

FUZZY ŘÍZENÍ DOPRAVY NA SVĚTELNÉ KŘÍŽOVATCE

Petr Hotmar, Mara Palatová

ústav Počítačové a řídicí techniky, VŠCHT Praha

ABSTRAKT :

V tomto projektu se zaměřuji na inteligentní dynamický management dopravních situací na pozemních komunikacích. Konkrétní analýza byla provedena v rámci využití fuzzy řízení světelné křižovatky, se schopností adaptivní reakce na vzniklé dopravní situace.

1. ÚVOD

Na úvod bych rád zdůraznil, že ačkoliv se tento projekt zabývá konkrétní aplikací umělé inteligence v silniční dopravě, je naprosto analogický přístup možno použít v širokém spektru aplikací automatizovaných systémů řízení, včetně chemického a potravinářského průmyslu.

Současné odhady uvádějí, že 65% přesunů na pozemních komunikacích v dopravní špičce a 10% veškerých denních přesunů ve městě je spojeno s dopravní kongescí. Neschopnost současné silniční sítě vyrovnat se se zvýšenými dopravními nároky byla identifikována jakožto jeden z nejvíce akutních problémů dopravní infrastruktury za poslední desetiletí.

Inteligentní správa dopravy je jedním z nutných předpokladů pro zlepšení situace. Zabezpečuje náležitou intervenci v případě variabilních dopravních podmínek, a tím větší flexibilitu a výkonnost. Umělá inteligence hraje významnou roli v sofistikovaných řídicích systémech. Mezi nejrozšířenější techniky AI v této oblasti patří fuzzy logika využívaná k vlastnímu řízení, evoluční algoritmy, nejčastěji genetického charakteru, jakožto optimalizační nástroj a v neposlední řadě neuronové sítě s jejich predikčními schopnostmi. Poslední dvě jmenované techniky určují směr možného budoucího rozšiřování tohoto projektu pro účely jeho využití v komplexních aplikacích.

Matematický model řízení světelného semaforu se konstruuje velmi obtížně. Hlavní důvod spočívá v silně stochastickém charakteru příjezdu vozidel na světelnou křižovatku. Proto celý systém, stejně jako většina biologických, ekologických a socioekonomických fenoménů vykazuje holistické vlastnosti a známky synergismu, a proto je tak obtížně formalizovatelný, např. pomocí soustav parciálních diferenciálních rovnic.

Teoreticky jednoduchý fuzzy přístup, který nám umožňuje formalizovat znalosti, které jsou ve vágní jazykové formě, se zde tudíž přímo nabízí. Dostatečnou satisfakci nám navíc poskytuje Fuzzy Aproximační Teorém [1], který tvrdí, že libovolnou spojitou funkci můžeme aproximovat s libovolnou přesností pomocí konečné množiny fuzzy proměnných, hodnot a pravidel. Z obecného hlediska patří k nejnápadnějším výhodám fuzzy systému [2]:

- ✓ snadná implementace
- ✓ jednoduchý a přirozený koncept
- ✓ flexibilita
- ✓ tolerance "vágních informací", možnost využití zkušeností expertů
- ✓ možnost modelovat nelineární systémy libovolného stupně komplexnosti
- ✓ zvýšená průhlednost designu díky lingvistické bázi znalostí.

Celý projekt byl zpracován v počítačovém prostředí SIMULINK[®], s výjimkou externí rutiny – M-file – pro kvantitativní hloubkovou analýzu fronty, která byla vytvořena v prostředí MATLAB[®]. Jádrem modelu využívá pro svoji práci aplikační toolbox pro fuzzy logiku, který mimo jiné zaručuje plně kompatibilní kooperaci s externí autonomní fuzzy jednotkou, což ve svých důsledcích nabízí též možnost začlenění celého systému do programů psaných ve vyšších programovacích jazycích, např. jazyce C.

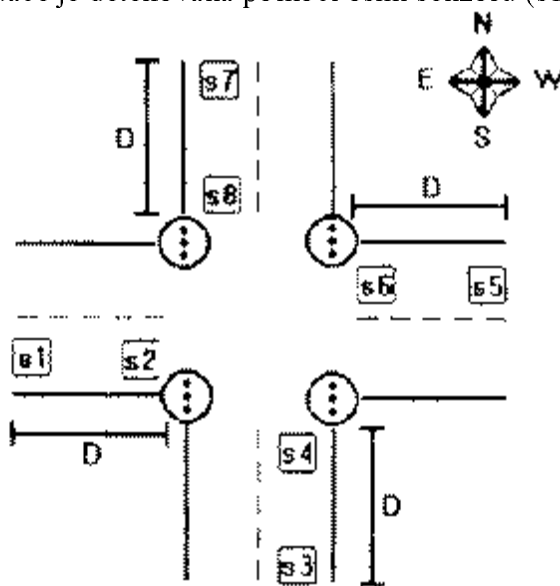
SIMULINK[®] patří mezi jeden z nejúčinnějších a nejkvalitnějších softwarových nástrojů určených k modelování, simulaci a analýze dynamických systémů. K celistvému pochopení této práce je nutná dostatečná erudice v tomto softwaru a příslušném matematickém aparátu, včetně základů fuzzy teorie.

2. FUZZY DESIGN

Před vlastním návrhem inferenční fuzzy jednotky je nutno stanovit příslušné specifikace, týkající se provozu na křižovatce a jejích vlastností.

Následující specifikace vycházejí z vědecké práce [3] konfrontující problematiku fuzzy řízení dopravy, která byla hlavním podnětem a motivací pro tento projekt :

- ✓ světelná křižovatka je lokalizována v místě křížení dvou silničních ramen se stejnou hladinou významnosti
- ✓ doprava je řízena pomocí čtyř dvousvětelných semaforů (viz. Obr.2)
- ✓ aktuální dopravní situace je detekována pomocí osmi senzorů (s1-s8)



Obr. 2 – schéma křižovatky

Každý ze senzorů s1, s3, s5, s7 načítá počet vozidel vstupujících do aktivní zóny křižovatky, zatímco senzory s2, s4, s6 a s8 načítají počet vozidel projíždějících křižovatkou. Diferenci těchto údajů jsou získány aktuální délky front (veličiny XA/BQ a YA/BQ odpovídající hodnotám D na Obr. 2.) ve všech směrech – tedy vstupní hodnoty pre-processingového modulu :

$$XAQ = S1 - S2$$

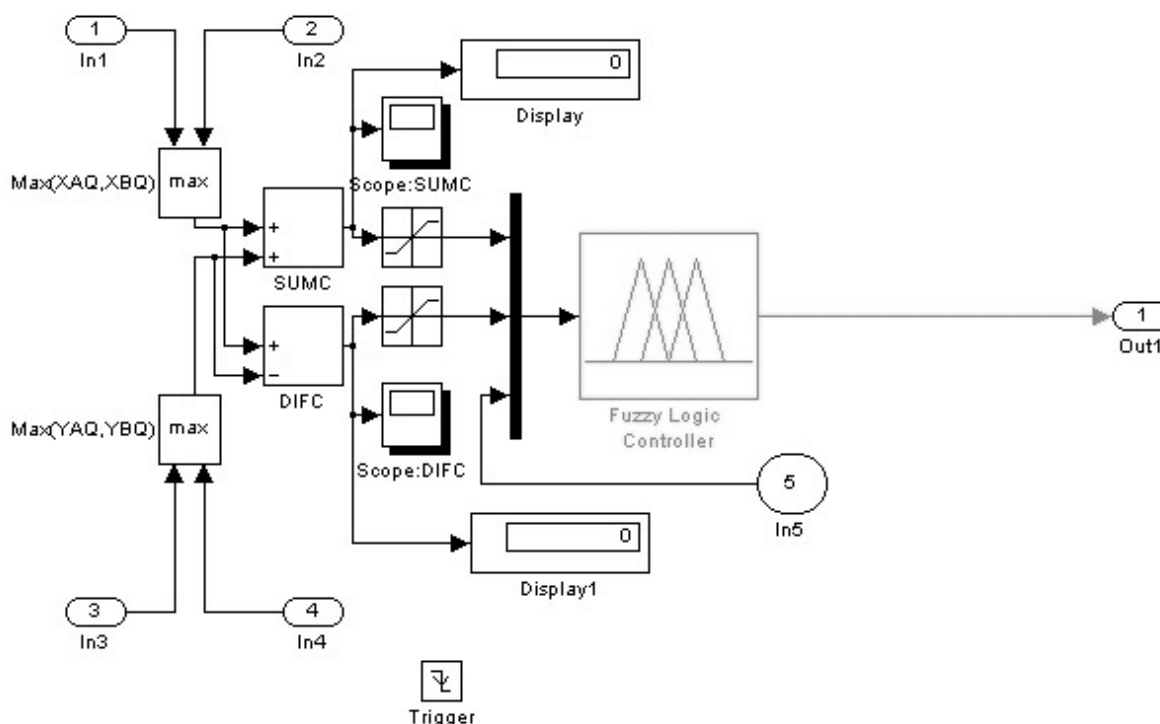
$$XBQ = S5 - S6$$

$$YAQ = S3 - S4$$

$$YBQ = S7 - S8$$

Vzdálenost mezi párovými senzory je parametrem křížovatky a určuje maximální délku aktivní zóny. Součástí modulu jsou též horní omezovače (horní saturace vnitřních senzorů), s jejichž pomocí je realizován další parametr křížovatky – její propustnost.

Tok dat je specifikován 5 fázemi : Pre-processingem, Fuzzyfikací (převodem čísla z univerza na funkci příslušnosti), Vyhodnocením pravidel (aplikace fuzzy operátoru a fuzzy metody), Defuzzyfikací (agregace výstupních fuzzy množin a konverze funkční hodnoty na číslo pomocí vhodného funkcionálu, v tomto případě metodou centroidů) a Post-processingem. Pre-processing a následné fuzzy zpracování jsou v modelu realizovány v subsystému, nazvaném Centrální Mozek Křížovatky, tedy CMK (viz. Obr. 3).



Obr. 3 – CMK (Fuzzy řadič s pre-processingem)

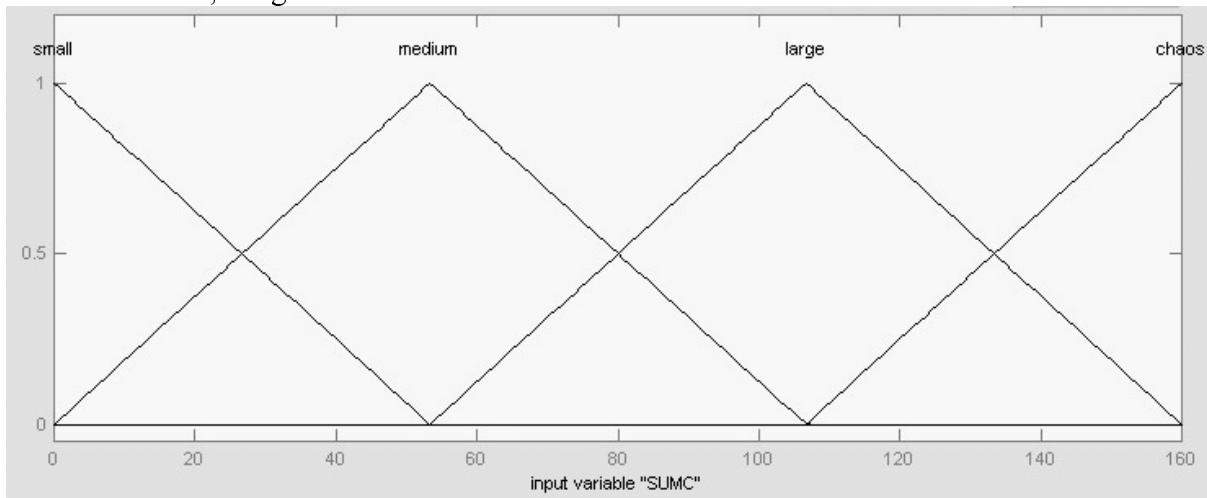
Vstupní proměnné fuzzy řadiče jsou tři :

- a) celková suma aut $SUMC = \max(XAQ, XBQ) + \max(YAQ, YBQ)$
- b) celková diference aut $DIFC = \max(XAQ, XBQ) - \max(YAQ, YBQ)$
- c) dopravní intervaly RUSH HOURS

Při volbě primárních funkcí příslušnosti (odpovídajících jednotlivým hodnotám vstupních proměnných) bylo poustupováno heuristicky s přihlédnutím k expertním odhadům na základě změřených dat a k Weber-Fecherovu zákonu [1], podle něhož má většina našich smyslů logaritmickou statistickou charakteristiku a tudíž je vhodné nadměrně rozložit fuzzy množiny okolo nuly. Ten byl zohledněn u volby funkcí příslušnosti odpovídajících dopravním intervalům, jelikož lidské vnímání jednotlivých denních period je značně subjektivní a individuální.

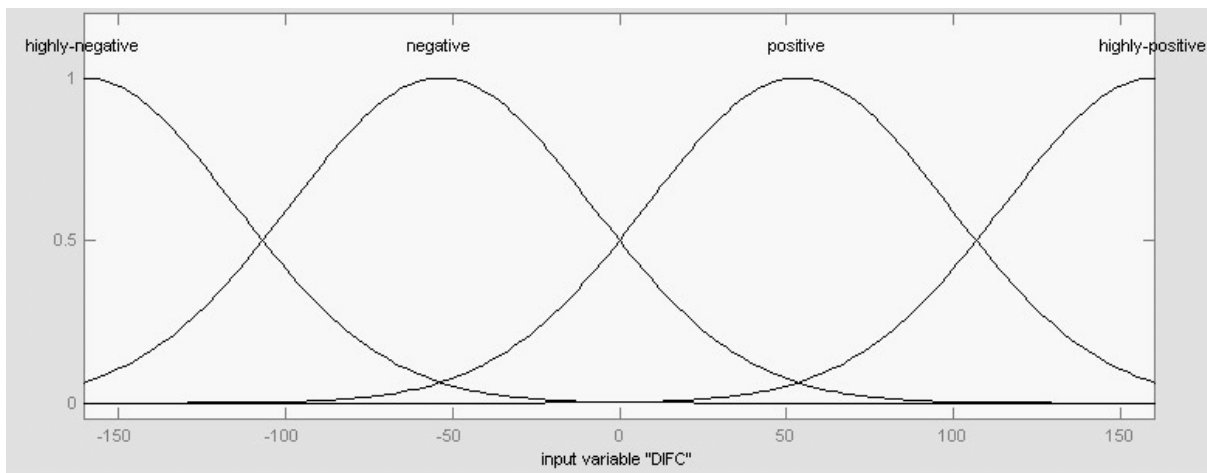
Při fuzzyfikaci byly použity následující překrývající se funkce příslušnosti (viz. Obr.3.1-3.3) :

- Pro celkovou sumu aut SUMC byly na univerzu s experimentálně stanoveným rozsahem definovány 4 lineární funkce trojúhelníkového tvaru, nesoucí výmluvná označení Small, Medium, Large a Chaos



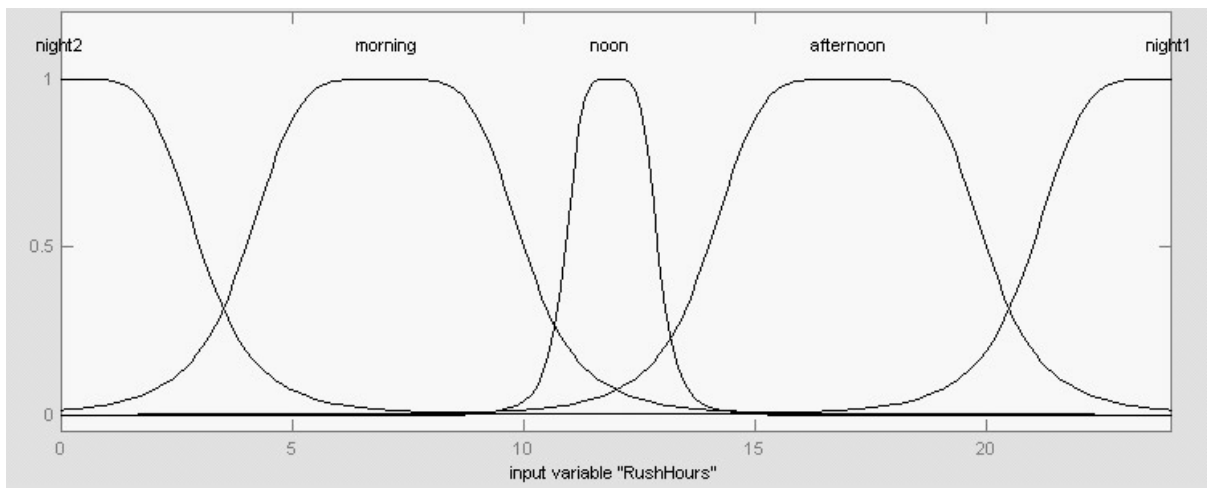
Obr. 3.1

- Pro proměnnou DIFC vyjadřující celkový rozdíl aut byly na univerzu odpovídajícím proměnné SUMC definovány 4 Gaussovy distribuce s označeními Highly negative, Negative, Positive, Highly positive



Obr. 3.2

- Konečně fuzzyfikaci proměnné RUSH HOURS zajišťují sigmoidální zvonové funkce definované na 24-hodinovém univerzu : Morning, Noon, Afternoon, Night1, Night2



Obr. 3.3

Vzhledem k aproximaci silně nelineárního systému je vlastní fuzzy regulátor realizován jako Sugenovský model 0.řádu, kdy konsekvent pravidla (část uvedená za klíčovým slovem THEN) již není fuzzy výrok, nýbrž pouze singleton (konstanta) a defuzzyfikace se tedy redukuje na výpočet váženého průměru singletonů.

Výstupní proměnné fuzzy řadiče jsou dva :

a) Doba trvání cyklu (Cycle Time, CT), tedy součet intervalu zeleného a červeného světla

✓ nabývá 8 konstantních hladin v normalizovaném rozsahu :

Small1 (hodnota 0.1)	Small2 (hodnota 1)
Middle1 (hodnota 0.3)	Middle2 (hodnota 0.7)
Large1 (hodnota 0.6)	Large2 (hodnota 0.4)
Chaos (hodnota 0.9)	Chaos2 (hodnota 0.2)

b) Poměr zelená/červená (Green/Red Ratio, GRR)

✓ nabývá 4 konstantních hladin (3/1, 1/3, 5/1, 1/5)

Hladiny byly stanoveny experimentálně.

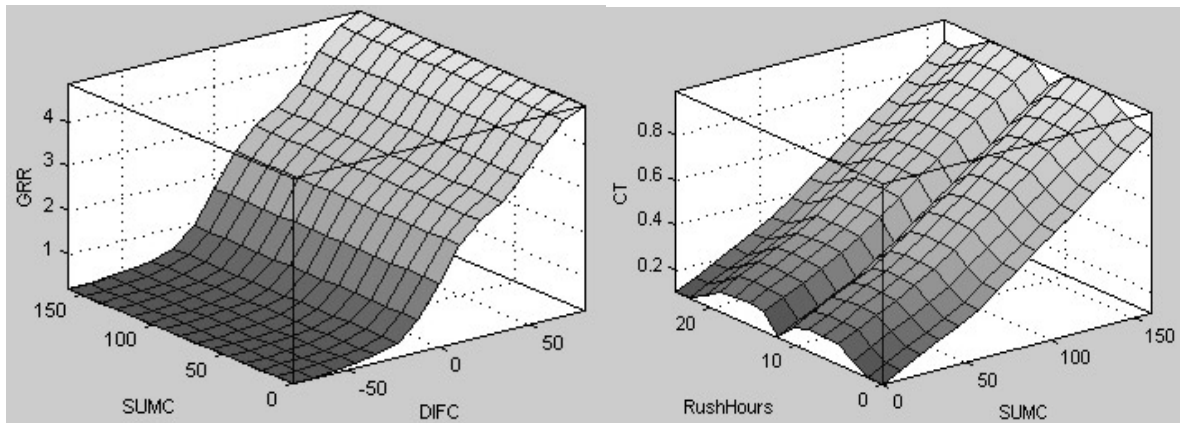
Báze pravidel se sestává z 80 IF-THEN pravidel plynoucích z možných kombinací uvedených parametrů s využitím fuzzy operátoru konjunkce AND k vyhodnocení antecedentu (části uvedené za klíčovým slovem IF). Pro ilustraci předkládám dvě reprezentativní pravidla - pro výstup CT a GRR :

IF SUMC is Small AND RUSH-HOURS is Morning
IF DIVC is Positive

THEN CT is Small2
THEN GRR is 3/1

Další pravidla byla odvozena analogicky.

Chování fuzzy řadiče je dobře patrné z tvaru přechodové funkce, nazývané Regulační Povrch (viz. Obr.4, druhá část). Pro ten jsou typické dva extrémy – doba trvání cyklu CT je větší během ranní a odpolední dopravní špičky. Mimoto roste doba trvání cyklu též s rostoucí celkovou sumou aut SUMC.



Obr. 4

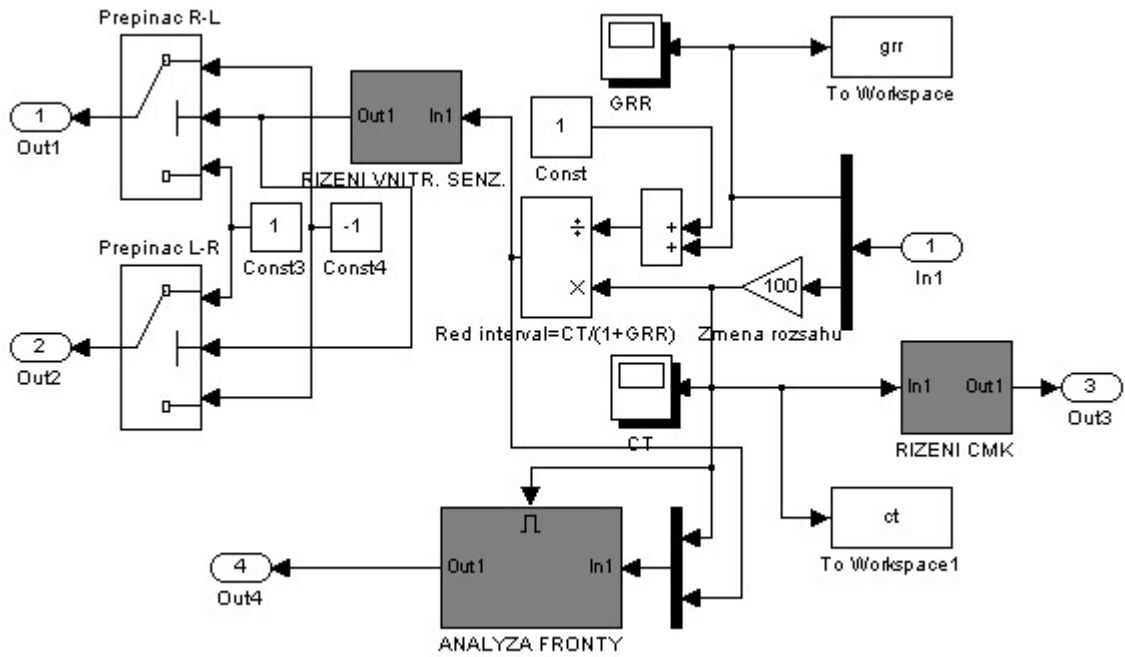
3. ŘÍZENÍ

Z Obr. 5 je patrné schéma řídicího obvodu. Výstupní fuzzy proměnné vstupují do obvodu portem č.1, načež je explicitní substitucí řešena algebraická soustava dvou rovnic o dvou neznámých (interval červeného a zeleného světla), plynoucí ze zavedení proměnných CT a GRR. Zapojen je též operační zesilovač zajišťující transformaci normalizovaného rozsahu do hodnot daných maximální dobou trvání cyklu (parametr křižovatky).

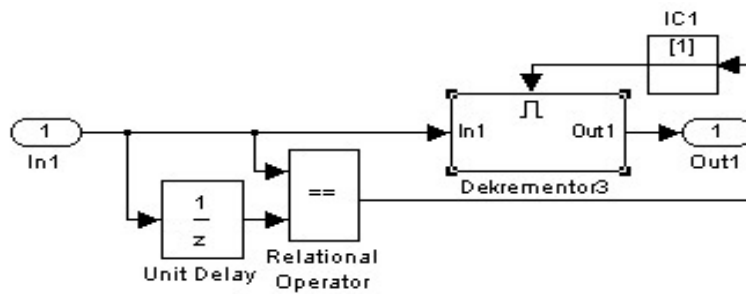
Zbylá část obvodu generuje klíčové řídicí signály pro ovládání senzorů a CMK, a tím zajišťuje komplexní synchronizaci a integritu celého zařízení. Podstata signálů vychází z jednoduché koncepce časové dekrementace výstupních signálů fuzzy řadiče. Dekrementory jsou tudíž nastaveny na hodnoty Doby Trvání Cyklu (v případě řízení CMK) a Doby Trvání Červeného světla (v případě řízení interních senzorů). Po překročení nulového prahu dekrementorů dojde ke generaci příslušných signálů. CMK, jakožto subsystém s jednorázovým spuštěním (triggered subsystem), je vždy po uplynutí Doby Trvání Cyklu, během které se nachází v latentním stavu, opětovně aktivován pro jednorázovou evaluaci aktuálních dat ve fuzzy řadiči a znovu odpojen na novou Dobu Trvání Cyklu. Interní senzory, které pracují na principu subsystému s dlouhodobým spuštěním (enabled subsystem), jsou aktivní vždy během Intervalu Červeného, případně Zeleného Světla. Konkrétní výběr typu intervalu je přirozeně odvislý od typu ramene křižovatky (v horizontálním nebo vertikálním směru), na kterém jsou senzory lokalizovány. Dále je zde zapojen bistabilní klopný obvod, který je tvořen dvěma přepínači a jehož funkce spočívá v zabezpečení kontinuity provozu ovládáním senzorů v příslušném směru – tedy zatímco v jednom směru projíždějí vozidla křižovatkou, v druhém směru vozidla stojí a tvoří se fronta. Po překlapaní obvodu se role vymění. Na Obr.6 vidíme detailní zapojení dekrementoru, který je aktivován vždy na příslušnou dobu řídicím signálem. Ten je vytvářen s využitím jednoduchého mechanismu komparace dvou po sobě jdoucích hodnot pomocí relačního operátoru identity, a tedy vždy po dobu odpojení CMK, kdy je na vstup komparátoru přiváděna spočtená, konstantní hodnota, je dekrementor aktivní. Po novém výpočtu je krátkodobě odpojen, nastaven na novou hodnotu a opět aktivován.

Vlastní dekrementor (Obr. 7) byl konstruován s využitím vlastností zpožďovací jednotky ve smyčce.

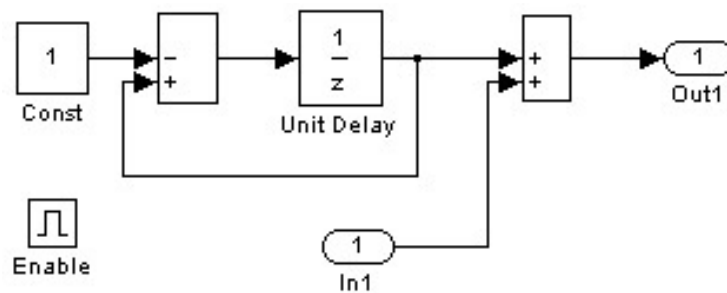
Bloky počátečních podmínek (IC bloky) jsou v řídicích obvodech zapojeny z důvodu překonání náběhové diskontinuity při spuštění simulace.



Obr. 5 – Řídicí obvod



Obr. 6 – Řízení CMK a interních senzorů

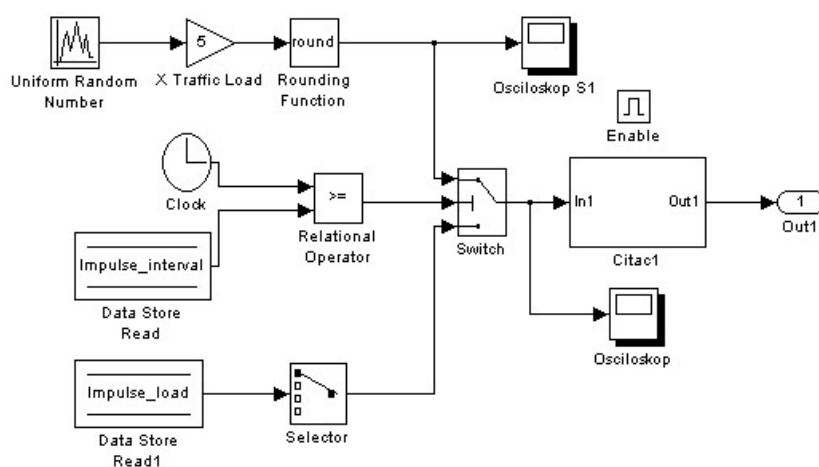


Obr. 7 – Schéma dekrementoru

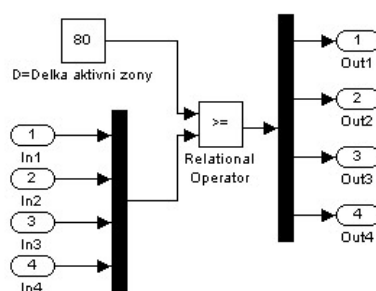
4.SENZORY

Srdcem každého ze 4 externích senzorů (viz. Obr. 8) byl pro zjednodušené účely simulace zvolen generátor pseudonáhodných čísel s rovnoměrným rozdělením, který simuluje stochastický příjezd vozidel do aktivní zóny s vhodnými fluktuacemi blízkými realitě. Důvod

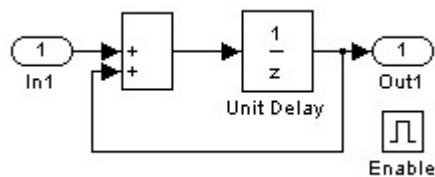
implementace externího senzoru jakožto dlouhodobě spouštěného subsystému plyne z nutnosti prevence překročení kapacity křižovatky, především při akutních nárazových scénářích. Proto je v modulu Hlídač Zóny (viz. Obr. 9) pomocí relačního komparátoru a multiplexoru (zajišťuje sběr a rozvod dat z/do jednotlivých ramen) průběžně porovnávána délka fronty s maximální povolenou délkou aktivní zóny (parametr D). V negativním případě dochází k pozastavení příjezdu vozidel, které trvá až do upravení stavu. Tato zdánlivě irelevantní limitace příjezdu vozidel hraje klíčovou roli především pro udržení vstupních proměnných fuzzy regulátoru na příslušných univerzech. Přídavné bloky zakomponované v obvodu umožňují provádět simulace nárazových vln ve všech ramenech křižovatky (Impulse load) po dobu zvoleného časového intervalu (Impulse interval) - např. při simulaci zátěže křižovatky po skončení sportovního utkání. Čítač, pracující jako inkrementor (viz. Obr. 10) je zároveň i prakticky jedinou součástí interních senzorů – ty mají za úkol pouze simulovat pravidelný průjezd vozidel křižovatkou (s ohledem na její propustnost) při aktivním zeleném světle.



Obr. 8 – Externí senzor



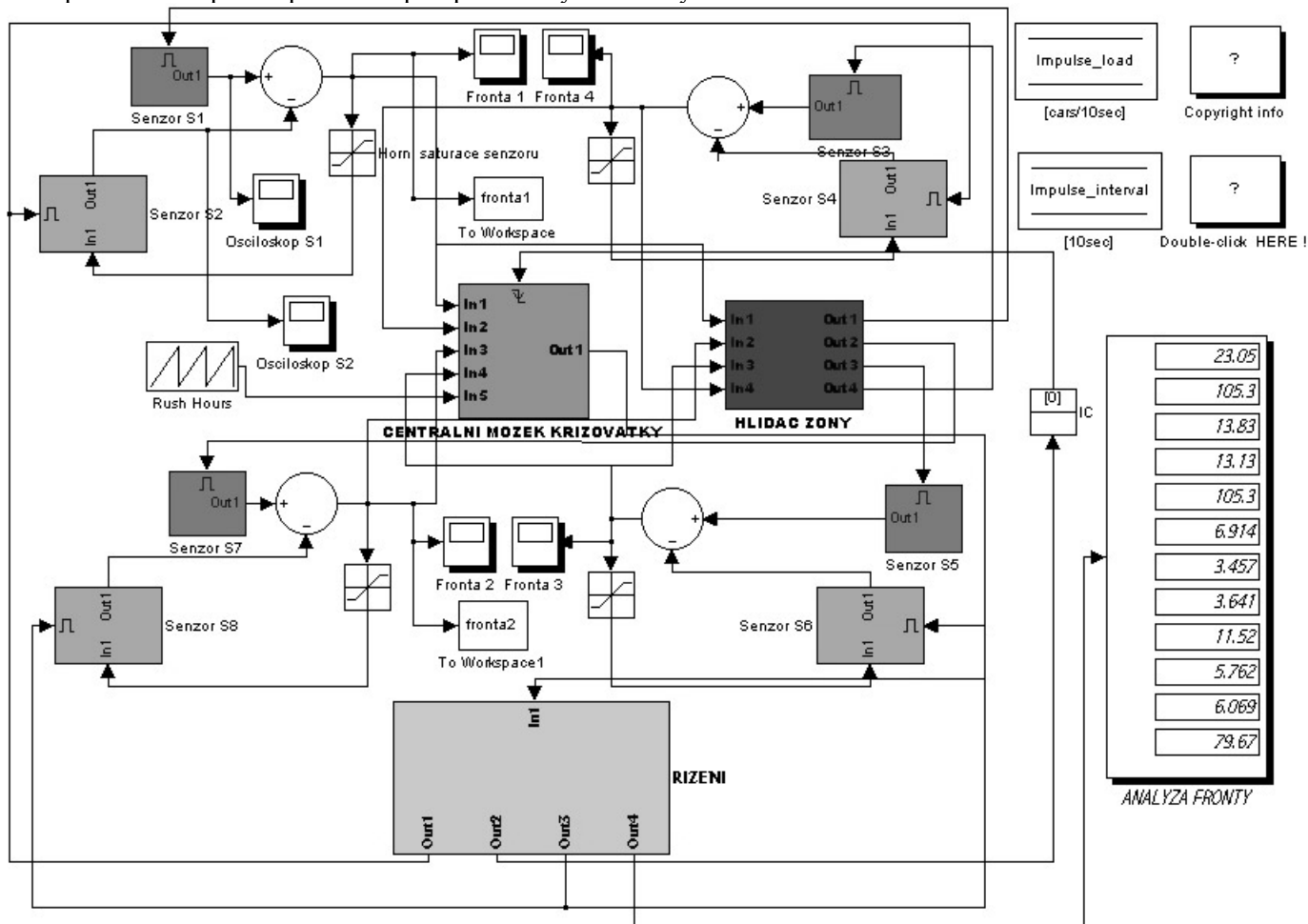
Obr. 9 – Hlídač Zóny



Obr. 10 – Interní senzor/Inkrementor

5. CELKOVÉ SCHEMA

Globální zapojení celého zařízení je patrné z Obr. 11. Dominantními částmi jsou zde subsystémy Centrální Mozek Křižovatky (fuzzy řadič s pre-processingem), Řízení (řídící obvod) a 8 senzorů – 4 interní a 4 externí – každý pár se svým sumačně/rozdílovým blokem pro výpočet délky fronty. V pravé části je markantní displej zobrazující časově proměnné hodnoty ukazatelů pocházejících z analýzy fronty (viz. dále), jejichž pořadí systematicky odpovídá pořadí jejich výpočtu. Model je osazen několika osciloskopy monitorujícími především délku front na jednotlivých ramenech křižovatky a některé další pomocné veličiny. Dále jsou zde obsaženy též informativní a help ikony, spolu se vstupními pamětmi pro parametry nárazových simulací.



Obr. 11 – globální pohled na model

6. ANALÝZA FRONTY

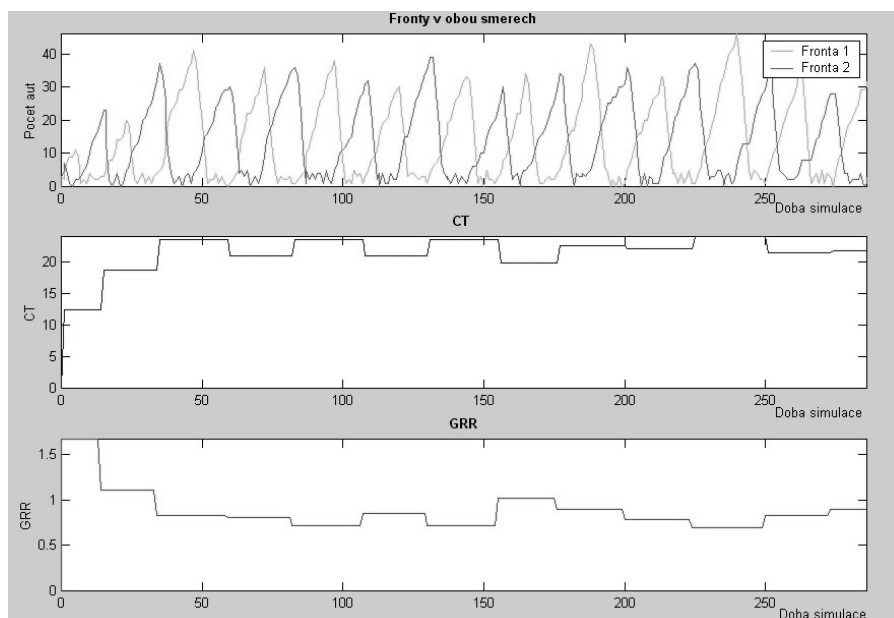
V modelu byla též vypracována hloubková analýza fronty. Subsystem Analýza Fronty, který je součástí bloku Řízení, paralelně vyhodnocuje 12 základních ukazatelů výkonnosti (podle [4] – dobu trvání fronty, délku fronty, počet vozidel ve frontě, celkové zdržení, atd. – kompletní přehled v příloze III). Předpoklady výpočtu i vlastní vyhodnocení fronty je patrné ze zdrojového textu aktivní rutiny, která je externě volána jako S-funkce programu MATLAB[®]. Rutina je strukturována následovně : úvodní komentáře a přijatá zjednodušení, dále nutné inicializace a deklarace (vč. ošetření příznaků) a konečně vlastní aritmetické vyhodnocení ukazatelů.

7.ZÁVĚR

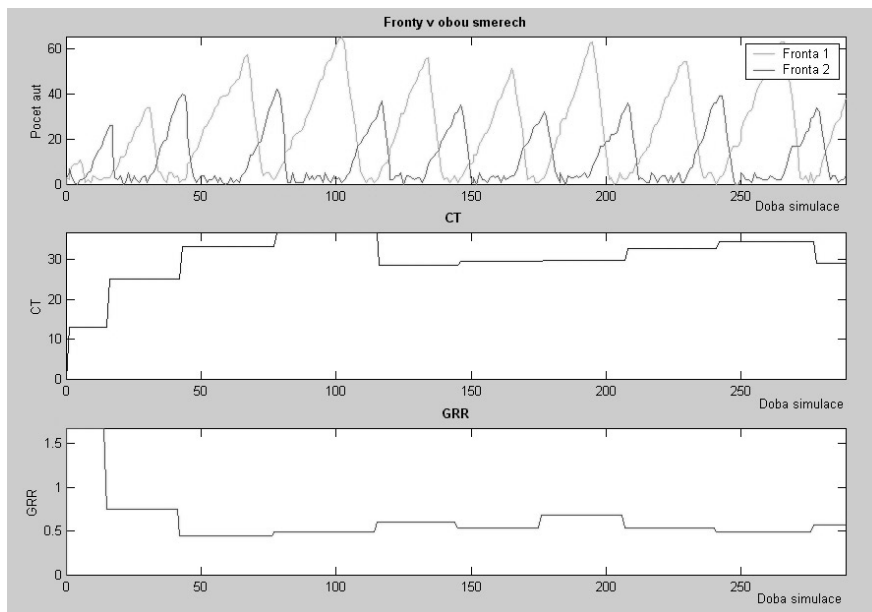
Záznamy osciloskopů, zachycujících časové průběhy délek front v kolmých ramenech, Doby Trvání Cyklu a Poměru Zelená/Červená jsou patrné z Obr. 12-14. Na Obr.12 je zachycena situace v případě rovnoměrného zatížení křižovatky; na Obr. 13 byla simulována asymetrická zátěž, kdy v jednom ze směrů je frekvence příjezdu vozidel vyšší než ve směru opačném. Konečně na Obr. 14. byla simulována markantní jednorázová zátěž v jednom z ramen křižovatky.

Výkonnost fuzzy řadiče byla nakonec porovnána s konvenčním kontrolérem (s fixními intervaly) a lidským expertem. Kriteria použitá pro komparaci vycházela z analýzy fronty a zahrnovala průjezdnost křižovatky a průměrnou čekací dobu. Z kritérií byl sestaven celkový index výkonnosti a ten potom vyneseno do grafu.

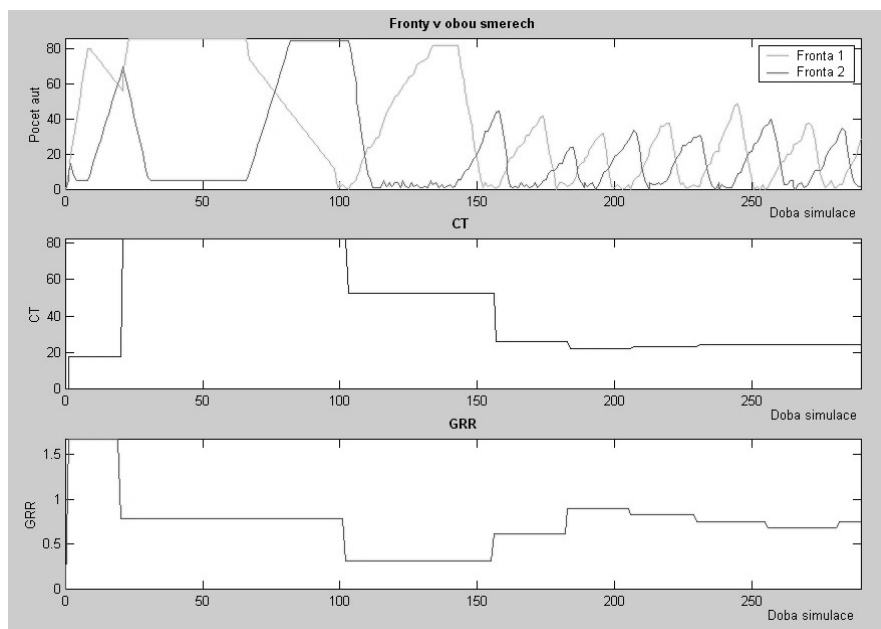
Závěrem je možno říci, že při stále neutuchající lidské touze po objevování nových možností zlepšování kvality způsobu života nezbyvá, než vytvářet stále nové a důmyslnější přístroje a zařízení. Fuzzy logika v širší perspektivě poskytuje jednoduchý a velmi efektivní způsob, jak těmto nárokům - alespoň v rámci strategie dopravního managementu - vyhovět. Ve spojení s dalšími komponentami AI, konkrétně neuronovými sítěmi a multiagentními systémy, může pak vytvořit skutečně mocný integrovaný systém pro maximálně sofistikované řízení dopravy na pozemních komunikacích.



Obr. 12– rovnoměrná zátěž



Obr. 13– asymetrická zátěž



Obr. 14 –jednorázová zátěž

Seznam použité literatury:

- [1] – Fuzzy řízení, skripta ČVUT
- [2] – Fuzzy toolbox help, MATLAB
- [3] – Fuzzy Traffic Light Controller, Josef Schwarz, MOSIS'98
- [4] – Queueing analysis :
http://www.eos.ncsu.edu/courses/ce/ce400_info/www2/flow3.html
- [5] – Case Study: Fuzzy Traffic light Controller :
http://www.doc.ic.ac.uk/~nd/surprise_96/journal/vol4/sbaa/report.traff.html

e-mail: hotmarp@vscht.cz