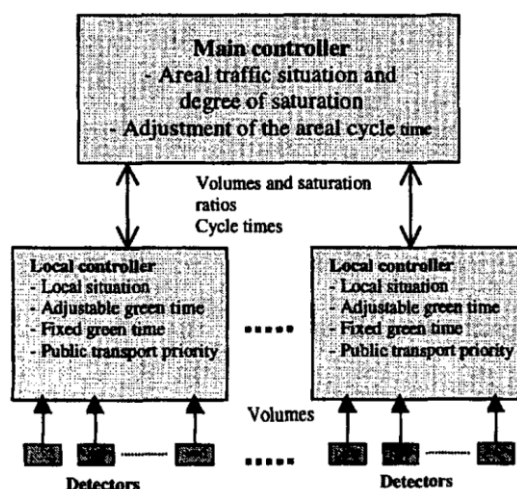
Navržený systém řízení vykazoval snížení časového zdržení vozidel oproti konvenčním metodám („*Vehicle Actuated*“) naopak u výsledků počtu zastavení vozidel vykazoval navržený systém řízení zlepšení pouze v oblasti nízkých intenzit (150 až 500 voz/h). Algoritmus FUSICO byl porovnán nejenom s konvekčním řízením SSZ ale i s fuzzy systémem řízení „*Pappis Mamdani*“ [8] a opět vykazoval zlepšení kvality dopravy což má vliv nejenom na snížení spotřeby paliva ale i na zlepšení celkové bezpečnosti dopravy. Problematika více fázového řízení byla dále rozpracována v publikaci [26].

Doplňující publikace Niittymäkiho [27], se detailně věnuje definici fuzzy pravidel pro vícecestupňový algoritmus FUSICO tzn. fuzzy pravidla pro výběr fáze, jejich posloupnost a délku.

Niittymäki použil algoritmus FUSICO i k řízení vzájemné koordinace dvou za sebou jdoucích křižovatek se SSZ [28]. Niittymäki navazuje na dvě předešlé publikace [10], [11] řešící obdobnou problematiku. Výsledky modelu ukázaly, že je vhodné algoritmus FUSICO použít spíše na méně zatížené křižovatky a pokud je vzdálenost mezi křižovatkami menší než 1000m.

Než si popíšeme závěry projektu FUSICO zmiňme článek autorů Niittymäkiho a Nevaly [29]. Článek shrnuje poznatky a výsledky z předešlých studií [22], [25], [27], [28] a rozvádí použití algoritmu FUSICO k řízení dopravy v oblasti. Autory k této myšlence dovedly slibné výsledky předešlého testování algoritmu FUSICO. Předpokládali, že fuzzy logika se hodí pro řízení oblasti z důvodu většího

počtu proměnných vstupujících do systému. Systém řízení v oblasti je založen na několika základních parametrech: délky cyklů na křižovatkách, délky křižovatkových signálů „volno“, stupni saturace křižovatek. Blokové schéma systému řízení v oblasti viz **Obr. 18**.

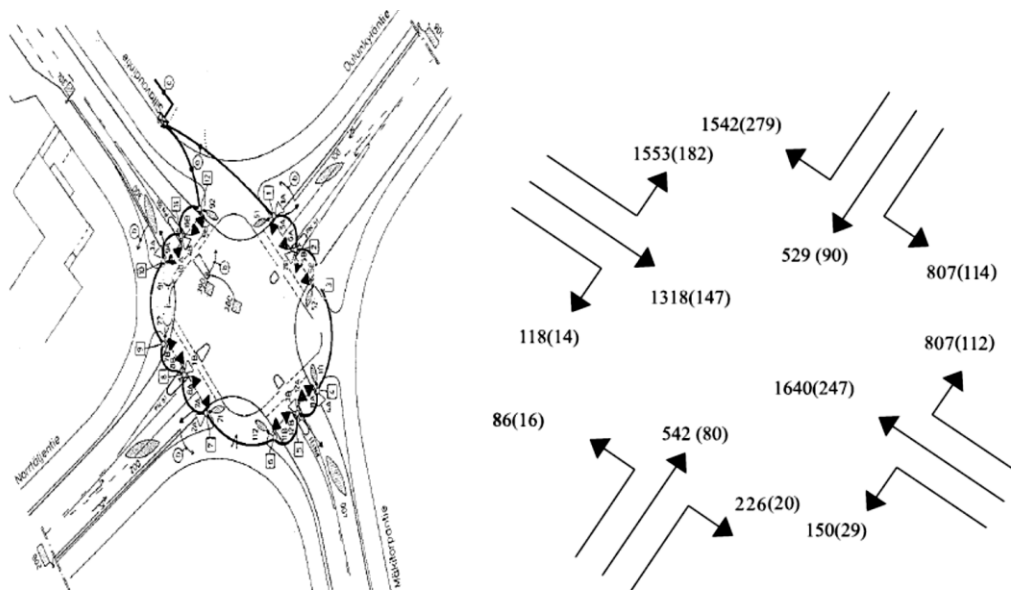


Obr. 18. Blokové schéma aplikace fuzzy řízení v dopravní oblasti [29]

Systém řízení může být s částí centralizovaný a z části decentralizovaný. Nastavení délky cyklu probíhá centralizovaně a je upravena tak aby vyhověla dopravní poptávce v oblasti - vyhodnocení stupně saturace u každého křižovatkového uzlu. Na lokální úrovni je řešeno rozdělení signálu „volno“ a preference MHD opět na základě vyhodnocení dopravní situace.

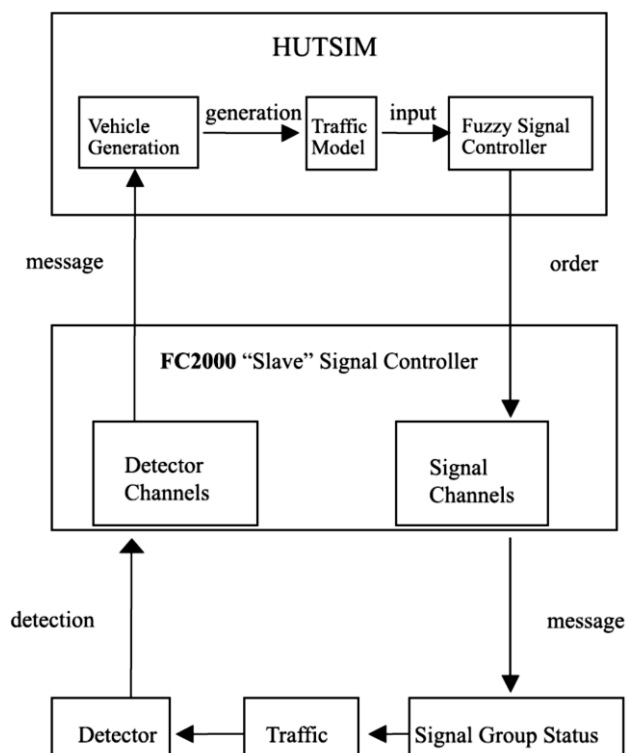
Výsledky vědeckého projektu FUSICO byly ověřeny na praktické realizaci fuzzy systému řízení (*FSC – „fuzzy signal controller“*) na SSZ ve Finském městě Oulunkylä [30] (Niittymäki). Původně řešená křižovatka obsahovala konvenční dynamické řízení (*VA – „Vehicle Actuated“*), které bylo porovnáno s fuzzy systémem řízení obsahující mikrosimulační model HUTSIM. Výhodnou použití fuzzy systému řízení v „polních“ podmínkách je relativní jednoduchost algoritmu řízení a tím pádem menší náročnost na HW – nižší cena spotřebního materiálu a údržby systému. Řešená křižovatka byla vybrána na základě několika kritérií (detail křižovatky a jejího zatížení viz Obr. 19):

- jedná se o samostatnou křižovatku (izolovaný bod),
- vysoké intenzity ve špičkových hodinách,
- průsečná křižovatka,
- provoz MHD,
- provoz pěších,
- nachází se mimo širší centrum města („suburban location“),
- signální plán obsahuje dvě fáze.



Obr. 19 Schéma řešené křižovatky a její zatížení

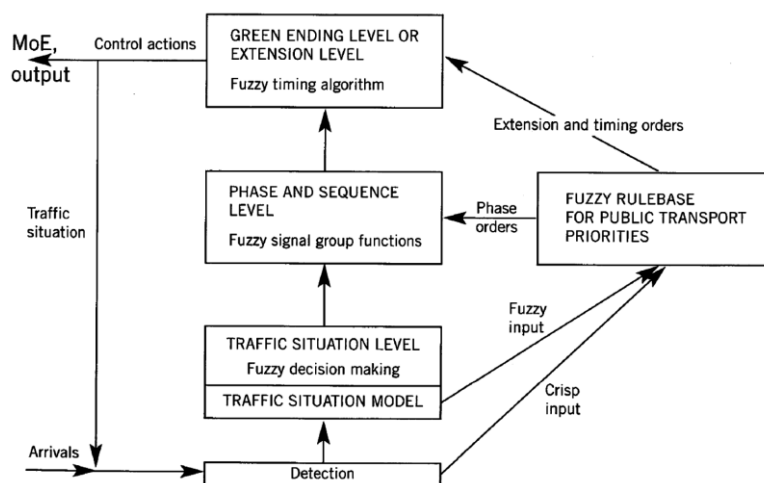
Křižovatka je umístěná v blízkosti vlakového nádraží a obchodního centra. Z těchto důvodů je intenzita chodců poměrně vysoká a navíc skrze křižovatku pojíždějí tři linky MHD. Jako detektory byly použity indukční smyčky. Detektory byly umístěné 40 a 60 metrů před stop čarou a křižovatka obsahovala celkem 4 detektory. Oproti konvenčnímu typu řízení fuzzy systém řízení neobsahoval detektory před stop čarou ani vyvolávací tlačítka u přechodu pro chodce. Pro fuzzy systém řízení byl použit řadič FC-2000 připojený přes paralelní rozhraní do PC, které obsahovalo algoritmus FUSICO a mikrosimulační software HUTSIM. Blokové schéma propojení viz **Obr. 20**.



Obr. 20. Blokové schéma fuzzy systému řízení [30]

Celkem byly porovnávány tři systémy řízení: konvenční (VA – „*Vehicle Actuated*“), klasický fuzzy systém řízení (Fm – „*fuzzy normal*“) a multi-objektivní fuzzy systém řízení (Fm – „*multi-objective fuzzy*“). „Fm“ algoritmus je více zaměřený na bezpečnost dopravy a zohledňuje dopady na životní prostředí (nižší spotřeba pohonných hmot) [25]. Výsledky ukázaly, že fuzzy systémy řízení překonávají konvenční systém řízení ve všech parametrech určujících kvalitu řízení – cestovní doby, počty zastavení, délka kolony. Výsledky „polního“ testování byly povzbudivé a autor plánoval dále aplikovat fuzzy řídicí algoritmus na dispozičně složitější křižovatky obsahující preferenci MHD a řízení dopravy v oblasti.

Niittymäki, Kononen [31] a Mäenpää [32] se společně zaměřili i na problematiku preference MHD na SSZ. Dříve navržený vícestupňový fuzzy algoritmus řízení [25] byl rozšířen bází pravidel pro preferenci městské hromadné dopravy na vybrané křižovatce **Obr. 21**. Algoritmus řízení byl ověřen na praktické realizaci ve městech Vantaa, Lahti a Jyväskylä. Byly testovány a mezi sebou porovnávány varianty řízení před a po instalaci fuzzy systému preference MHD.



Obr. 21. Vícestupňový fuzzy systém řízení rozšířený o fuzzy „blok“ řízení preference MHD [25]

Niittymäki shrnul všechny své dosavadní poznatky v disertační práci „*FUZZY TRAFFIC SIGNAL CONTROL - Principles and Applications*“ [33], která byla pomyslným vrcholem jeho tehdejšího vědeckého úsilí. Niittymäki ve své disertační práci detailně řešil výběr a návrh fuzzy systému, výběr vstupních hodnot do systému, rozbor a testování různých metod a přístupů. Práce obsahuje jak detailní popis FUSICO algoritmu, tak návrh FUSICO softwaru, který byl určen k řízení křižovatek v reálném provozu. Připomeňme, že systémy řízení byly ověřeny na vybraných křižovatkách ve Finsku [30], [32]. Hardwarovou podoba systému FUSICO je ukázána na **Obr. 22**.



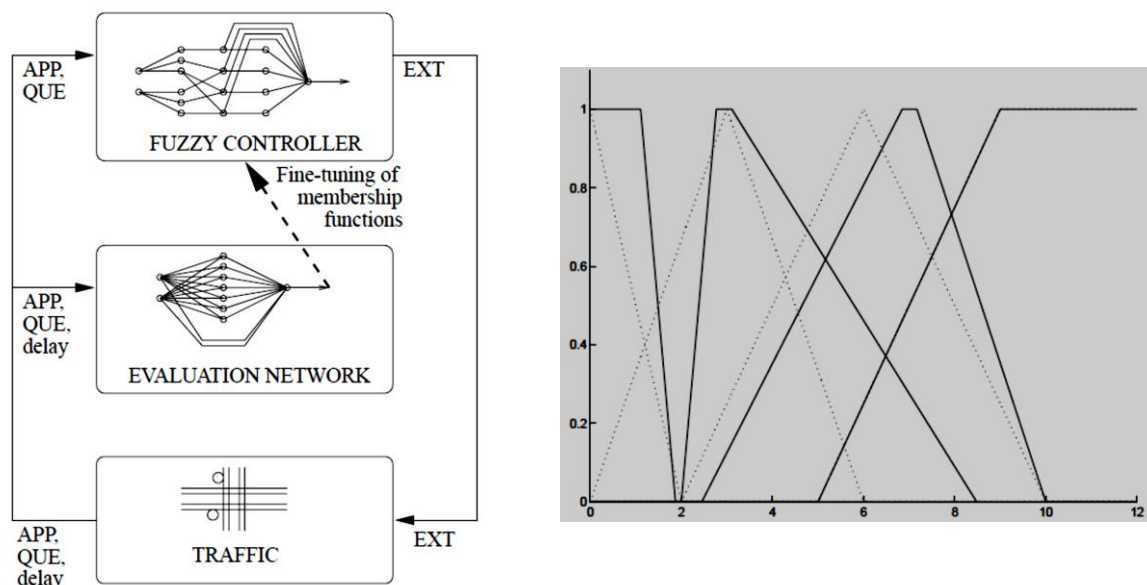
Obr. 22. Prototyp fuzzy regulátoru FUSICO (vlevo) [33], instalace FUSICO systému řízení (vpravo) [34]

S praktickou realizací se lze také setkat v Kanadě v provincii Britská Kolumbie. Místní ministerstvo dopravy v první polovině devadesátých let iniciovalo výzkum a následné praktické využití fuzzy systému řízení pro soustavu křižovatek více informací [35] str. 140.

Niittymäki s kolegy pokračoval ve své práci dál a výsledkem byl článek [36] srovnávající použitelnost fuzzy inferenční metody „*MAXIMAL FUZZY SIMILARITY*“ s tradiční Mamdaniho inferencí v systému řízení dopravy (výběr a prodloužení fází SSZ). Obě inferenční metody byly porovnány v mikrosimulačním softwaru HUTSIM. Výsledkem bylo, že typ Mamdani se více hodí pro malé a středně vysoké intenzity a naopak „*SIMILARITY*“ metoda je vhodnější pro více zatížené křižovatky.

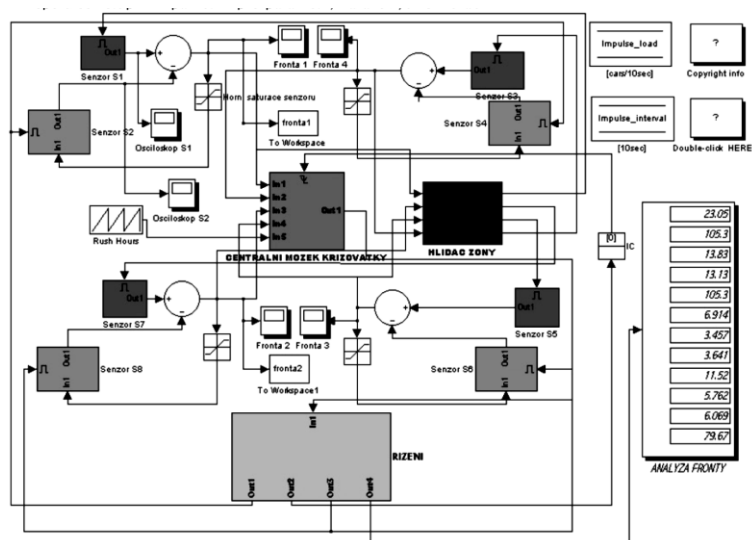
V publikaci [37] Niittymäki a Turunen otestovali nový algoritmus obsahující Łukasiewiczu více hodnotovou logiku na třech skutečných dopravních systémech řízení. Nový systém řízení je podobný fuzzy řídicímu algoritmu a byl porovnán s výsledky získanými ze systému řízení, kde inferenční metoda byla typu Mamdani použitá ve fuzzy toolboxu aplikace MATLAB. Systémy řízení byly aplikovány na řízený přechod pro chodce a na vícestupňový systém řízení obsahující výběr fází u stykové křižovatky se SSZ. Simulace proběhly opět v aplikaci HUTSIM a výsledky ukázaly, že výsledky jsou téměř shodné. Nový systém řízení dosáhl lepších výsledků pouze v případě, pokud byla vyšší hodnota hustoty dopravního proudu.

Finská autorka Ella Bingham je jednou z prvních autorů věnující se spojení fuzzy logiky a neuronových sítí v systému řízení SSZ. Tématu se věnovala již na konci devadesátých let dvacátého století, kdy obhájila svou závěrečnou práci [38] věnovanou neuro-fuzzy systému řízení dopravy. Její publikace [39] z roku 2002 popisuje neuro-fuzzy systém řízení dopravy, kdy neuronová síť nastavuje (ladí) typ a polohu (v univerzu) funkce příslušnosti fuzzy regulátoru **Obr. 23**. Simulace byla provedena v aplikaci HUTSIM a navržený systém řízení zlepšuje (snižuje) časové zdržení vozidel v případě konstantního zatížení řešené křižovatky.



Obr. 23. Blokové schéma neuro-fuzzy systém řízení dopravy (vlevo), funkce příslušnosti použité v systému řízení před „laděním“ (tečkovaná) a po „ladění“ (plná čára) [39]

Na okraj zmiňme dvě vědecké práce českých autorů věnující se problematice fuzzy řízení SSZ na izolované křižovatce. Prvním takovým počinem je práce autorské dvojice Hotmar, Palátová „FUZZY ŘÍZENÍ DOPRAVY NA SVĚTELNÉ KŘÍŽOVATCE“ [40]. Autoři testují svůj navržený fuzzy systém na průsečné křižovatce. Obě ramena křižovatky mají stejnou hladinu významnosti, doprava je řízena pomocí čtyř dvousvětelných SSZ a dopravní informace jsou získávány pomocí osmi detektorů. Celý systém je zpracován v prostředí SIMULINK® až na jeden skript vytvořený jako tzv. m-file (kvantitativní hloubková analýza fronty) viz **Obr. 24**.



Obr. 24. Globální pohled na model [40]

Vstupem do systému je „celková suma aut“ (trojúhelníková funkce), „celková difference aut“ (Gaussovy distribuce) a „dopravní intervaly“ (sigmoidální zvonové funkce). Výstupem systému je

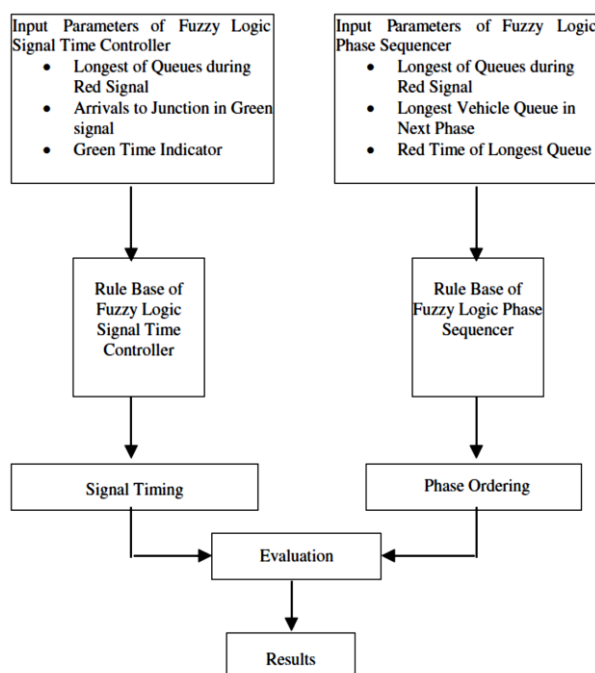
„doba trvání cyklu“ a „poměr zelená/červená“. Výsledkem je porovnání fuzzy systému řízení s pevným časovým plánem a lidským expertem.

Diplomová práce z roku 2003 Ing. Jana Krčála [41] je řešena koncepčně obdobně jako předešlá práce autorů Hotmar-Palátová. Opět se jedná o model křižovatky vytvořený v aplikaci MATLAB. Jako vstup do systému jsou použity dvě veličiny a to „fronta vozidel“ a „příjezdy vozidel“ (oboje trojúhelníková funkce). Výstupem je prodloužení signálu „volno“ dané fáze. Celkovým závěrem je konstatování, že se vzrůstající intenzitou klesá výhodnost fuzzy řízení, které pro střední intenzitu dává horší výsledek než dynamické řízení a pro vysokou intenzitu dokonce horší než statické řízení. Na závěr je nutné zdůraznit, že aplikace Matlab není primárně určena k modelování dopravního proudu a jako taková neobsahuje základní algoritmus pro laterální a příčný pohyb vozidel nebo model přijetí časové mezery.

Chou a Teng [42] navrhli fuzzy systém řízení dopravy (Fuzzy logic based traffic junction signal controller – FTJSC) který byl (dle jejich názoru) zaměřen více „prakticky“ tzn., zohledňoval skutečné dopravní podmínky. Systém řízení byl použit pro soustavu křižovatek obsahující větší počet řadicích pruhů a model zohledňoval délku vozidel, ulic a vzdálenost mezi vozidly. Chou a Teng [42] porovnali jimi navržený systém řízení s fuzzy algoritmem řízení SSZ Mamdani [8], Nakatsuyama [10] a Favilla [14]. Jejich systém řízení obsahoval následující odlišnosti (dle autorů vylepšení):

- nižší počet fuzzy pravidel - pouze devět,
- odlišné vstupní proměnné do systému – délky kolony,
- každá koordinovaná křižovatka „ví“ o dopravním stavu ostatních křižovatek,
- použití inferenční metody „max-product“ oproti „min-max“,
- nižší frekvence použití inferenčních pravidel – vždy po uplynutí délky minimální zelené nebo po konci prodloužení zelené.

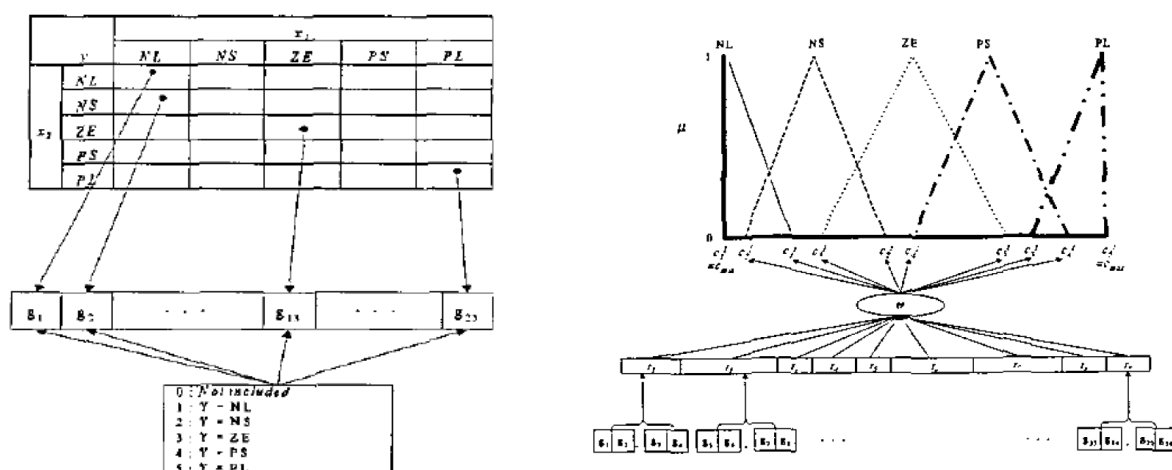
Murat a Gedizlioglu [43] vyvinuli fuzzy systém řízení pro izolovanou křižovatku, který se od ostatních dříve uvedených systémů odlišoval použitím dvou fuzzy řídicích systémů. První fuzzy systém „fuzzy logic signal time controller“ rozhodoval o změně délky signálního plánu (prodloužení fází). Druhý fuzzy systém „fuzzy logic phase sequencer“ určoval pořadí a počet fází. Každý z těchto fuzzy systémů obsahoval odlišnou bázi dat. Blokové schéma systému řízení SSZ viz **Obr. 25**. Uvedený systém řízení dále autoři rozvedli v článku [44], kdy navrhli fuzzy systém řízení pro vícefázové SSZ – „Logic Multi-phased Signal Control (FLMuSiC)“.



Obr. 25. Blokové schéma fuzzy systému řízení SSZ [43]

Zmiňme práci Jacques a kol. [45], která analyzovala teoretická hlediska rozhodovací logiky aplikované v systému řízení SSZ. Výsledkem práce je otestování tří rozdílných fuzzy systémů řízení na izolované křižovatce pro tři různé stupně zatížení (nízké, střední, vysoké). Rozdílnost fuzzy systému řízení spočívala v aplikaci tří rozdílných metod defuzzifikace - MOM, COG a SOM.

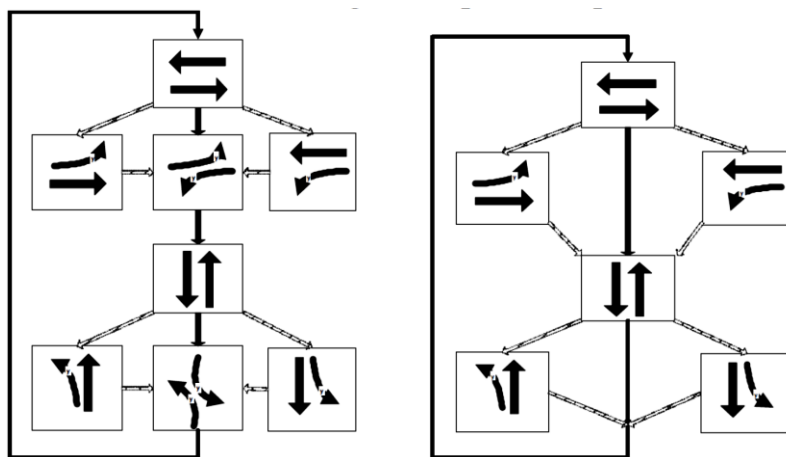
Další zajímavou aplikací fuzzy algoritmu v systému řízení SSZ je jeho kombinace s algoritmem genetickým. Jedním z prvních článků věnující se této problematice je práce autorů Chioua a Lana [46]. Výsledkem jejich práce je návrh iteračního evolučního algoritmu obsahující genetický fuzzy systém řízení („Genetic fuzzy logic controller – GFLC“). Genetický algoritmus má za úkol vybrat vhodné fuzzy pravidlo a nastavit „naladit“ funkci příslušnosti (Obr. 26). Další zajímavostí této publikace je, že navržený systém řízení křižovatky byl otestován jak v modelu, tak i na praktické realizaci ve městě Taipei (Tchaj-wan). Výsledky testování naznačily, že algoritmus řízení „GFLC“ je dostatečně efektivní a robustní pro použití v adaptivních systémech řízení SSZ.



Obr. 26. Znázornění výběru fuzzy pravidla a funkce příslušnosti pomocí genetického algoritmu [46]

Nyní se opět vraťme k samostatné aplikaci fuzzy algoritmu v systému řízení SSZ. V podstatě se dá konstatovat, že odborné publikace věnující se popisované problematice po roce 2002 se zaměřují buď na vylepšení vyvinutých algoritmů ostatních autorů, nebo na určité rozšíření - vylepšení systémů řízení. Ve své podstatě se nejedná o revoluční myšlenky, ale spíše mají charakter určité evoluce fuzzy algoritmu řízení. Proto se následujícím publikacím nebudeme věnovat detailněji. Jedna z nových myšlenek je popsána v článku [47] autorů Zenga a kol. Zeng a kolektiv navrhli fuzzy systém řízení pro izolovanou křižovatku, kdy hodnota vstupní proměnné je určena v závislosti na předešlých (historických) hodnotách intenzit (platí pro každou fázi).

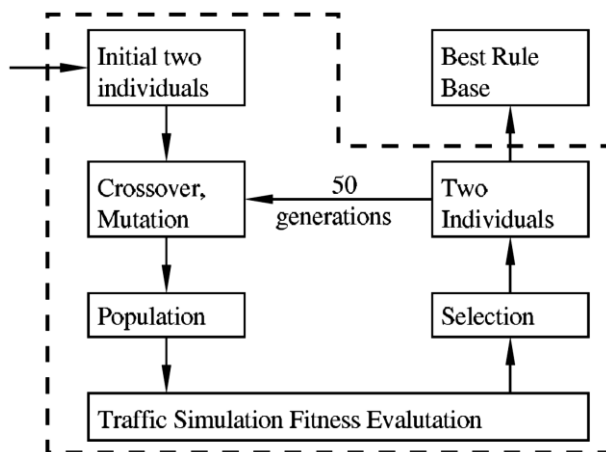
Velmi zajímavou myšlenku vnesli do fuzzy systému řízení autoři Zhang a kolektiv [48]. Jejich odborná publikace popisuje návrh dvouvrstvého fuzzy řídicího systému pro přetíženou dopravní síť. Řešená dopravní oblast má mít kompaktní centrální oblast kde intenzity dosahují vysokých hodnot a hrozí zde možnost vzniku dopravních kongescí. Navržený fuzzy algoritmus proti dopravním zácpám („*anti-congestion fuzzy algorithm – ACFA*“) sleduje dva hlavní cíle. Prvním cílem je minimalizovat zpoždění vozidel a druhým cílem je zabránit vzniku dopravních kongescí. První vrstva fuzzy algoritmu posuzuje stav dopravy v řešené síti a druhá vrstva algoritmu má za úkol řídit SSZ na každé křižovatce. Zajímavostí je využití okrajových křižovatek dopravní sítě k regulaci počtu vjíždějících vozidel do vnitřní oblasti změnou směrování vozidel (odlišným výběrem sledu fází, **Obr. 27**). Výsledkem je snížení pravděpodobnosti přetížení dopravní sítě.



Obr. 27. Výběr fází v okrajových křižovatkách dopravní sítě: vlevo obvyklý sled fází, vpravo anti-kongesce sled fází [48]

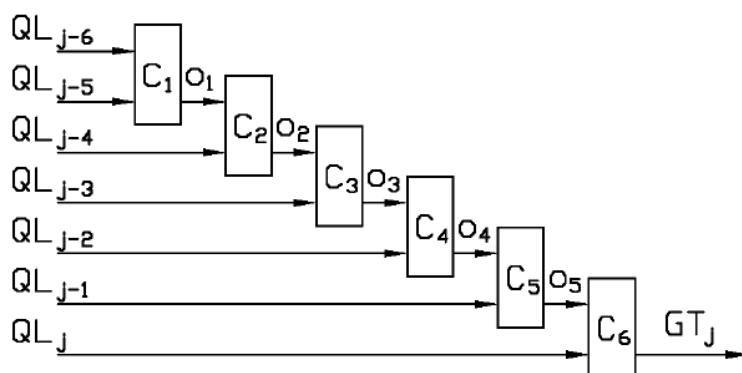
Další zajímavý řídicí systém SSZ představili autoři Hu a kolektiv ve svém článku [49] z roku 2007. Navržený systém řízení obsahuje evoluční algoritmus, který generuje neoptimálnější fuzzy bázi pravidel. Evoluční algoritmus pracuje s reálnými naměřenými daty. Pokročilý systém řízení autoři aplikovali na samostatnou čtyřramennou průsečnou křižovatku obsahující řadící pruhy pro přímý směr a pravé odbočení. Levé odbočení bylo řešeno pouze na jednom rameni křižovatky a jako samostatný bypass. Systém řízení byl navržen s ohledem na bezpečnost a kvalitu provozu, kdy vlastní

výkonnost řídicího algoritmu byla definována pomocí „fitness“ funkce. Fitness funkce, nazývejme ji například výkonová funkce, byla v systému definována jako průměrný ztrátový čas všech vozidel za Δt . Blokové schéma systému řízení SSZ obsahující blok pro vyhodnocení výkonové funkce vidíme na **Obr. 28**



Obr. 28. Blokové schéma genetického fuzzy generátoru báze dat [49]

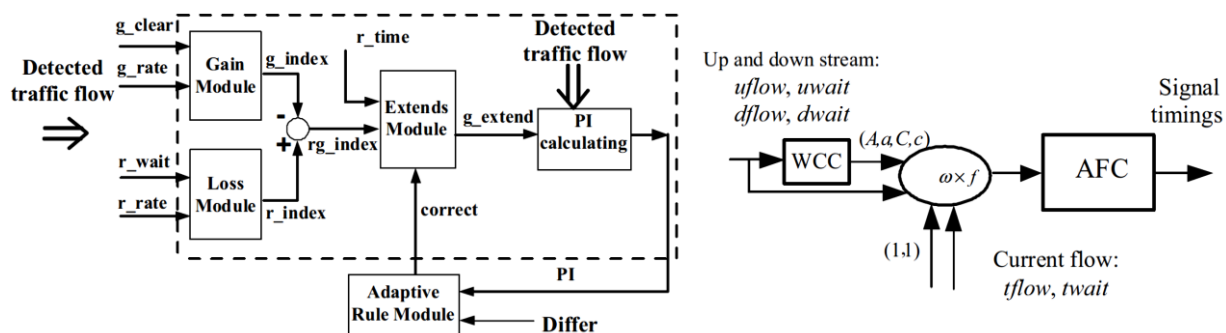
Myšlenku aplikace pokročilého systému řízení SSZ rozvedl Hu dále ve svém následujícím článku [50]. Spolu s dalšími autory navrhl hierarchický fuzzy řídicí systém, který je aplikován na skutečnou průsečnou křižovatku obsahující čtrnáct řadících pruhů, dva přechody pro chodce a 7 fází. Hierarchický systém řízení obsahuje sedm vstupních proměnných (délky kolon) sedmi fází a jeden výstup v podobě délky signálu „volno“ pro vybranou fázi. Z **Obr. 29** je patrné, že hierarchický systém řízení obsahuje šest vrstev fuzzy pod procesů řízení (sub-controllers). Každý z těchto samostatných prvků řízení obsahuje dva vstupy a jeden výstup. Vrstvy 1 až 5 využívají dva identické vstupní parametry v podobě délky kolon. Výstupem je sloučená délka kolony z předešlé vrstvy. Poslední šestá vrstva používá jako vstupní parametr sloučenou délku kolon předešlých vrstev a délku kolony vybrané fáze. Výstupem šesté vrstvy je doba zelené vybrané fáze. Použitím tohoto evolučního algoritmu u řízené křižovatky se výsledku projevilo 38% snížením čekací doby vozidel.



Obr. 29. Schéma hierarchického fuzzy systému řízení [50]

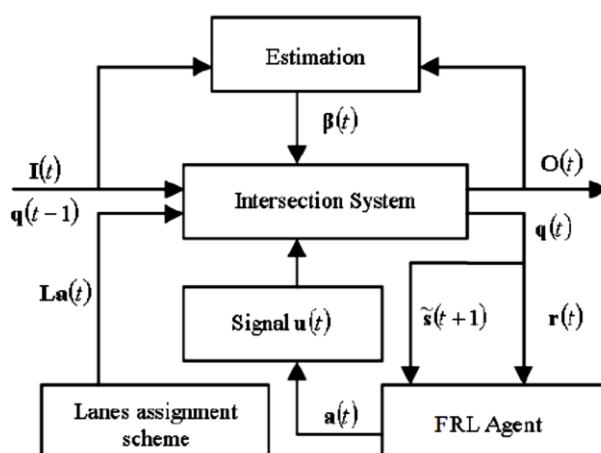
Li a kolektiv [51] vytvořili adaptivní fuzzy systém řízení pro městskou dopravní síť několika křižovatek se SSZ („Adaptive fuzzy logic signal controller“ - AFC). Systém řízení se skládá ze dvou částí:

kontrolního stupně a regulačního stupně. Kontrolní stupeň rozhoduje o časování signálního plánu křižovatky pomocí fuzzy logiky. Regulační stupeň optimalizuje fuzzy pravidla v adaptivním modulu systému AFC dle indexu kvality dopravy aktuální řídicí fáze a intenzit dopravního proudu (blokové schéma **Obr. 30** vlevo). Do systému řízení každé křižovatky dále vstupuje tzv. váhový koeficient řízení („*Weight coefficient controller*“ - WCC), který má za úkol „popsat“ stav dopravy na přilehlé křižovatce (znázornění vztahu mezi „AFC“ a „WCC“ **Obr. 30** vpravo).



Obr. 30. Blokové schéma systému AFC (vlevo), vztah mezi „AFC“ a „WCC“ (vpravo) [51]

Wen a kolektiv ve své publikaci [52] zabývají návrhem stochastického řídicího systému, založeném na fuzzy systému zpětnovazebního učení („*fuzzy reinforcement learning*“ - FRL). Autoři usuzují, že dnešní tradiční způsoby řízení SSZ jsou již překonané a je proto nutné navrhnout nové postupy pro systém řízení dopravy. Hlavním důvodem je, že do systému řízení SSZ vstupují nelineární v čase proměnné parametry, které navíc náhodně kolísají v závislosti na dopravní poptávce, a právě stochastický řídicí systém obsahující fuzzy systému zpětnovazebního učení se dokáže těmto podmínkám přizpůsobit. Navržený „FRL“ adaptivní systém řízení dokáže lépe čelit kolísajícímu dopravnímu zatížení (intenzity, směřování vozidel) a zamezit přesycení křižovatky. Navržený systém řízení byl testován a průměrné křižovatce a porovnán s řízením pomocí pevného signálního plánu a s plně dynamickým řízením SSZ. Analýza výsledků provedených simulací ukázala na lepší výkonnost „FRL“ systému (snížení průměrného časového zdržení o 25.7%) oproti tradičním systémům řízení a to zejména případě přesaturování křižovatky způsobené zvýšením dopravní poptávky.



Obr. 31. Blokové schéma „FRL“ systému řízení křižovatky [52]

2. Fuzzy systém řízení SSZ v aplikaci PTV VISSIM

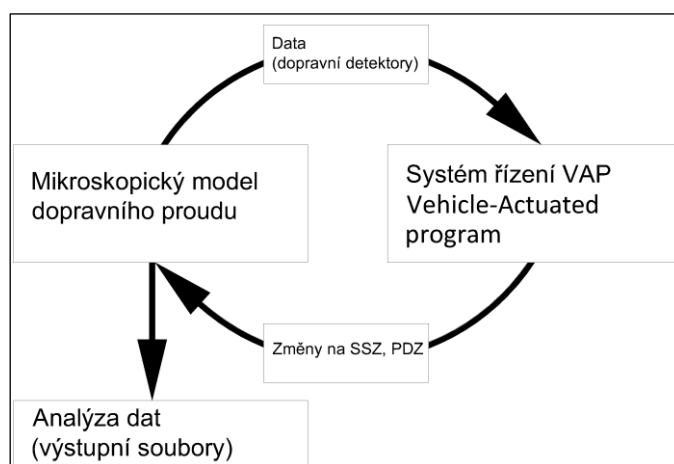
Fenoménem poslední dekády je použití komerčních mikrosimulačních aplikací k řešení dopravně inženýrských úloh. V předešlém přehledu vědeckých článků zvolili autoři buď cestu naprogramování vlastního modelu společně s řídicím algoritmem (většinou pomocí jazyka C, C++ atd.) anebo využili aplikaci MATLAB. Mezi výjimky lze zařadit většinu článku Niittymäkiho [33] (aplikace HUTSIM) anebo publikace Bissetta, Kelseyho [12] a Tana [19]. Pojdme si nejdříve definovat pojem mikrosimulační model.

Pro mikroskopické dopravní modely je charakteristické sledování jednotlivých dopravních elementů a interakcí mezi těmito elementy. V mikroskopickém modelu jsou, nejenom obsaženy komplexní data dopravní infrastruktury (šířka, délka, radius, sklon – komunikací), ale i údaje o dopravních prostředcích (rozměry, výkonové charakteristiky) a to současně i s chováním řidiče tzn., umožňují nám se přiblížit reálnému prostředí na silniční komunikaci. Výstupem je, celá řada parametrů vypovídajících o kvalitě dopravy jako jsou údaje o cestovní době, ztrátovém času, hustotě dopravního proudu, počty zastavení, délky kolon, rychlost, zrychlení atd. Výstupy modelů lze dále použít, jako vstup do nadstavbového modelu jako je cost-benefit analýza nebo emisní model. Využití mikrosimulačních modelů v projekční praxi je celkem široké a zahrnuje například:

- vývoj a testování nových systémů řízení SSZ a řízení dopravy (ITS),
- kapacitní posouzení všech typů křižovatkových uzlů buď samostatných, nebo v soustavě,
- výběr optimálního řešení na základě porovnání variant např. stavební uspořádání,
- predikce budoucích dopravní situace např. při posouzení napojení nové komunikační sítě atd.

Nyní se zaměříme na vědecké články obsahující fuzzy systém řízení SSZ v mikrosimulačním modelu PTV Vissim [53]. Software PTV Vissim (Verkehr In Städten - SIMulationsmodell) obsahuje model dopravního proudu, který byl navržen v roce 1974 Rainerem Wiedemannem [54]. Samotná aplikace byla uvedena na trh v roce 1992 a je vyvíjena v úzké spolupráci s Technickou univerzitou v Karlsruhe. Dopravní modely jsou periodicky aktualizovány a doplňovány dle současných podmínek (trendů) a průběžně jsou do modelu přidávány nové funkcionality např. systémy řízení, algoritmy pohybu entit atp. Model dopravního chování obsahuje psycho - fyzikální „car following“ model pro podélný pohyb vozidla a algoritmus založený na pravidlech pro laterální pohyby. Samotný mikrosimulační model je diskretní, stochastický a na časových krocích založený, kde jednotka vozidlo – řidič je společnou entitou. Psychologická část v sobě zahrnuje kombinaci psychologických aspektů a fyziologických omezení vnímání řidičů. Vše je založeno na tom, že vnímání rychlostních rozdílů a odhadování vzdáleností se v populaci řidičů liší stejně tak jako vnímání rychlostních rozdílů nebo odhadování bezpečné vzdálenosti. Fyzikální model obsahuje vlastnosti vozidel, jako jsou: rozměry, hmotnost, rychlost, zrychlení a výkon. Pro doplnění si uvedme „car following“ modely v dalších používaných mikrosimulačních aplikacích: Gipps (AIMSUN), Pipes (CORSIM) a Fritzsche (PARAMICS) detailně např. srovnání modelů viz [55].

V níže uvedených publikacích je fuzzy systém řízení SSZ naprogramován pomocí jednoduchého jazyka VAP [56]. Konvence (syntaxe) zápisu je podobná klasickým programovacím jazykům (C, Pascal). Pomocí programovacího jazyka VAP aplikujeme příkazy řídicí logiky kterými je ovládán dopravní proud v modelu. Logika řízení se spouští během vlastní simulace a VAP interpretuje příkazy řídicí logiky a vytváří řídicí signály (např. pro změnu SSZ nebo PDZ), které jsou následně použity v dopravní síti mikrosimulačního modelu VISSIM. Koloběh řízení, viz blokové schéma Obr. 32. Z mikrosimulačního modelu lze snímat data, jako jsou např. intenzita, rychlost, obsazenost detektorů, skladba dopravního proudu, časový odstup vozidel atd. Tyto snímaná data, která odrážejí aktuální dopravní situaci lze použít jako vstup do řídicí logiky naprogramované aplikace. Logika řízení může být spuštěna minimálně jednou za každou simulační sekundu (tzn. 10 krát za 1s) poté, co dojde k pohybu vozidla v síti.



Obr. 32 Schéma řízení modelu

Určitým usnadněním při programování systému řízení je použití aplikace VisVAP [57]. VisVAP je GUI („*Graphical User Interface*“), které rozšiřuje možnosti použití jazyka VAP pro návrh systému řízení. Aplikaci VisVAP můžeme definovat jako „nástroj“ pro pohodlný návrh a editaci programu řízení např. SSZ (lze definovat jednotlivé fáze nebo celé signální skupiny) pomocí vývojových diagramů. Podoba a provedení vývojových diagramů byla převzata z RiLSA 1992 (Richtlinien für die Anlage von Lichtsignalanlagen, směrnice pro návrh světelné signalizace – programování řadičů) plus byla přidána možnost pracovat s indukčními smyčkami a dalšími funkcemi [57].

Prvním článkem věnujícím se využití aplikace VisVAP pro vytvoření fuzzy systémů řízení SSZ v mikrosimulačním modelu je publikace autora *Yulianta* z roku 2003 [58]. Je zde vytvořen model čtyřramenné průsečné křižovatky, kde každé rameno tvoří čtyřpruhová směrově rozdělená komunikace. Izolovaná křižovatka neobsahuje odbočovací jízdní pruhy (určité zjednodušení). Signální plán, který slouží pro porovnání s fuzzy systémem řízení SSZ je pevný (výpočet dle HCM 1997) a pouze dvoufázový. Jako vstupní data do fuzzy systému řízení SSZ tvůrci používají „*maximální délku kolony*“ [m] a „*průměrnou obsazenost detektorů*“ [%]. Výstupní fuzzy proměnnou je tzv. „*váha W*“ [-], která je použita ve výpočtu celkové doby zelené cyklu viz rovnice (3) a délky zelené dané fáze viz rovnice (4).

$$Total_{GT} = \left(\sum W_n - Min1 \right) * \left[\frac{(Max2 - Min2)}{(Max1 - Min1)} \right] + Min2 \quad (3)$$

$$GT_Stage_n = \frac{W_n * Total_GT}{\sum W_n} \quad (4)$$

Kde:

$\sum W_n$	celková váha pro obě fáze,
$Min1$ a $Max1$	minimální a maximální váha fáze 1,
$Min2$ a $Max2$	minimální a maximální váha fáze 2,
n	číslo fáze.

Jako Inferenční mechanismus je zde použita Mamdaniho metoda (implikace) a pro defuzzifikaci je zvolena metoda středu součtů COS (Centre of Sum). Pro tvorbu mikrosimulačního modelu autoři použili zmíněný PTV Vissim. Systém fuzzy řízení SSZ byl naprogramován pomocí jazyka VAP. Detaily tvorby a vlastní návrh fuzzy systému řízení nejsou v článku uvedeny. Jako vstupní data do modelu (intenzita, skladba dopravního proudu) jsou použity skutečné hodnoty z řízení křižovatky Sutomo-Diponegoro ve městě Surabaya (Indonésie). Výsledkem testování modelu je, že navržený fuzzy systém řízení (FLSC – fuzzy logic signal controller) přináší pouze malé zlepšení dopravních podmínek (průměrná cestovní doba, průměrné zdržení vozidel). V případě saturovaného toku jsou výsledky stejné jako u pevného signálního plánu. Autoři uzavírají článek konstatováním, že je nutné se zaměřit na optimalizaci funkcí příslušnosti vstupních proměnných eventuálně využít v systému řízení tzv. genetické algoritmy.

Druhým zajímavým článkem je práce autora *Akbase a kol.* (2003) [59]. V mikrosimulačním programu PTV Vissim byl vytvořen model čtyřramenné křižovatky kde každé rameno křižovatky obsahuje tři řadící pruhy (přímý směr, levé a pravé odbočení). Signální plán, který slouží pro porovnání s fuzzy systémem řízení SSZ je pevný a je čtyřfázový. Detektory pro vyhodnocení dopravně inženýrských dat jsou umístěny před stop čarou a uprostřed jízdních pruhů. Autoři použili pouze jedinou fuzzy vstupní veličinu do fuzzy systému řízení a to průměrný stupeň saturace (funkce příslušnosti trapezoidální). Stupeň saturace je spočten pro každý vjezd křižovatky dle vzorce (5). Rozdělení lingvistických proměnných je pouze do dvou fuzzy množin (lingvistické proměnné: střední a velká). Vstupem do výpočtu jsou dopravně inženýrská data zjištěná z detektorů.

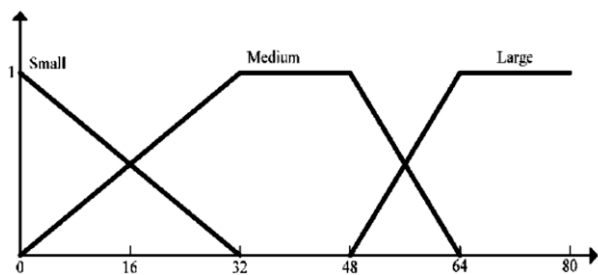
$$DS_i(k) = \frac{\sum_{j=1}^{N_i(k)} o_j}{G_i(k)} \quad , \quad i = 1,2,3,4; \quad DS_i(k) \leq 1 \quad (5)$$

Kde:

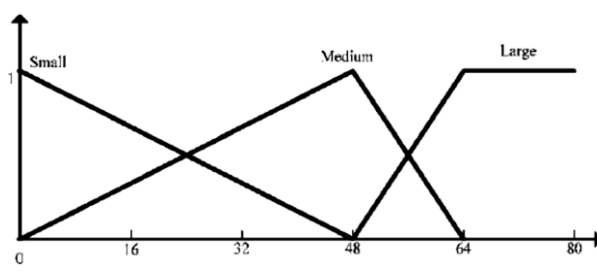
i	číslo fáze,
$G_i(k)$	délka fáze i v cyklu k ,
$N_i(k)$	počet vozidel, která přejeli přes detektor během signálu „volno“,
j	číslo vozidla,
o_i	doba obsazenosti získaná z detektoru.

Výstupní fuzzy proměnnou je délka fáze a je spočtena pro každou fázi zvlášť (funkce příslušnosti trojúhelníková). Minimální délka fáze je 5s a maximální délka je 40s. Jako Inferenční mechanismus je zde použita Mamdaniho metoda (implikace) a pro defuzzifikaci je zvolena metoda středu plochy COA. Pro tvorbu mikrosimulačního modelu autoři použili aplikaci PTV Vissim. Systém fuzzy řízení SSZ byl naprogramován pomocí jazyka VAP. Detaily tvorby a vlastní návrh fuzzy systému řízení nejsou v článku uvedeny. Vstupní intenzity si autoři zvolili - 3720 voz/h za celou křižovatku s podílem pomalých vozidel 20% detailněji viz [59]. Délka simulace byla 10 800s. Výsledkem testování modelu je, že navržený fuzzy systém řízení (FLSC – fuzzy logic signal controller) přináší velmi výrazné zlepšení měřených dopravně inženýrských charakteristik. Přínosem je 26% snížení průměrného časového zdržení vozidel a 40,7% snížení průměrného počtu zastavení vozidel tzn. velmi pozitivní výsledek oproti předešlému článku [58].

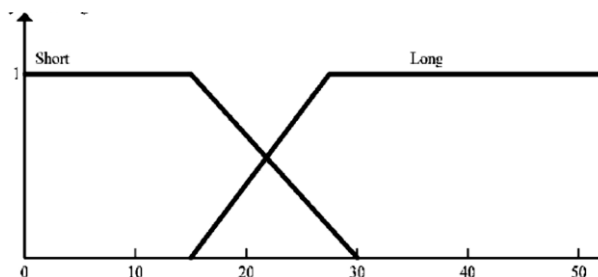
Dalším článkem, který si detailně rozebereme je publikace autorů Hsing-Han Liu Pau-Lo Hsu z roku 2006 [60]. Autorům byl velkou inspirací článek [61]. hlavně použitím fuzzy vstupních proměnných (přejaté funkce příslušnosti a redukci fuzzy pravidel z 86 na 18). Tvůrci vytvořili model čtyřramenné průsečné křižovatky. Vytvořený fuzzy systém řízení SSZ byl porovnán, jak s pevným signálním plánem, tak s adaptivním řízením, které bylo vytvořeno pouze pro tento případ. Systémy řízení byly testovány na tři různé varianty zatížení: lehké – 300 voz/h, těžké 1000 voz/h, maximální 1200 voz/h. Jako vstupní data do fuzzy systému řízení SSZ tvůrci používají „počet vozidel po červené“, „počet vozidel po zelené“ a „délku cyklu (předešlého)“. Funkce příslušnosti jednotlivých vstupních proměnných viz **Obr. 33** až **Obr. 35**. Tento typ množin byl zvolen s ohledem na menší výpočetní náročnost. Výstupní funkcí je pravděpodobnost změny aktuální délky cyklu a je definována jako funkce příslušnosti typu singleton viz **Obr. 36**.



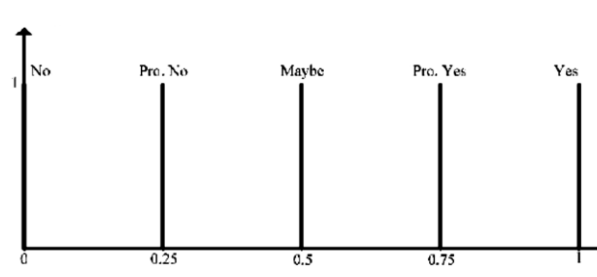
Obr. 33. Počet vozidel po červené [60]



Obr. 34. Počet vozidel po zelené [60]



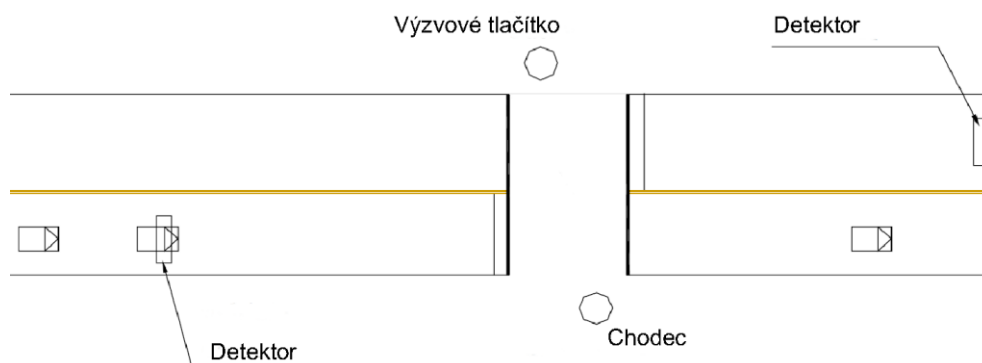
Obr. 35. Délku cyklu [60]



Obr. 36. Pravděpodobnost změny [60]

Jako Inferenční mechanismus je zde použita Mamdaniho metoda (implikace) a pro defuzzifikaci je zvolena metoda středu plochy COA (Center of Area). Pro tvorbu mikrosimulačního modelu autoři použili zmíněný PTV Vissim. Systém fuzzy řízení SSZ byl naprogramován pomocí jazyka VAP [56]. Detaily tvorby a vlastní návrh fuzzy systému řízení nejsou v článku uvedeny. Délka simulace byla 3600s. Závěrem testování modelu je, že navržený fuzzy systém řízení přináší snížení ztrátového času o 30,6% až 41,7%. (dle stupně zatížení, který je uveden výše) Pro zajímavost uvedme, že navržený adaptivní systém řízení (vyhodnocující obsazenost detektorů) přinesl snížení ztrátového času o 3% až 27% (dle stupně zatížení) oproti pevnému signálnímu plánu.

Článek autora Wanjing a kol. [62] se zaměřuje na využití fuzzy systému řízení u řízeného přechodu pro chodce. Opět je se jedná o mikrosimulační model PTV Vissim, kde je vlastní fuzzy systém řízení naprogramován pomocí jazyka VAP [56]. Schéma řešeného přechodu pro chodce se zobrazením detektorů a výzvných tlačítek vidíme na Obr. 37.



Obr. 37. Rozmístění detektorů [62]

Řízení je navrženo tak, aby proces rozhodování napodoboval řízení provozu pomocí policisty. Jako vstupní kritéria do systému je použito časové zdržení chodců a následná mezera vozidel. Cílem práce bylo najít kompromis mezi časovým zpožděním chodců a automobilů. Výsledek byl, porovnáám jak s dynamickým řízením (výzvové tlačítko) tak pevným signálním plánem. Vstupní intenzity vozidel byly vloženy v rozsahu od 100 do 900 j.voz/h. U chodců byly testovány čtyři různé varianty zatížení a to: velmi nízké – 50 chod/h, nízké 100 chod/h, střední 300 chod/h, vysoké 500 chod/h. Výsledkem článku je konstatování, že fuzzy systém řízení se snaží „najít“ kompromis mezi protiklady – minimální časová ztráta chodců a automobilů a navržený systém řízení vykazuje výborné výsledky pro všechny testované podmínky.

V závěru zmiňme článek Shoua a Xua [63], který je zajímavý použitím multi-objektivní optimalizace pro přesycenou velkou křižovatku řízenou pomocí fuzzy logiky.

Pro úplnost uvedme, že testování fuzzy systému řízení pro SSZ v mikrosimulačních modelech není pouze doménou aplikace PTV Vissim, ale lze využít i jiné aplikace například PARAMICS [64]. Jedním z mnoha článků popisujících zkoumanou problematiku je publikace autora Yanga a kol. [65]. Autoři v článku popisují použití dvoufázové fuzzy logiky pro řízení SSZ. Porovnávají mezi sebou čtyři různé typy řízení – pevný časový plán, dynamické řízení, „standardní“ fuzzy (Pappis), dvoufázová fuzzy řízení („CTFIFuzzy“) pro různé stupně zatížení. Závěrem testování modelu je, že navržený fuzzy systém řízení přináší snížení časového zdržení vozidel a délky kolon. Systém fuzzy řízení dále zlepšuje propustnost křižovatky v podobě vyšších intenzit a rychlosti vozidel.

3. Závěr

Tento stručný přehled vědeckých publikací nás seznámil s aplikací fuzzy logiky do systému řízení SSZ. Z článků je patrný přínos takového řešení a to v podobě zvýšení kapacity křižovatky (účinnosti řízení), zvýšení plynulosti (snížení dopadů na životní prostředí) a zvýšení bezpečnosti dopravy. Za posledních třicet pět let publikovala celá řada autorů svůj pohled na věc v oblasti použití fuzzy systému řízení u SSZ (izolované i soustavy) od teoretických začátků až po praktickou realizaci. Každý z autorů se pokoušel o svůj přístup, ať při výběru vstupních proměnných nebo v definování funkcí příslušnosti nebo v podobě sestavení algoritmů řízení. Výsledkem je vždy znatelný přínos fuzzy systému řízení na kvalitu dopravního proudu a to i oproti dynamickému řízení. Jako velmi slibné se jeví budoucí použití tzv. vícefázové fuzzy logiky řízení, které vykazovalo výrazné zlepšení kvality provozu i u velmi silně zatížených křižovatek. Dalším logickým krokem při vývoji systému řízení SSZ (ve spojení s fuzzy) bylo použití genetických algoritmů, neuronových sítí (neuro fuzzy systém) nebo petriho sítí.

Citovaná literatura

- [1] L. A. Zadeh, „Fuzzy sets,“ *Inf. & Control*, sv. 8, pp. 338-353, 1965.
- [2] L. A. Zadeh, „Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes,“ *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.*, sv. 1, pp. 28-44, 1973.
- [3] E. Mamdani, „Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant,“ *Electrical Engineers*, sv. 121, pp. 1585-1588, 1974.
- [4] V. Novák, *Základy fuzzy modelování*, Ostrava: BEN, 2000.
- [5] S. Hoogendoorn, S. Hoogendoorn-Lanser a H. Schuurman, *Fuzzy Perspectives in Traffic Engineering*, 1999.
- [6] U. Chattaraj a M. Panda, „SOME APPLICATIONS OF FUZZY LOGIC IN TRANSPORTATION ENGINEERING,“ *Challenges and Applications of Mathematics in Science and Technology (CAMIST)* held in Mathematics department, NIT Rourkela., 2010.
- [7] O. Modrlák, *Fuzzy řízení a regulace*, Liberec: TUL, 2002.
- [8] Pappis C. a Mamdani E., „A fuzzy logic controller for a traffic junction,“ *IEEE transactions on systems, man and cybernetics*, sv. No. 10, pp. 707-717, 1977.
- [9] E. H. MAMDANI, „Application of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning Using Linguistic Synthesis,“ *Fuzzy Sets and Systems*, sv. 26, p. 1182–1191, 1977.
- [10] M. Nakatsuyama, H. Nagahashi a N. Nishizuka, „Fuzzy logic phase controller for traffic junctions in the one-way arterial road,“ *Proc., IFAC 9th Triennial World Cong., Budapest, Hungary,*, p. 2865–2870, 1984.
- [11] S. Chiu, „Adaptive traffic signal control using fuzzy logic,“ *Intelligent Vehicles '92 Symposium*, pp. 98-107, 1992.
- [12] R. Bisset a L. Kelsey, „Simulation of traffic flow and control using conventional, fuzzy, and adaptive methods,“ *Conference: European simulation multiconference, York (United Kingdom)*, 1992.
- [13] R. Kelsey, K. Bisset and M. Jamshidi, „A simulation environment for fuzzy control of traffic systems,“ in *12th IFAC-World Cong.*, Sydney, 1993.
- [14] Favilla J., Machion A. a Gomide F., „Fuzzy Traffic Control: Adaptive Strategies,“ *In: proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, sv. Vol. 1, pp. 505-511, 1993.

- [15] R. Hoyer a U. Jumar, „Fuzzy control of traffic lights,“ v *Fuzzy Systems, 1994. IEEE World Congress on Computational Intelligence., Proceedings of the Third IEEE Conference on Computing & Processing (Hardware/Software)*, 1994.
- [16] Kim S., Applications of Petri Networks and Fuzzy Logic to Advanced Traffic Management Systems, New York, USA: Ph.D. thesis, Polytechnic University, 1994.
- [17] Sayers T., Bell M.G.H., Mieden T. a Busch F., „Improving the Traffic Responsiveness of Signal Controllers Using Fuzzy Logic,“ *Urban Congestion Management, IEE Colloquium on*, pp. 6/1- 6/4, 1995.
- [18] J.-H. Lee, K.-M. Lee a L.-K. Hyung, „Fuzzy controller for intersection group,“ v *Industrial Automation and Control: Emerging Technologies, 1995., International IEEE/IAS Conference on*, 1995.
- [19] K. K. Tan, M. Khalid a R. Yusof, „INTELLIGENT TRAFFIC LIGHTS CONTROL BY FUZZY LOGIC,“ *Malaysian Journal of Computer Science*, 9(2), p. 29–35, 1996.
- [20] J. Kim , „A fuzzy logic control simulator for adaptive traffic management,“ v *Fuzzy Systems, 1997., Proceedings of the Sixth IEEE International Conference on* , 1997.
- [21] G. Beauchamp-Baez, E. Rodriguez-Morales a E. Muniz-Marrero, „A fuzzy logic based phase controller for traffic control,“ v *In: Proc., The Sixth IEEE Int. Conf. Fuzzy Systems*, 1997.
- [22] J. Niittymäki a S. Kikuchi, „Application of fuzzy logic to the control of a pedestrian crossing signal,“ *J. Transp. Res. Bd.*, 1651, 1998.
- [23] Sayers T., Anderson J. a Bell M., „Traffic Control System Optimisation: A Multiobjective Approach,“ *Mathematics in Transport Planning and Control. Proceedings of the 3rd IMA International Conference on Mathematics in Transport Planning and Control. Pergamon, Elsevier Science, UK*, pp. pp. 37-46, 1998.
- [24] Trabia M.B., Kaseko M.S. a Ande M., „A two-stage fuzzy logic controller for traffic signals,“ *Transportation Research Part C*, sv. Vol.7, pp. 353 - 367, 1999.
- [25] J. Niittymäki a M. Pursula, „Signal control using fuzzy logic,“ *Fuzzy Sets and Systems, International Journal of Soft Computing*, Vol. 116, No 1,, pp. 11-22, 2000.
- [26] J. Niittymäki, „Using Fuzzy Logic to Control Traffic Signals at Multi-Phase Intersections,“ v *Reusch B. (Ed.). Computational Intelligence - Theory and Applications. International Conference*, 1999.
- [27] J. Niittymäki, „General fuzzy rule base for isolated traffic signal control—Rule formulation,“ v *Transp. Planning and Technol.*, 24(3), 2001.
- [28] Niittymäki, J., „Fuzzy logic two-phase traffic signal control for coordinated one-way streets,“ *Soft Computing Methods in Industrial Applications, 1999. SMCia/99. Proceedings of the 1999 IEEE*

Midnight-Sun Workshop on , pp. 69- 74, 1999.

- [29] J. Niittymäki a R. Nevala, „Fuzzy Adaptive Traffic Signal Control - Principles and Results,“ v *IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference, Joint 9th*, Vancouver, 2001.
- [30] J. Niittymäki, „Installation and experiences of field testing a fuzzy signal controller,“ v *European Journal of Operational Research* (0377-2217), 2001.
- [31] J. Niittymäki a V. Kononen, „Traffic Signal Controller Based on Fuzzy Logic,“ v *Conference Proceedings, 2000 IEEE International Conference on Systems, Man & Cybernetics*, Nashville, 2000.
- [32] J. Niittymäki a M. Mäenpää, „The role of fuzzy logic public transport priority in traffic signal control,“ v *Traffic Engineering and Control, International Journal of Traffic Management and Transportation Planning*, 2001.
- [33] J. Niittymäki, FUZZY TRAFFIC SIGNAL CONTROL (Principles and Applications), Helsinki: Helsinki University of Technology Transportation Engineering Publication 103, 2002.
- [34] K. Koskinen, N. Setälä a I. Kosonen, „Fuzzy Signal Control – FUSICO (Poster),“ HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY - Laboratory of Transportation Engineering, Helsinki, 2006.
- [35] P. Příbyl a M. Svítek, *Inteligentní dopravní systémy*, Praha: BEN, 2001.
- [36] J. Niittymäki, R. Nevala a E. Turunen, „Fuzzy traffic signal control and a new interface method—Maximal fuzzy similarity,“ v *In: Proc., The 13th Mini-EURO Conf. (Handling Uncertainty in the Analysis of Traffic and Transportation Systems) and the 9th Mtg. EURO Working Group on Transportation (Intermodality, Sustainability and Intelligent Transportation Systems*, 2001.
- [37] J. Niittymäki a E. Turunen, „Traffic signal control on similarity logic reasoning,“ *Fuzzy Sets and Systems*, p. 109–131, 2003.
- [38] E. Bingham, *Neurofuzzy Traffic Signal Control*, : Master's Thesis, Helsinki University of Technology, Department of Engineering Physics and Mathematics, 1998.
- [39] E. Bingham, „Reinforcement learning in neurofuzzy traffic signal control,“ , 2002.
- [40] P. Hotmar a M. Palatová, *Fuzzy řízení dopravy na světelné křižovatce*, Praha: VŠCHT, 2002.
- [41] J. Krčál, *Metody výpočtu a druhy řízení dopravního uzlu*, Praha: diplomová práce FD ČVUT, 2003.
- [42] C.-H. Chou a J.-C. Teng, „A fuzzy logic controller for traffic junction signals,“ , 2002.
- [43] E. Gedizlioglu a Y. S. Murat, „A new approach for fuzzy traffic signal control,“ Bari, 2002.
- [44] S. Murat a E. Gedizlioglu, „A fuzzy logic multi-phased signal control model for isolated junctions,“ *Transportation Research Part C*, sv. 13(1), p. 19–36, 2005.

- [45] M. A. Jacques, M. Pursula, J. Niittymäki a I. Kosonen, „The impact of different approximate reasoning methods on fuzzy signal controllers,“ Bari, 2002.
- [46] Y.-C. Chiou a L. Lan, „Adaptive traffic signal control with iterative genetic fuzzy logic controller (GFLC),“ Taipei, 2004.
- [47] R. Zeng, G. Li a L. Lin, „Adaptive Traffic Signals Control by Using Fuzzy Logic,“ Kumamoto, 2007.
- [48] W.-b. Zhang, B.-z. Wu a W.-j. Liu, „Anti-Congestion Fuzzy Algorithm for Traffic Control of a Class of Traffic Networks,“ v *IEEE International Conference on Granular Computing*, 2007.
- [49] Y. Hu, P. Thomas a R. Stonier, „Traffic Signal Control using Fuzzy Logic and Evolutionary Algorithms,“ v *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, 2007.
- [50] Y. Hu, A. Chiou a Q. Han, „Hierarchical Fuzzy Logic Control for Multiphase Traffic Intersection Using Evolutionary Algorithms,“ v *Industrial Technology, ICIT 2009. IEEE International Conference on Topic(s): Computing & Processing (Hardware/Software) ; Power, Energy, & Industry Applications ; Robotics & Control Systems*, 2009.
- [51] Y. Li, H. Li a X. Fan , „Design of an adaptive fuzzy logic controller for traffic signals,“ v *Intelligent Control and Automation, WCICA 2008. 7th World Congress on Topic(s): Computing & Processing (Hardware/Software) ; Robotics & Control Systems*, 2008.
- [52] K. Wen, W. Yang a S. Qu, „A stochastic adaptive traffic signal control model based on fuzzy reinforcement learning,“ v *Computer and Automation Engineering (ICCAE), The 2nd International Conference on*, 2010.
- [53] VISSIM 5.40-01 - User Manual, 2011.
- [54] R. Wiedemann, Simulation des Strassenverkehrsflusses, Karlsruhe, Germany: Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, 1974.
- [55] S. Panwai, „Comparative evaluation of microscopic car-following behavior,“ *Intelligent Transportation Systems*, sv. 6, pp. 314 - 325 , 2005.
- [56] VAP 2.16 Interface, User Manual, 2012.
- [57] VisVAP 2.16 User Manual, 2006.
- [58] B. Yulianto, „Application of fuzzy logic to traffic signal control under mixed traffic conditions,“ *Traffic Engineering and Control (0041-0683)*, Sv. %1 z %244,Iss.9, pp. 332-336, 2003.
- [59] V. Topuz, A. Akbas, H. H. Celik a M. Ergun, „Fuzzy Signal Controller for Critical Intersections in Istanbul,“ 2003.
- [60] L. Hsing-Han a H. Pau-Lo, „Design and Simulation of Adaptive Fuzzy Control on the Traffic

Network," v *SICE-ICASE, 2006. International Joint Conference*, 2006.

- [61] D. Kaur, E. Konga a E. Konga, „Fuzzy Traffic Light Controller," v *Circuits and Systems, Proceedings of the 37th Midwest Symposium on*, 1994.
- [62] Wanjing Ma; Wanda Ma; Xiaoguang Yang, „Development and Evaluation of a Fuzzy Logic Control Approach for Pedestrian Crossing," *Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), 2008 International Conference on Volume 1*, pp. 882 - 886, 2008.
- [63] Y. Shou a J. Xu, „Multi-objective optimization of oversaturated signalized intersection based on fuzzy logic," v *Intelligent Control and Automation (WCICA), 2010 8th World Congress*, 2010.
- [64] R. a. T. A. o. N. NSW, Paramics microsimulation modelling - RTA handbook [electronic resource] / RTA, [Haymarket, N.S.W.] : RTA, 2009.
- [65] Wenchen Yang, Lun Zhang, Zhaocheng He, Yuchen Yang, „Urban Traffic Signal Two-stage Combination Fuzzy Control and Paramics Simulation," v *International Conference on Systems and Informatics (ICSAI 2012)*, 2012.