



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Veronika Vránová

**NALEZENÍ A ZHODNOCENÍ ALGORITMŮ ŘÍZENÍ
DOPRAVNÍHO UZLU**

Bakalářská práce

2015



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta dopravní
d ě k a n**
Konviktská 20, 110 00 Praha 1

K620..... Ústav dopravní telematiky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Veronika Vránová

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – DOS – Dopravní systémy a technika

Název tématu (česky): **Nalezení a zhodnocení algoritmů řízení dopravního uzlu**

Název tématu (anglicky): Finding and Evaluating of Traffic Control Algorithms on the Traffic Node

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- rešerše a analýza použití algoritmů řízení dopravního uzlu v ČR a v zahraničí
- zkušenosti s aplikacemi algoritmů řízení dopravního uzlu v ČR a v zahraničí
- zhodnocení a doporučení pro realizaci a programování v ČR
- návrh a výběr vhodných algoritmů pro další sledování v rámci výzkumu

Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího práce

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: Jirava P., Slabý P.: Pozemní komunikace 10 -Dopravní inženýrství, skripta ČVUT, 1997.

Příbyl P., Svítek M.: Inteligentní dopravní systémy, BEN, Praha 2001, ISBN 80-7300-029-6.

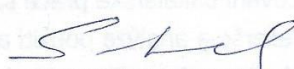
Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Tomáš Tichý, Ph.D.**

Datum zadání bakalářské práce: **25. října 2013**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **30. listopadu 2015**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia


.....
doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.
vedoucí
Ústavu dopravní telematiky




.....
prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.



.....
Veronika Vránová
jméno a podpis studenta

V Praze dne25. srpna 2015

Poděkování

Ráda bych poděkovala za odbornou pomoc a vedení mé práce panu doc. Ing. Tomáši Tichému, Ph.D. Dále bych chtěla poděkovat rodině a kamarádům.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 29. listopadu 2015

.....

podpis

NALEZENÍ A ZHODNOCENÍ ALGORITMŮ ŘÍZENÍ DOPRAVNÍHO UZLU

bakalářská práce
listopad 2015
Veronika Vránová

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá nalezením, popisem a zhodnocením algoritmů vhodných pro řízení dopravy na křižovatce. Nalezneme zde informace o statické řízení, možnostech dynamického řízení a algoritmech inteligentního řízení, mezi které je zařazeno fuzzy řízení, neuronové sítě, agentní a multiagentní systémy, genetický algoritmus a Petriho sítě. Dále je zde navržen vlastní algoritmus pro řízení uzlu.

ABSTRACT

The topic of this bachelor thesis is finding, describing and review of algorithms suitable for conducting traffic on intersections. It provides information on static control, possibilities of dynamic control and algorithms of intelligent control, including fuzzy control, neural networks, agent and multi-agent systems, genetic algorithm and Petri networks. Further included is an own designed algorithm for managing a node.

KLÍČOVÁ SLOVA

Řízení dopravy, statické řízení, dynamické řízení, fuzzy řízení, neuronové sítě, agentní systémy, multiagentní systémy, genetický algoritmus, Petriho sítě

KEY WORDS

Traffic control, pretimed control, actuated control, fuzzy control, neural networks, agent systém, multi-agent systém, genetic algorithm, Petri nets

Obsah

Obsah	5
Seznam použitých zkratk.....	7
1. Úvod	8
1.1. Historie světelného signalizačního zařízení.....	8
2. Způsoby řízení křižovatky	10
2.1. Česká republika	10
2.2. Zahraničí	10
2.3. Porovnání	12
3. Křižovatka řízená pomocí SSZ.....	13
3.1. Základní popis SSZ	13
3.2. Kritéria návrhu instalace SSZ	13
3.2.1. Česká republika	13
3.2.2. Zahraničí	15
3.2.3. Porovnání	16
3.3. Stavební uspořádání.....	16
3.4. Technické vybavení SSZ.....	17
3.4.1. Dopravní detektory	17
3.4.2. Řadiče	17
3.4.3. Ústředny	18
3.4.4. Komunikační propojení	19
3.4.5. Technologie používané v zahraničí	19
4. Použité algoritmy z literatury	22
4.2. Statické řízení, off-line.....	22
4.3. Dynamické řízení	23
4.3.1. Volná tvorba signálního plánu.....	27
4.3.2. Celočervená.....	28
4.3.3. Trvalá zelená v hlavním směru	29
4.4. Vyšší algoritmy řízení.....	29
4.4.1. Fuzzy řízení	29
4.4.2. Neuronové sítě	33
4.4.3. Agentní a multiagentní systémy.....	37
4.4.4. Genetický algoritmus	39
4.4.5. Petriho sítě	42

5. Porovnání nalezených metod.....	45
5.1. Zhodnocení metod	45
5.2. Doporučení pro další sledování.....	47
6. Návrh vlastního algoritmu pro řízení	48
6.1. Popis z hlediska funkčnosti.....	48
6.2. Schéma křižovatky a fází	48
6.3. Popis řízení	50
6.4. Posouzení metody	60
7. Závěr.....	62
8. Zdroje	64
Seznam obrázků	69
Seznam tabulek	69
Seznam příloh.....	69

Seznam použitých zkratk

ATC	Advanced Transportation Controller
ČSN	Česká státní norma
GSM	globální systém pro mobilní komunikaci
ITS	Inteligentní dopravní systémy
MHD	městská hromadná doprava
MUTCD	Manual on Uniform Traffic Control Devices
OCIT	Open Communication Interface for Road Traffic Control System
ODG	OCIT Developer Group
SSZ	Světelné signalizační zařízení

1. Úvod

Tato práce se zabývá nalezením a zhodnocením algoritmů používaných k řízení dopravy pomocí světelných signalizačních zařízení.

Řízení dopravy je velice důležitým tématem, což do značné míry souvisí s růstem stupně motorizace na straně jedné a omezenou kapacitou komunikací a uzlů na straně druhé. Kapacitu křižovatky je možné použitím správného řídicího algoritmu zvýšit a tím snížit pravděpodobnost kongescí, snížit negativní dopady na životní prostředí omezením zastavování a rozjíždění vozidel a celkově zefektivnit dopravu.

V první části práce jsou uvedeny a vysvětleny základní pojmy řízení dopravy a popsána historie světelného signalizačního zařízení.

Dále se práce zabývá podmínkami zavedení světelného signalizačního zařízení u nás i v zahraničí a popisuje i ostatní způsoby řízení dopravy na křižovatkách. Zmíněny jsou zde i řadiče a ústředny potřebné pro řízení dopravy.

Hlavní část práce se zabývá algoritmy řízení. Nejprve se práce věnuje statickému a dynamickému řízení dopravního uzlu, kde jsou rozebrány výhody a nevýhody těchto typů řízení. Dále jsou uvedeny možnosti inteligentního řízení a jejich aplikací. Jedná se o fuzzy řízení, řízení pomocí neuronových sítí, agentních a multiagentních systémů, genetických algoritmů a řízení pomocí Petriho sítí. U všech těchto algoritmů je popsán vznik a vývoj, princip a aplikace na řízení dopravy.

Cílem práce je nalezení a zhodnocení algoritmů k řízení SSZ, na závěr je takovýto algoritmus navržen.

1.1. Historie světelného signalizačního zařízení

Vznik světelného signalizačního zařízení byl důsledkem rozvoje automobilové dopravy. První signalizační zařízení bylo instalováno v Londýně ve Westminsteru v roce 1868 a bylo inspirováno železničními návěstidly. Jeho funkcí však ještě nebylo řízení dopravy na křižovatce, ale umožnění chodcům bezpečně přejít přes frekventovanou ulici. V roce 1918 bylo v New Yorku zavedeno první ručně ovládané signalizační zařízení k řízení dopravy na křižovatce. V Evropě první světelně řízená křižovatka byla zprovozněna v Berlíně o šest let později. Od roku 1930 se začalo v USA používat dopravně závislé řízení. [1]

U nás bylo první SSZ realizováno v Praze roku 1927. Jednalo se o ručně přepínané zařízení a nacházelo se na křižovatce ulic Hyberská, Dlážděná a Havlíčkova. První

automatická světelná signalizace v České republice byla instalována o tři roky později také v Praze, přesněji na Václavském náměstí. [2]

2. Způsoby řízení křižovatky

Křižovatka je místo, kde se protínají nebo spojují alespoň dvě podzemní komunikace. Tato práce se věnuje hlavně křižovatkám řízených pomocí SSZ, nicméně existují i další možnosti. Je nutno přihlídnout k řadě aspektů, jako jsou potřeby účastníků provozu nebo aktuální uspořádání a prostorové možnosti křižovatky, a vybrat nejvhodnější způsob řízení.

2.1. Česká republika

Doprava na řízené křižovatce může být v souladu se zákonem 361/2000 Sb. o provozu na pozemních komunikacích v platném znění řízena světelnými, popřípadě i doprovodnými akustickými signály, podle pokynů příslušníka policie nebo Vojenské policie ve stejnokroji nebo usměrňována strážníkem obecní policie. [3]

Pokud křižovatka není řízena pomocí žádné z výše uvedených metod, platí zde obecná pravidla silničního provozu. Tato pravidla je nutno dodržovat i v případě, že místo je vybaveno SSZ, ale zařízení je nefunkční.

Prvním tímto pravidlem je přednost vozidlu na hlavní komunikaci. Řidič, který přijíždí po vedlejší komunikaci, která je označena dopravní značkou P4 (Dej přednost v jízdě) nebo P6 (Stůj, dej přednost v jízdě), musí dát přednost vozidlu na hlavní komunikaci.

Druhým základním pravidlem je přednost zprava, což znamená, že pokud přednost v jízdě neplyne z dopravního značení, musí řidič dát přednost vozidlu přijíždějícímu zprava. [4]

2.2. Zahraničí

USA

V USA je na rozdíl od nás dovoleno na světelně řízených křižovatkách odbočovat vpravo i na červenou, ale pouze za předpokladu, že se u semaforu nenachází značka NO TURN ON RED. [5]

Nejvíce křižovatek v USA je ovšem neřízených. Zde platí pravidlo, že křižovatkou projede první ten, kdo k ní dorazil nejdříve. Pokud na místo dorazí více řidičů současně, platí zde přednost zprava, stejně jako u nás. Přednost je nutné dát také protijedoucím vozidlům při odbočování vlevo a to i přesto, že vstoupila do křižovatky až později. [6]

Posledním důležitým rozdílem je samotné umístění SSZ. V USA se totiž umísťují až za křižovátku. [7]

SPOJENÉ KRÁLOVSTVÍ VELKÉ BRITÁNIE A SEVERNÍHO IRSKA

Ve Spojeném království neexistují křižovatky bez dané přednosti. To znamená, že zde neexistuje přednost zprava, respektive zleva. Všechny křižovatky mají danou přednost. Že je nutno dát přednost zjistíme ze svislého dopravního značení nebo vodorovného dopravního značení. Tím může být jak trojúhelník na vozovce, tak dvojitá přerušovaná čára na vozovce.[8]

Většina světelně řízených křižovatek je ve Spojeném království řízena dynamicky a bývají použity tři detektory, aby bylo možno pracovat s větším rozpětím rychlostí. Stejně jako u nás se nejvíce používají podzemní indukční smyčky. [9]

ŠVÉDSKO

Ve Švédsku je kladen důraz hlavně na bezpečnost, a to i na úkor kapacity křižovatky. Navrhují se zde krátké doby cyklu, maximálně 100 s, aby bylo dosaženo co největší bezpečnosti chodců. Při krátkých cyklech se snižuje pravděpodobnost, že budou chodci přecházet na červenou. [9]

NIZOZEMSKO

Nizozemsko, stejně jako většina jmenovaných zemí, dbá hlavně na bezpečnost a tu upřednostňuje před kapacitou uzlu. Stopčáry jsou zde umístěny dál od středu křižovatky, aby byla zachována přehlednost, a návěstidla se umísťují nad jízdní pruhy. [9]

V některých evropských zemích se můžeme setkat se sdíleným dopravním prostorem. Tento koncept spočívá v odstranění vodorovného a svislého dopravního značení a v zrovnoprávnění všech účastníků provozu. Nejvíce takovýchto území najdeme v Nizozemsku, ale sdílené dopravní prostory se objevují také v Dánsku, Švédsku, Španělsku, Anglii nebo Německu. [10]

NĚMĚCKO

V Německu se u křižovatek řízených SSZ může použít délka cyklu až 120 s, nicméně v praxi se používají spíše cykly kratší. Jako priorita je zde brána bezpečnost chodců a cyklistů. Přechod pro chodce je řízen pomocí SSZ, pokud vede přes více než dva jízdní pruhy. [9]

2.3. Porovnání

U křižovatek řízených SSZ dávají vyspělé země přednost zvyšování bezpečnosti před zvyšováním kapacity křižovatky. To se projevuje kratší délkou cyklu, která má pozitivní vliv na bezpečnost chodců, jako nejzranitelnějších účastníků provozu na křižovatce. Stejně tak v České republice nesmí délka cyklu přesáhnout 120 s, ale reálně se používají cykly kratší.

Vzhledem k chování řidičů v České republice se sdílený dopravní prostor nejeví jako reálné řešení, nicméně by se tento koncept mohl uplatnit v USA, kde jsou spolu řidiči zvyklí komunikovat díky neřízeným křižovatkám bez dané přednosti.

Světelné řízení přechodu pro chodce, který vede přes více jízdních pruhů, nepovažuji v našich podmínkách za nutnost. Vždy je nutné brát v potaz intenzitu dopravy. U řízených přechodů pro chodce, kde je ovšem intenzita nízká, se velmi často setkáváme s přecházením na červenou. Je ovšem nutné u delších přechodů dbát na zřízení ochranných ostrůvků.

3. Křižovatka řízená pomocí SSZ

Ačkoliv instalace SSZ má nesporné výhody, jako je zvýšení kapacity křižovatky nebo zvýšení bezpečnosti, není potřebné a ani vhodné jej instalovat na každou křižovatku. Je potřeba zvážit finanční náklady, možnost řešení problému fyzickým uspořádáním křižovatky nebo například změnou na křižovatku okružní.

3.1. Základní popis SSZ

SSZ je zařízení, které se využívá k řízení provozu na pozemních komunikacích. Hlavními prvky SSZ jsou řadiče, návěstidla a dopravní detektory. Dalšími podstatnými součástmi jsou tlačítka, která se využívají hlavně pro detekci chodců, cyklistů nebo tramvají. Nesmíme zapomenout ani na akustickou signalizaci, která složí k orientaci nevidomým, a na nosné konstrukce a kabelový rozvod. [11]

Návěstidlo slouží k vizuální reprezentaci světelných signálů, pomocí kterých se řídí provoz. Skládá se z minimálně jedné optické jednotky umístěné ve skříní, upevňovacího zařízení a slunečních clon. Při řízení uzlu se obvykle využívá návěstidlo složené ze 3 optických jednotek. [12]

Dalšími podstatnými prvky jsou kromě řadiče a dopravní detektory, kterým se budu blíže věnovat později.

3.2. Kritéria návrhu instalace SSZ

Aby nedocházelo k instalování SSZ na křižovatce, kde to není potřeba a není to efektivní, existují určitá kritéria, která je nutné splnit, aby se mohlo vůbec o návrhu SSZ uvažovat.

3.2.1. Česká republika

V ČR je nutné prokázat účelnost řízení dopravy na křižovatce světelnou signalizací splněním alespoň jednoho z kritérií pro navrhování SSZ. Mezi tato kritéria patří bezpečnost provozu, intenzita provozu z hlediska vozidel, intenzita provozu z hlediska chodců a plynulost jízdy vozidel městské hromadné dopravy. Na druhou stranu je potřeba posoudit, zda SSZ nezvýší nehodovost na křižovatce nebo jinde na související pozemní komunikaci. [13]

Kritérium bezpečnosti provozu

Dle tohoto kritéria je SSZ účelné navrhnout na křižovatkách, kde byla průměrná relativní nehodovost v uplynulých třech letech minimálně 4 nehody na 1 milion vozidel vjíždějících do křižovatky. Zároveň je třeba analýzou nehodovosti dokázat, že nehody nelze omezit jiným způsobem. Dále se SSZ zřizuje na místech hodných zvláštního zřetele, například přechody u škol. Tyto lokality se posuzují individuálně podle místních poměrů a je nutné zohlednit podmínky podle ČSN 73 6101 a ČSN 73 6110. [14]

Kritérium intenzity provozu z hlediska vozidel

Použití SSZ je považováno za účelné, pokud je intenzita silničního provozu v průměru osm dopravně nejvíce zatížených hodin dne na hlavní i vedlejší komunikaci vyšší, než je stanovena pro neřízenou křižovatku dle ČSN 73 6102. [14]

Kritérium intenzity provozu z hlediska chodců

Podle tohoto kritéria je použití SSZ považováno za účelné, dosahují-li intenzity na přechodu pro chodce v průměru osm dopravně nejzatíženějších hodin dne vyšší hodnoty než mezní, při kterých mohou chodci komunikaci bezpečně přejít. U přechodu přes jednopruhový nebo dvoupruhový pás se jedná o hodnotu 1100 voz/h a u třípruhového pásu o 1000 voz/h. Přechod přes vícepruhový směrově nerozdělený jízdní pás se dle ČSN 73 6110 nesmí navrhovat. V koordinovaných skupinách SSZ je účelné zřídit řízený přechod i při nižších intenzitách. [14]

Kritérium plynulosti jízdy vozidel městské hromadné dopravy

Důvodem pro vybudování SSZ lze považovat zdržení nejméně každého druhého vozu MHD na dobu delší, než dvě minuty ve třech nejzatíženějších hodinách dne. [14]

3.2.2. Zahraničí

USA

Ve Spojených státech jsou tato kritéria zaznamenána v MUTCD (Manual of Uniform Traffic Control Devices). Jedná se o kritéria, která mají zabezpečit, aby byla instalována SSZ pouze na místech, kde jsou potřebná, ale splnění jednoho nebo dokonce více kritérií ještě nezaručuje, že neexistuje i lepší řešení. Stejně jako u nás se zde bere v potaz intenzita provozu z hlediska vozidel, nehodovost, intenzita z hlediska chodců, ale i bezpečnost na přechodech u škol, blízkost železničního přejezdu nebo koordinaci SSZ. [15]

NĚMĚCKO

V Německu se SSZ zavádějí tam, kde kvůli chybějícímu rozhledu dochází k častým nehodám a zavedením SSZ je možné jim zamezit. Podmínkou je, že na komunikaci nesmí maximální rychlost vozidel přesahovat 70 km/h. SSZ se zavádějí, i pokud je vysoká intenzita dopravy pouze v určitou denní dobu, a většinou se nechávají zapnuté po celý den i noc, pouze s jiným nastaveným programem. [16]

ŠVÉDSKO

Ve Švédsku je posuzován zvlášť případ od případu. Instalace SSZ je možná až po inženýrském posouzení, které obsahuje 3-5 letou analýzu daného území a problému. [9]

SPOJENÉ KRÁLOVSTVÍ VELKÉ BRITÁNIE A SEVERNÍHO IRSKA

Ve Velké Británii je možné instalovat SSZ, pokud jsou splněna obvykle dvě z daných kritérií. První kritérium pojednává o intenzitě vozidel, další se týká nutnosti přerušit proud vozidel na hlavní, zatížené komunikaci a umožnění jízdě vozidlům z vedlejší bez velkého zpoždění, dále se zohledňuje intenzita chodců, zda se nachází přechod u školy, koordinace SSZ nebo zda pomůže instalace SSZ ke snížení nehodovosti. [17]

SLOVENSKO

Na Slovensku je pro umístění SSZ nutné splnit alespoň jedno z následujících kritérií: kritérium bezpečnosti dopravy, kritérium intenzity z hlediska vozidel a kritérium intenzity z hlediska chodců. Kromě těchto kritérií se považuje za účelné zřizovat SSZ na místech

zvláštního zřetele, jako např. přechody pro chodce v blízkosti škol, výjezdy vozidel tramvají z míst ležících mimo komunikace. [18]

POLSKO

V Polsku jsou při umístění SSZ posuzována kritéria intenzity dopravy (z hlediska vozidel i chodců), dosažení snížení dopravní nehodovosti, potřeba koordinace uzlu s okolními uzly v řízené oblasti, přehlednost samotného uzlu i možnost usměrňovat a preferovat dopravu. [19]

3.2.3. Porovnání

Daná pravidla mají usnadnit rozhodnutí, zda je nebo není nutné instalovat SSZ. Vyspělé státy kladou důraz na bezpečnost s cílem zamezit kolizím se smrtelnými následky. Nicméně si myslím, že nejdůležitější je posouzení konkrétního uzlu a dopravní situace.

Ve všech zmíněných zemích, kde jsou dána určitá kritéria, se vždy bere v úvahu intenzita vozidel a chodců a nehodovost. V podmínkách bývají zahrnuty i přechody u škol, buď samostatně, nebo jako místa zvláštního zřetele.

Pokud se zamyslíme nad kritérii v Polsku, zjistíme, že jsou tak obecná a je jich tolik, že minimálně jedno by splňovala téměř každá křižovatka.

Dle mého názoru by splnění jedné z podmínek instalace mělo sloužit spíše jako impulz k dalšímu sledování a posuzování daného uzlu. Po důkladné analýze by bylo rozhodnuto, zda je nebo není vhodné instalovat SSZ.

Nesmíme ovšem zapomenout, že instalace SSZ je pouze jedním z možných řešení, alternativou může být například přestavba na okružní křižovatku.

3.3. Stavební uspořádání

Zavedení SSZ by se mělo projevit i ve stavebním uspořádání křižovatky. Stopčára by měla být umístěna co nejbliže ke středu křižovatky, aby mezičasy byly co nejkratší a tím se zvýšila kapacita křižovatky. Uspořádání řízené křižovatky je tedy stísněnější než neřízené, protože tam je potřeba kolizní doby co nejvíce oddálit. [4]

Dále je nutné u všech křižovatek, nejen těch světelně řízených, posoudit, zda danou křižovatkou projede i rozměrné vozidlo, což prověříme pomocí vlečných křivek.

Při navrhování křižovatky nesmíme zapomenout ani na délku přechodů. Platí, že pokud je přechod delší než 7 m, zřizujeme ochranné ostrůvky pro chodce.

3.4. Technické vybavení SSZ

3.4.1. Dopravní detektory

Dopravní detektory snímají pomocí senzorů vstupní data, která jsou potřebná k řízení. Fungují na mnoha principech, ale dále jsou popsány pouze ty nejpoužívanější.

Pro řízení uzlu se v České republice nevíce využívají indukční detektory. Tyto detektory se skládají z indukční smyčky, vlastního detektoru a analytické jednotky. Smyčky se instalují 3- 6 cm pod povrch vozovky a využívají narušení vlastního magnetického pole k rozpoznání vozidla nebo jiného kovového předmětu. [20]

Dalším často používaným typem jsou aktivní a pasivní infračervené detektory. Zatímco pasivní infračervené detektory nevysílají žádný signál a pracují na principu zaznamenávání změny energie při průjezdu vozidla, aktivní infračervené detektory vysílají vlny v infračerveném pásmu a po odrazu od vozidel jsou přijímány optickými senzory. [20]

Posledním zde zmíněným dopravním detektorem je videodetektor, který funguje na principu analýzy obrazu. Vytvoří detekční zónu, tzv. virtuální smyčku, a v ní je schopen detekovat vozidlo. Velkou výhodou je, že není potřeba žádný zásah do vozovky a systém dokáže detekovat neočekávané překážky na komunikaci. [21]

3.4.2. Řadiče

Jak bylo zmíněno dříve, nedílnou součástí SSZ je dopravní řadič. V řadiči jsou nahrány řídicí programy a je schopen zpracovávat data z detektorů a komunikovat s dopravní ústřednou, pokud na ni je napojen. V opačném případě z něj lze získat alespoň historická data, která v něm jsou uložena.

Prvními používanými řadiči u nás byly řadiče elektromechanické, které fungovaly na principu otočných válců, na kterých je nahrán řídicí program. Později byly tyto mechanické

součástky nahrazeny a vznikly řadiče elektronické. S rozvojem mikroprocesorů a programovatelných mikropočítačů vznikly v 80. letech moderní mikroprocesorové řadiče. [22]

Dopravní řadič se skládá ze skříňe, podstavce a elektrické výbavy. Skříň musí být odolná proti povětrnostním vlivům, nesmí do ní vnikat vlhkost a musí být upevněna na nehořlavém podkladu. Konstrukce podkladu má umožňovat vstup bez demontáže řadiče a musí být provedena tak, aby jí bylo možné vést kabely, které musí být chráněné proti poškození. [23]

Řadiče musí být vybaveny místním ovládáním pro zapnutí a vypnutí signalizace a signálu přerušované žluté světlo a zapnutí a vypnutí řadiče na vlastní program. Při poruše SSZ musí řadič automaticky zapnout přerušované žluté světlo, aby nebyla ohrožena bezpečnost dopravy. Pokud z libovolného důvodu nelze tento signál signalizovat, je nutné všechna návěstidla SSZ vypnout. [23]

Ačkoliv je možno pomocí dopravních detektorů modifikovat délku signálu Volno (princip bude vysvětlen v další kapitole), vždy je nutné dodržet minimální doby tohoto signálu. Pro Českou republiku jsou tyto doby uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1- Minimální doby signálu volno

Dopravní proud	Čas [s]
Vozidla	5
Chodci	5
Cyklisti	5
Tramvajová vozidla	5
Pozor (žluté světlo)	3
Pozor (červené a žluté světlo)	2
	Stálá hodnota

[23]

3.4.3. Ústředny

Dopravní ústředny dohlížejí na SSZ a koordinují dopravu. Městská ústředna monitoruje a řídí dopravu v reálném čase a obsahuje i úroveň adaptivního řízení, díky které může automaticky měnit parametry signálních plánů a přepínat signální plány, které jsou nahrané v řadiči. Díky integraci monitorovacích a detekčních prvků dokáže dopravní ústředny

strategicky řídit městský provoz. Kromě toho mohou prostřednictvím proměnných informačních tabulí řidičům poskytovat důležité informace o provozu na komunikacích. [24]

Z dopravní ústředny, která může kromě řízení systémů SSZ řídit i tunelové systémy, parkovací systémy nebo liniové systémy řízení dopravy, filtrovaná data dále putují do regionálního Dopravně informačního centra. Tato centra jsou dále propojena s Národním dopravním informačním centrem. [25]

3.4.4. Komunikační propojení

Dopravní řadiče jsou spojeny s ústřednou buď vyhrazeným telekomunikačním spojem, nebo bezdrátovým spojením. Pokud řadič s ústřednou nekomunikuje, lze z něj alespoň na místě získat historická data. [25]

Komunikační propojení jednotlivých prvků SSZ lze uskutečnit několika způsoby. Jednou z možností je vybudování pevné lokální sítě, kde jsou použity metalické nebo optické kabely s využitím odpovídající technologie (např. ETHERNET). Další využívanou možností je použití bezdrátového spojení, kde lze využít analogového nebo digitálního radiového spojení, včetně vybudovaných mobilních telekomunikačních sítí (např. GSM, LTE).

Při volbě komunikačního propojení jednotlivých prvků uzlu, ale i jeho napojení do větší oblasti, je zapotřebí zohlednit několik základních faktorů. Těmi jsou především spolehlivost a bezpečnost přenášených informací, ale i jejich dostupnost. Svoji roli při volbě komunikačního propojení hraje dále i množství přenášených informací, požadovaná rychlost přenosu dat, pořizovací i provozní náklady.

3.4.5. Technologie používané v zahraničí

Zásadní rozdíl v používání technologií v Spojených státech a Evropě je existence otevřených specifikací a norem pro systémy řízení dopravy. Ve Spojených státech, kde se tato otevřená architektura dlouhodobě prosazuje, je potom možné využívat libovolného dodavatele technologií a je současně zajištěna komunikace propojených prvků systému, jako např. řadič – ústředna. Všechny řadiče jsou zde certifikovány dle NEMA TS1 a TS2. Nicméně nevyhovují evropským standardům, takže u nás se nemohou použít. [1]

NEMA TS1 se používá již od roku 1983. Požadavky na bezpečnost nebo komunikaci pomocí SDLC (počítačový komunikační protokol) daly za vznik roku 1992 novějšímu standardu TS 2. [26]

S rozvojem ITS vznikl v USA standard ATC (Advanced Transportation Controller). V koncepci ATC jsou definovány požadavky na dopravní řadiče a to jak z hlediska požadavku na hardware, tak i na software, čímž je zajištěna konkurence pro libovolné výrobce. Investoři potom tyto jednotné normy využívají při zadávání zakázek v tomto segmentu. Stejně tak tyto normy využívají společnosti při vývoji nových produktů. [27]

V Evropě se tato otevřená architektura dlouhé roky neuplatňovala. V roce 1999 byla založena pracovní skupina ODG (OCIT Developer Group), která sdružuje některé přední evropské producenty řídicích dopravních systémů. ODG připravila pro komunikaci řadiče s dopravní ústřednou standardizovaný komunikační protokol OCIT (Open Communication Interface for Road Traffic Control System).

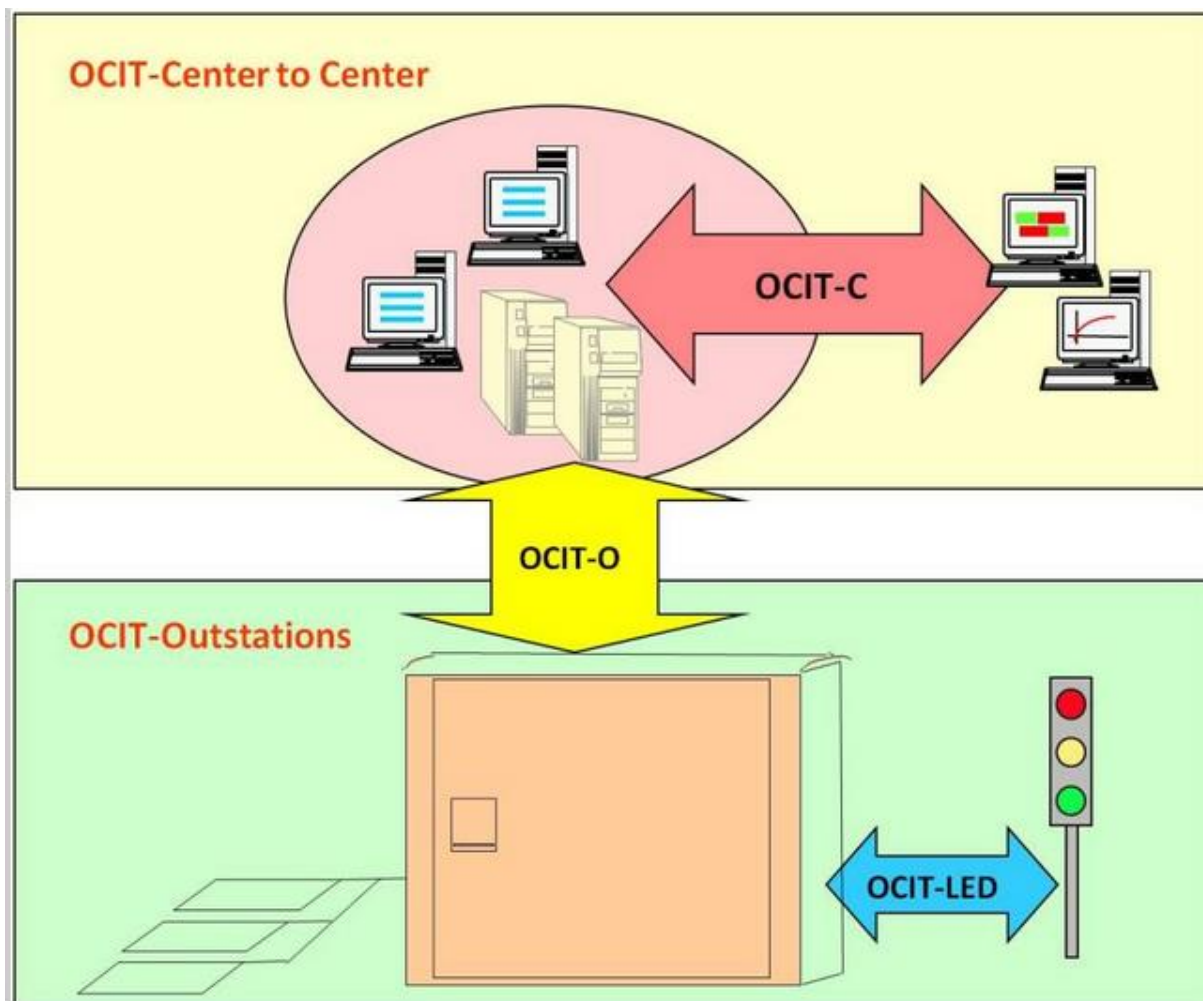
Tato architektura se používá při výstavbě velkých dopravních sítí a je znázorněna na obrázku [1]. [22]

Architektura se skládá ze 3 typů rozhraní a je znázorněna na obrázku.

OCIT- C (centers to centers)- standardizovaná rozhraní mezi centrálními komponentami

OCIT- O (outstations)- rozhraní mezi centrální a řadiči

OCIT- LED- rozhraní pro spojení mezi řadiči a návěstidly [28]



Obrázek 1- Architektura OCIT [28]

Domnívám se, že v tomto případě je vhodné inspirovat se Spojenými státy a podporovat otevřené komunikační rozhraní v Evropě. Tím by mohly být i u nás napojeny libovolné řadiče na ústředny, nezávisle na výrobci. Již nyní je tato technologie podporována a využívána řadou firem, mezi nimi se nachází firma SWARCO a Siemens, které nabízejí řadiče i u nás.

4. Použité algoritmy z literatury

Asi nejpodstatnějším a také nejsložitějším úkolem při návrhu SSZ je výběr správného algoritmu pro řízení. Nejenže je třeba posoudit, zda je vhodnější statické, nebo dynamické řízení, ale u dynamického řízení je potřeba také zvolit určitý druh tohoto řízení.

Proto je účinnost algoritmu dána kromě vhodnosti použití pro daný uzel, také zkušenostmi a dovednostmi odborníka, který jej navrhuje.

4.1. Způsoby řízení uzlu

Na následujícím obrázku [2] jsou uvedeny základní způsoby řízení. Kapitola 6.2 je věnována statickému řízení, mezi které patří řízení A1, A2 a B1. Ostatní způsoby řízení uvedené v tabulce se řadí mezi řízení dynamické a více se jim budu věnovat později.

ROZHODOVÁNÍ PŘI ŘÍZENÍ MIMO PRŮBĚH SIGNÁLNÍHO PLÁNU		
A v delších časových intervalech v krocích řádově desítek minut až hodin		
volba signálních plánů a režimů řízení	A1 ČASOVĚ ZÁVISLÁ podle předem zadaného časového nastavení programů	
	A2 DOPRAVNĚ ZÁVISLÁ podle aktuálních dopravních nároků v reálném čase	
ROZHODOVÁNÍ PŘI ŘÍZENÍ V PRŮBĚHU SIGNÁLNÍHO PLÁNU		
B v krátkých časových intervalech v krocích řádově několika sekund		
pevné řízení	pevný signální plán	B1 ŽÁDNÁ MOŽNOST ZMĚN podle aktuálních dopravních nároků
dopravně závislé (dynamické) řízení	modifikace signálního plánu	B2 PROMĚNNÁ DÉLKA VOLNA B3 ZMĚNA POŘADÍ FÁZÍ B4 VKLÁDÁNÍ FÁZE NA VÝZVU B5 OKAMŽITÉ DOPLNĚNÍ NEKOLIZNÍHO VOLNA DO PROBÍHAJÍCÍ FÁZE
	plánu	B6 VOLNÁ MĚNITELNOST PRVKŮ Podle aktuálních dopravních nároků

Obrázek 2- Základní způsoby řízení uzlu [14]

4.2. Statické řízení, off-line

U statického řízení jsou signální programy založeny na analýze historických dopravních dat, které jsou získány z dopravních průzkumů. Z těchto hodnot jsou vypočítány veličiny, které jsou zadány do řadiče a které jsou neměnné. [1]

Nezákladnějším a nejjednodušším řízením je statické řízení pevným signálním plánem. Uplatňuje se hlavně při vyšších intenzitách, protože vychází z analýzy intenzit v dopravní špičce. V návrhu je potřeba počítat s určitou rezervou, aby nedocházelo k přetížení křižovatky a kongescím.

Mezi statické řízení řadíme i časově závislé řízení, které pracuje off-line. V tomto případě je do řadiče implementováno několik programů pro různé intenzity provozu během dne. Obvykle se jedná o noční program, ranní špičku, polední sedlo a odpolední špičku. Nebývá výjimkou, že se u časově závislého řízení používají i programy, které zohledňují určitý den v týdnu (například vysoká intenzita v pátek odpoledne) a svátky. Je možnost implementovat také program pro pasivní preferenci MHD nebo složky záchranného systému. [1]

Na podobném principu funguje i dopravně závislé off-line řízení, které reaguje místo času na dopravní nároky. Na rozdíl od dynamického řízení probíhá rozhodování mimo průběh signálního plánu. Signální program tedy reaguje na dopravní nároky, ale v delším časovém intervalu, než u dynamického řízení.

Výhodou pevného řízení je jednoduchá možnost kontroly, nižší náklady (provozní i investiční) a snadnější přepracování signálního plánu. Nevýhodou naopak je nemožnost zkrácení délky signálu volno, která by mohla být použita pro jiný dopravní proud, program nemůže reagovat na dopravní kongesci ani kompenzovat chyby vzniklé při průzkumech. [4]

Pro návrh optimální délky cyklu a doby signálu Volno, který je klíčový k tvorbě signálního plánu se nejčastěji používá metoda saturovaného toku, které se také říká Websterova metoda. Vstupními podklady jsou hodinové intenzity dopravy na všech vjezdech do křižovatky (tzv. pentlogram), fázové schéma a tabulka mezičasů. [14]

Statické řízení patří mezi nejjednodušší způsob řízení z pohledu programování a návrhu, ale i údržby. Nicméně se tento druh řízení používá i na velmi zatížených a problematických uzlech. Statické řízení zde má velký přínos hlavně pro chodce, protože mohou být instalována odpočítávací zařízení, která chodce informují, za jak dlouho padne zelená.

4.3. Dynamické řízení

Dynamické řízení (on-line, dopravně závislé) je přizpůsobováno provozu. Monitoruje okamžitou dopravní situaci a reaguje na změny intenzity dopravy. Data zpracovává on-line a upravuje signální plán v reálném čase. Z hlediska teorie řízení se jedná o řízení v otevřené

smyčce. Není zde přímá zpětná vazba, takže chybí informace o výsledku akčních zásahů a tento druh řízení je úspěšný, pouze pokud model souhlasí se skutečností. [1]

Program tedy není připraven na nečekané změny, což je jeho hlavní nevýhoda. Výhodou oproti off-line řízení je, že se program může přizpůsobovat aktuální intenzitě dopravy, ale investor musí počítat s tím, že jeho provozně technické náklady jsou vyšší. [14]

Dopravně závislé řízení se používá, pokud se na křižovatce mění průběh dopravy, některé dopravní proudy se vyskytují zřídka, nebo může být hlavní dopravní proud přerušen jen na minimální dobu. [1]

U dynamického řízení musí být dopravní uzel vybaven detektory. Obvykle se jedná o prodlužovací detektor, výzvodový detektor a detektor strategický. [29]

Prodlužovací detektor se umísťuje 15-60 m od stopčáry a jeho funkcí je prodlužování signálu volno.

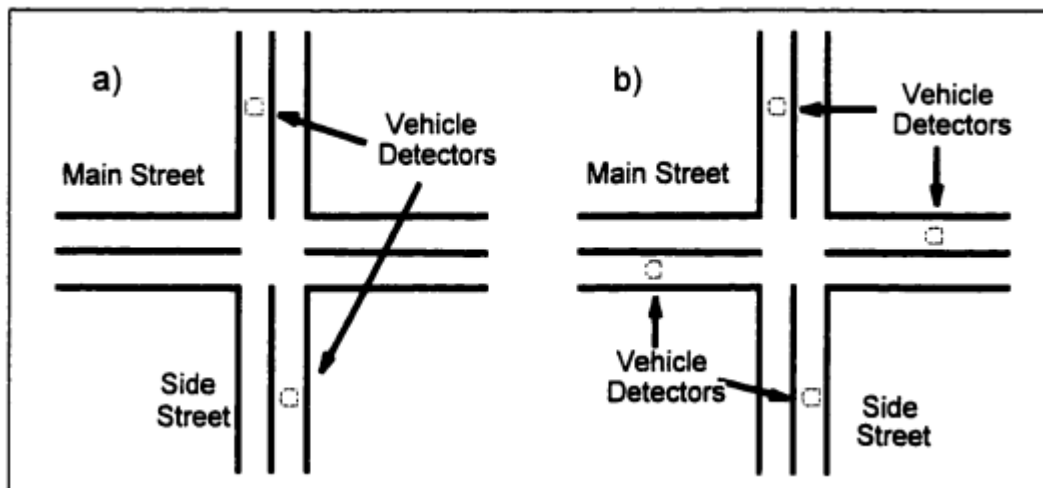
Výzvodový detektor se umísťuje těsně před stopčáru, maximálně do vzdálenosti 1 m, za účelem vyvolání požadavku na signální skupinu nebo fázi.

Strategický detektor se umísťuje 100-300 m od stopčáry a používá se ke klasifikaci dopravy pomocí obsazenosti. [1]

Semidynamické řízení

Mezi dynamické řízení se řadí i řízení semidynamické. U tohoto typu řízení je uzel vybaven detektory pouze na vedlejší komunikaci. Na hlavní komunikaci svítí signál volno až do doby, kdy je na vedlejší komunikaci detekováno vozidlo. Poté dostane signál volno vedlejší směr. Ten trvá po maximální možnou dobu, nebo pokud je již v tomto směru velká časová mezera mezi vozidly. Na tomto principu funguje trvalá zelená v hlavním směru, kterou zmiňuji níže. [30]

Umístění detektorů u plně a částečně dynamického řízení je znázorněno na následujícím obrázku. Na obrázku [3] a) je tedy vybavena detektory pouze vedlejší komunikace a jedná se o částečně dynamické řízení, v části b) jsou vybaveny detektory všechny ramena uzlu, jedná se tedy o plně dynamické řízení.



Obrázek 3- Umístění detektoru při částečně a plně dynamickém řízení [30]

Parametrem, který je vyhodnocován, je přítomnost vozidla v bodě měření. S těmito daty pracuje řadič a na základě definovaných algoritmů realizuje určitý druh řízení, jako je změna doby signálu Volno, modifikace fází nebo vložení fáze na výzvu. [29]

Změna doby signálu Volno

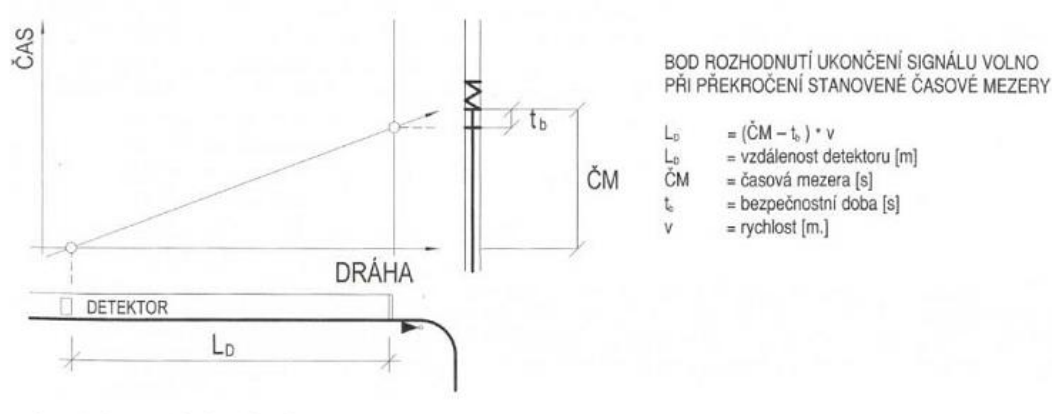
Nejčastějším způsobem dynamického řízení je změna doby signálu Volno. Existuje několik metod, pomocí kterých lze modifikovat délku signálu Volno, a tím zvýšit propustnost křižovatky. Vždy ovšem musí zůstat dodržena minimální doba tohoto signálu.

-měřením časové mezery

Nejpoužívanější metodou pro změnu doby signálu Volno je měření časové mezery. V této metodě se měří časová mezera odstupů vozidel. Pokud je časový odstup krátký (většinou se jedná o časový odstup do 5 s), prodlužuje se doba signálu Volno. Vždy je dána maximální doba zelené, které je možno díky prodlužovacímu detektoru dosáhnout, minimální doba tohoto signálu je 5 s.

Na obrázku [4] je znázorněna závislost dráhy, kterou vozidlo ujede od doby, kde je detekováno dopravním detektorem, a časové mezery. Pokud je tedy vozidlo detekováno a časová mezera mezi vozidly je menší nebo rovna, než předem stanovená hodnota a zároveň nebylo dosaženo maximální doby signálu Volno, je vozidlu umožněn bezpečný průjezd na zelenou. V opačném případě, tedy pokud je odstup mezi vozidly velký, nebo bylo dosaženo

maximální doby signálu Volno, je vozidlo zastaveno. Umístění dopravního detektoru tedy závisí na rychlosti, kterou se vozidla na dané komunikaci pohybují.



Obrázek 4- Velikost časové mezery a umístění detektoru [13]

-měření stupně zatížení

V této metodě zjišťujeme obsazenost detektoru, ze kterého zjistíme zatížení komunikace.

Obsazenost detektoru znamená, že sledujeme průjezd nebo zastavení vozidla v místě, kde se nachází dopravní detektor. Jedná se vlastně o poměr celkové doby obsazenosti detektoru k době vzorkování. Čím je toto číslo nižší, tím menší je intenzita dopravy.

-dle zjišťování kongescí

Pomocí indukčních smyček, popřípadě videodetekce, je identifikována kongesce. Prodlužováním signálu Volno vjezdu s kongescí, nebo zkracováním dob volna na předcházejících křižovatkách pro omezení příjezdu vozidel, je místo s kongescí uvolňováno. [4]

Smyčky na zjišťování kongescí se umísťují v místech, kde obvykle vozidlo nezastavuje, aby bylo jasné, že pokud je tento detektor obsazen, jedná se o kongesci. Následně se hodnoty porovnávají s určitými hraničními hodnotami, jako je délka kolony nebo doba obsazenosti detektoru a pokud jsou daná kritéria splněna, praktikuje se daný způsob řízení.

Jak bylo popsáno výše, změna doby signálu Volno může probíhat několika způsoby. Na problémových uzlech, kde se často tvoří kolony, se jako nejvhodnější jeví změna doby signálu Volno dle zjišťování kongescí. Na méně problémových uzlech postačí zbylé metody. Nicméně u metody, kdy měříme stupeň zatížení, musíme počítat s určitou časovou prodlevou u odezvy, kvůli nutnosti integrace signálu, který dostaneme z detektoru.

Modifikace fází

Tento způsob řízení ponechává původní počet fází a pozměňuje pouze jejich pořadí. Zároveň může být signál Volno modifikován provozními podmínkami, jako v případech předchozích. [4]

Tento způsob řízení se běžně používá například při preferenci MHD.

Vkládání fáze na výzvu

Tento způsob se používá u méně se vyskytujících dopravních proudů, jako jsou cyklisté, chodci nebo MHD. Fáze pro tento proud je vsunuta do sledu pravidelných fází. [4]

Vkládání fáze na výzvu pro chodce a cyklisty se provádí pomocí dnes již velmi rozšířených výzvnových tlačítek, která se obvykle nachází na sloupku světelné signalizace na začátku přechodu pro chodce.

Pokud je signální plán přizpůsobován vozidlům MHD, jedná se o tzv. aktivní preferenci, která má velmi pozitivní vliv na plynulost MHD. Pokud vozidlo MHD projíždí uzlem bez zastavení, nebo jen s minimálním zdržením, jedná se o absolutní preferenci. Pokud je ovšem uzel složitější a zatíženější, nebývá vhodné zcela upřednostňovat vozidla MHD. I v tomto případě ale projedou vozidla MHD křižovatkou s malým zdržením a mluvíme tedy o podmíněné preferenci. [31]

4.3.1. Volná tvorba signálního plánu

Pokud je uzel zatížen nerovnoměrně a nároky z různých směrů se často mění, lze použít volnou tvorbu signálního plánu.

Volná tvorba signálního plánu neumožňuje koordinaci v rámci oblasti, protože řada parametrů je přímo ovlivňována provozem. Proto je vhodné, aby křižovatka byla izolovaná.

Předem dány jsou pouze tyto parametry:

- maximální počet fází
- minimální doba signálů Volno
- maximální doba signálů Stůj
- mezičasy pro všechny sledy fází a kombinace signálních skupin
- nejpříznivější sled fází při požadavku na všechny fáze [4]

Doba signálu Volno, počet fází a jejich sled je ovlivňován provozem. Je tedy nutné sledovat detektory všechny dopravní proudy, což dělá tento typ řízení finančně i technologicky náročnější. Tento způsob řízení je vhodné využívat na izolovaném a nerovnoměrně zatíženém uzlu.

4.3.2. Celočervená

Další možností je řízení pomocí celočervené, používá se také název noční celočervená, protože toto řízení je vhodné použít pouze při velmi malých intenzitách provozu, které se vyskytují například právě v nočních hodinách.

Při řízení celočervenou je pro všechny dopravní proudy nastaven signál Stůj a o signál Volno je třeba se přihlásit.

K přihlašování se používá dopravní detektor, který bývá nainstalován 40- 70 m před křižovatkou, dle nejvyšší povolené rychlosti. Tento detektor vozidlo zaznamená a dokáže určit předpokládaný příjezd vozidla ke stopčáře. Pokud vozidlo nepřekračuje nejvyšší povolenou rychlost a není požadavek z jiného směru, může křižovatkou projet na signál Volno bez snížení rychlosti.

Tento typ řízení tedy napomáhá ke zklidňování dopravy, protože řidič vidí na křižovatce červenou a při překročení rychlosti je nucen na křižovatce vždy zastavit.

Nevýhodu tohoto řízení pocítují hlavně cyklisti a motocyklisti, kterým se může stát, že je indukční smyčka, která slouží jako detektor, nezaznamená.

Řízení může být realizováno dvěma způsoby:

- po fázích, což znamená, že při požadavku z jednoho směru se zařadí celá fáze

- po skupinách, kdy dostane volno pouze příslušná signální skupina, ostatní nekolizní směry se doplní pouze při požadavku z tohoto směru. [4]

4.3.3. Trvalá zelená v hlavním směru

Pokud jsou na křižovatce v hlavním směru velmi vysoké intenzity, je vhodné použít trvalou zelenou v hlavním směru.

Jak název napovídá, v zatíženém směru je trvale signál Volno. Ostatní účastníci dopravy dostanou signál Volnou pouze na výzvu.

Nevýhodou je, že vozidla v hlavním směru nejsou nuceny zastavovat a často ani snižovat rychlost. V důsledku toho dosahují vysokých rychlostí a zvyšují riziko kolizních situací. [4]

Dynamické řízení se v dnešní době zavádí na řadě křižovatek ve velkých i menších městech. Každý z výše popsaných způsobů má své výhody a nevýhody a je velmi důležité vybrat správný algoritmus řízení. Musíme vzít v úvahu finanční náklady, dostupné technologie, umístění daného uzlu a jeho návaznost na oblast, možnosti zklidňování dopravy apod.

4.4. Vyšší algoritmy řízení

Snaha stále zlepšovat a zefektivňovat dopravu se projevuje i na řízení dopravy a neustále probíhají simulace a výzkumy, které snaží najít vhodné algoritmy k řízení uzlu. V následující kapitole je popsáno několik z nich, včetně výsledků simulací.

4.4.1. Fuzzy řízení

Nejznámější a nejprozkoumanější z algoritmů inteligentního řízení je fuzzy řízení. Může se uplatnit jak samostatně, tak v kombinaci s jinými druhy řízení.

Historie

Fuzzy množinu poprvé definoval L. A. Zadeh v roce 1965. Hlavním rozdílem oproti klasické množině (v teorii fuzzy množin bývá označována jako ostrá množina) je, že prvek může do fuzzy množiny patřit jen částečně. V další práci Zadeh dále rozvíjel tuto teorii a dokázal její využití pro kontrolu a řízení. [30]

Poprvé byla fuzzy logika použita v roce 1970 pro kontrolní systém provozu turbíny. Pro řízení SSZ byla tato teorie použita poprvé v roce 1977, kdy Pappis a Mamdani publikovali článek, který popisuje fuzzy řízení na izolované křižovatce. [32]

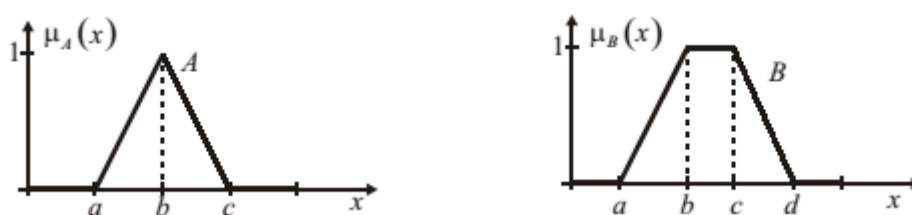
Princip

Fuzzy logika je podoborem matematické logiky a vychází z teorie množin. Zatímco klasická logika používá pouze pojmy pravda a nepravda (1 a 0), fuzzy logika pracuje s celým uzavřeným intervalem $\langle 1,0 \rangle$. [33]

Prvek tedy patří do množiny s určitou mírou příslušnosti, která je vyjádřena stupněm příslušnosti a je reprezentována funkcí příslušnosti. Platí, že čím je vyšší stupeň příslušnosti, tím je pravděpodobnější, že prvek do vybrané fuzzy množiny patří.

Celý algoritmus je založený na třech procesech. Jedná se o proces fuzzifikace, fuzzy inference a proces defuzzifikace.

Při fuzzifikaci jsou naměřené hodnoty přiřazeny podle funkce příslušnosti do fuzzy množin. Funkce příslušnosti mohou nabývat hodnot od 0 do 1 a bývají sestavené z různých křivek, dva základní typy funkcí příslušnosti jsou zobrazeny na následujícím obrázku [5]. [34]

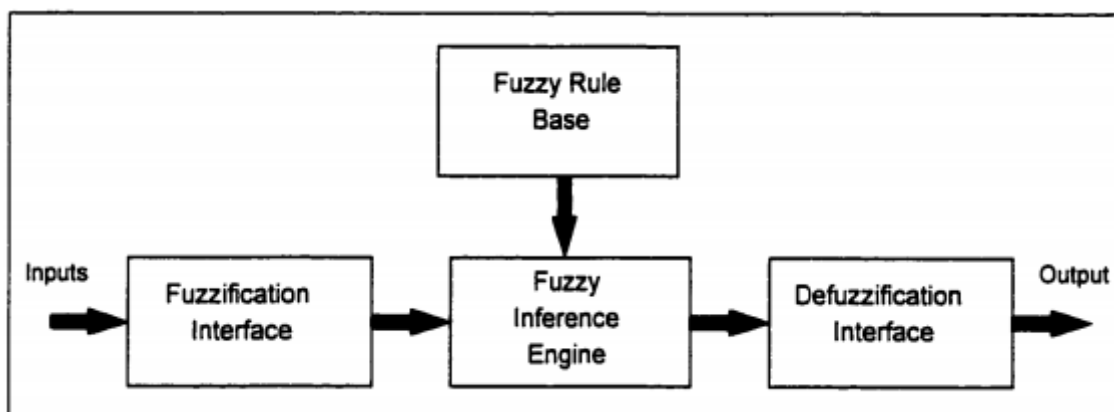


Obrázek 5- Funkce příslušnosti [34]

Poté následuje proces fuzzy inference. Jedná se vlastně o vyhodnocení rozhodovacích pravidel na základě fuzzy logické dedukce, která používá pravidla typu IF-THEN (JESTLIŽE-PAK).

Posledním krokem je proces defuzzifikace, který přiřazuje výstupní fuzzy množině definovanou akční veličinu. Pro určení hodnoty této veličiny lze použít několik metod, jako například metodu středu plochy COA, která je nejpoužívanější, dále metodu průměrů středů CAM nebo metodu prvního maxima FoM. [33]

Na následujícím obrázku [6] je znázorněno schéma fuzzy řízení. Je zde vidět návaznost všech tří procesů: fuzzifikace, fuzzy interference a defuzzifikace. Také je zde znázorněna množina fuzzy pravidel, se kterou se pracuje při fuzzy interferenci.



Obrázek 6- Schéma fuzzy řízení [30]

Aplikace

Při aplikaci fuzzy řízení na SSZ jsou vstupními veličinami minimálně dvě dopravní charakteristiky. Obvykle se jedná o počet příjezdících vozidel, délku kolony a čas, ale vstupními veličinami může být například i obsazenost detektoru, rychlost vozidel nebo intenzita provozu. Tyto hodnoty poté projdou fuzzifikací, kdy se kódují podle funkce příslušnosti do jazykových termínů fuzzy čísel a jsou zařazena do určité fuzzy množiny. Poté následuje krok fuzzy interference, ve kterém se využívá báze pravidel obsahující všechna pravidla IF-THEN. Jedná se například o pravidla jako IF počet příjezdících vozidel je velký AND délka kolony je velká THEN prodluž signál Volno. Podle těchto pravidel se provede dedukce a výsledkem je výstupní fuzzy množina. Posledním procesem je defuzzifikace, kdy je výstupním proměnným přiřazena konkrétní hodnota, například prosloužení signálu Volno. [32]

Výhodou fuzzy řízení je kromě snadné implementace i zvýšení efektivity průjezdu křižovatkou. Je výhodné jej používat na křižovatkách s výraznějšími změnami zatížení. Fuzzy řízení má na takovýchto místech přibližně o 3-8 % nižší čekací doby a o 2-12 % nižší procento zastavených vozidel, než řízení dynamické. [1]

V článku s názvem Adaptive traffic signal control using fuzzy logic, který zpracoval S. Chiu [35] byla fuzzy logika použita na řízení více křižovatek. Fuzzy logika byla použita

k nastavení délky cyklů, nastavení dělení fáze a nastavení offsetu. Řízení na křižovatce bylo ovlivňováno daty naměřenými na sousedních křižovatkách. V rámci simulace byl nejprve u všech křižovatek nastaven pevný cyklus, poté bylo nastaveno adaptivní řízení využívající fuzzy logiku u třech uzlů a nakonec u všech uzlů. Z výsledků simulace plyne, že efektivita zavedení adaptivního řízení pouze na části křižovatek závisí na rozdílu délky pevně daného cyklu a cyklu určeného fuzzy logikou. Pokud jsou tyto délky výrazně rozdílné, roste počet vozidel, která musí na křižovatce zastavit.

Na následujícím obrázku [7] je znázorněno porovnání doby zdržení a počtu zastavení při délce cyklu 40 s a 20 s. V první části grafu mají všechny křižovatky pevný cyklus, v druhé tři adaptivní, v poslední všechny adaptivní.

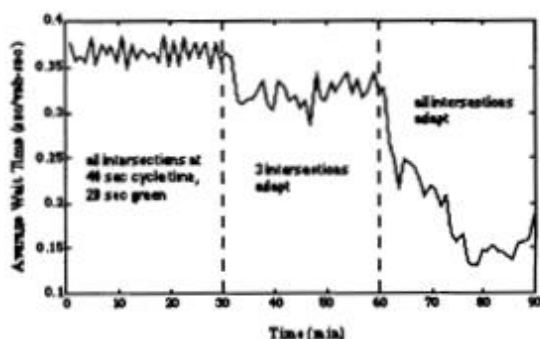


Fig. 6. Average waiting time for the case in which all intersections have an initial cycle time of 40 seconds.

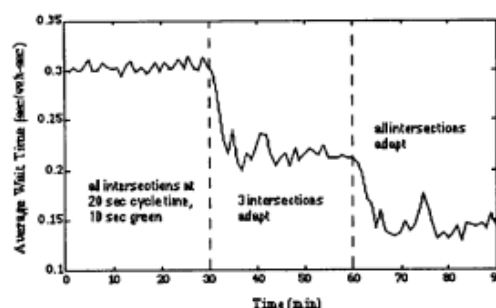


Fig. 8. Average waiting time for the case in which all intersections have an initial cycle time of 20 seconds.

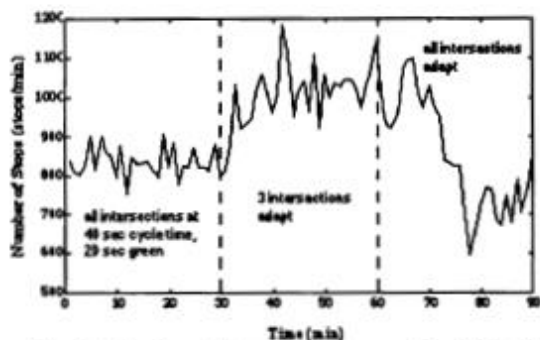


Fig. 7. Number of stops for the case in which all intersections have an initial cycle time of 40 seconds.

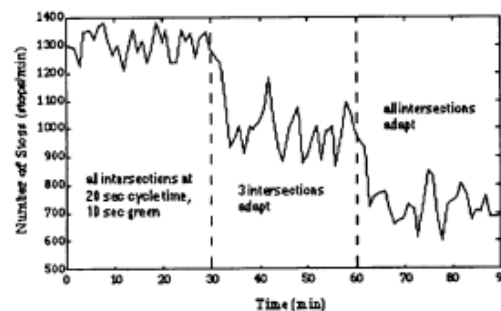


Fig. 9. Number of stops for the case in which all intersections have an initial cycle time of 20 seconds.

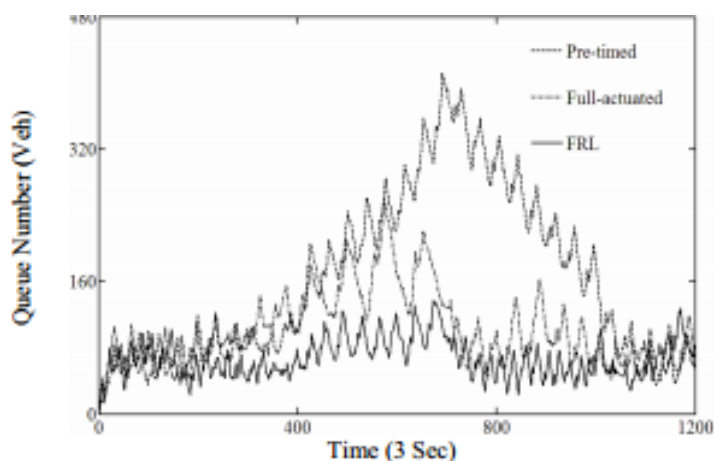
Obrázek 7- Porovnání doby zdržení a počtu zastavení [35]

V článku Anti-Congestion Fuzzy Algorithm for Traffic Control of a Class of Traffic Networks [36] se autoři Zhang, Wu a Liu zabývají návrhem fuzzy systému pro přetíženou síť. Byl navržen algoritmus proti dopravním kongescím (ACFA- anticongestion fuzzy algorithm). Jeho úkolem je kromě zabránění kongescí, také minimalizace doby zpoždění vozidel. Má dvě vrstvy, jedna řídí určitý konkrétní uzel a druhá řízení dopravy v celé řešené oblasti.

Navržený systém je schopen regulovat dopravní proudy na vjezdu do oblasti a tím zamezit přetížení.

V publikaci A stochastic adaptive traffic signal control model based on fuzzy reinforcement learning (FRL) [37] se autoři (K. Wen, W. Yang, S. Qu) zabývají návrhem stochastického adaptivního systému založeného na posíleném fuzzy učení, které bylo porovnáno s řízením podle pevného signálního plánu a s dynamickým řízením.

Porovnání délky fronty pevného, dynamického a FRL řízení je znázorněno na obrázku [8]



Obrázek 8- Porovnání délky fronty [37]

Fuzzy logika se dnes uplatňuje v řadě technologií. Při řízení uzlu prokazatelně zvyšuje efektivitu řízení. Je to dáno právě základní vlastností fuzzy řízení a to, že danou situaci vyhodnocuje s určitou pravděpodobností a umí na ni tedy lépe reagovat. Fuzzy logika se dá kombinovat s řadou dalších algoritmů, které jsou popsány níže.

4.4.2. Neuronové sítě

Neuronové sítě spojují výhody pokročilých algoritmů s biologií a jednou velice důležitou vlastností živočichů, a tou je schopnost učit se.

Historie

V roce 1943 vytvořil Warren McCulloch a Walter Pitts matematický model neuronu a jejich článek se stal počátečním bodem pro výzkum neuronových sítí. Dalším důležitým krokem byl vynález perceptronu v roce 1957, který zobecňuje první model neuronu pro reálný obor parametrů. Následovala řada dalších algoritmů pro neuronové sítě, od 60. let

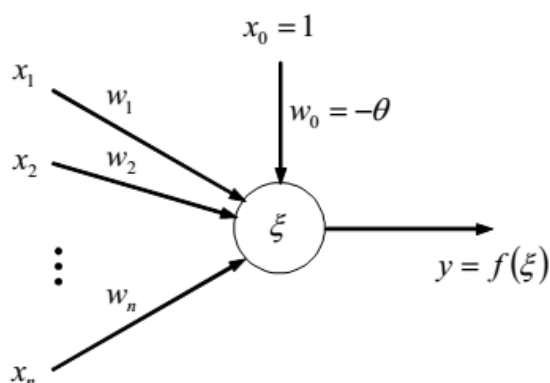
rozvoj neuropočítačů a v roce 1987 se konala první velká konference na toto téma. Téhož roku byla založena mezinárodní společnost pro výzkum neuronových sítí (INNS) a následně mnoho univerzit založilo výzkumné ústavy, které se tímto problémem zabývají. [38]

Princip

Neuronová síť je složena z neuronů, které jsou vzájemně propojeny. Neuronové sítě nepracují pouze algoritmicky, ale kopírují schopnost lidského mozku učit se, řeší tedy problémy na základě podobnosti a zevšeobecňování.

Neuron (perceptron)

Formální neuron má n reálných vstupů, které jsou ohodnoceny vahami, a pouze jeden výstup. Vstupům říkáme dendrity (spoje) a může se jednat jako o podnět z okolí, tak o výstup z jiného neuronu. Výstup z neuronu nazýváme axon. Schéma neuronu je zobrazeno na obrázku [9].



Obrázek 9- Schéma neuronu [39]

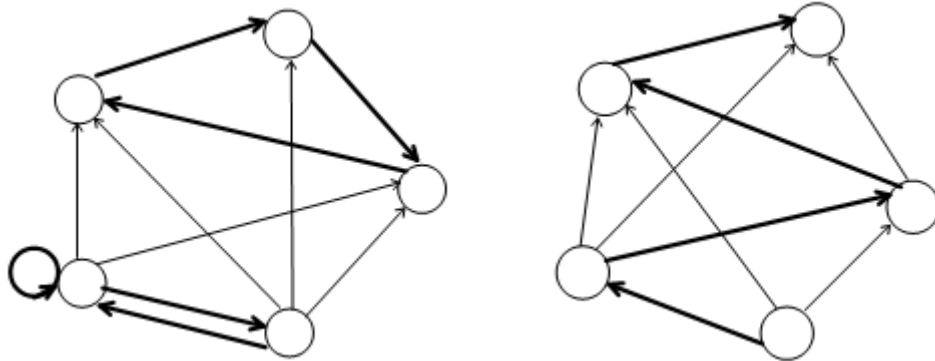
Každá neuronová síť je složena ze vzájemně propojených neuronů. Rozlišujeme neurony vstupní, pracovní (skryté, mezilehlé, vnitřní) a výstupní.

Neuronová síť pracuje ve třech režimech, dynamikách.

1. Organizační dynamika

Specifikuje architekturu sítě a její změnu, která probíhá tak, že je v případě potřeby síť rozšířena o další neurony a potřebné spoje. Architektura může být jak cyklická, kdy v síti existuje skupina neuronů, která tvoří cyklus, tak acyklická, kde cyklus neexistuje, všechny cesty vedou jedním směrem. Obě architektury jsou

zobrazeny na obrázku [10]. V druhém případě lze neurony rozdělit do vrstev tak, že spoje mezi neurony vedou jen z nižších vrstev do vyšších. Pokud je první vrstva tvořena pouze vstupními neurony a poslední vrstva pouze výstupními, jedná se o vícevrstvou neuronovou síť. [40]



Obrázek 10- Architektura neuronové sítě [40]

Cyklická architektura

Acyklická architektura

2. Aktivní dynamika

Specifikuje počáteční stav sítě a způsob jeho změny v čase. Stav vstupních neuronů se nastaví na tzv. vstup sítě a ostatní neurony jsou v uvedeném počátečním stavu. Poté probíhá vlastní výpočet. V každém dalším časovém kroku je vybrán jeden, nebo více neuronů, které aktualizují svůj stav na základě svých vstupů. Stav výstupních neuronů, je výstupem neuronové sítě. [40]

3. Adaptivní dynamika specifikuje počáteční konfiguraci sítě a způsob změny vah v čase. Nejprve se nastaví váhy všech spojů v síti na počáteční konfiguraci, poté probíhá adaptace, která má za cíl najít konfiguraci sítě ve váhovém prostoru, která by v aktivním režimu realizovala danou funkci. Adaptivní režim tedy slouží k učení funkce. Podle způsobu učení dělíme neuronové sítě na dvě skupiny. Pokud je tréninková množina zadána vstupem i správným výstupem, jedná se o učení s učitelem. Pokud množina obsahuje jen vstupy sítě, jedná se o učení bez učitele nebo také samoorganizaci. [40]

Nejpoužívanější metody učení

Hebbovské učení

Tato metoda je založena na principu, že časté používání spoje posiluje jeho hodnotu váhy. Váhové hodnoty budou narůstat mezi neurony, které jsou ve stavu ON a naopak klesat mezi neurony, které jsou ve stavu OFF.

Metoda zpětného šíření chyby (backpropagation)

Tato metoda je nejrozšířenější, je používána asi v 80 % aplikací neuronových sítí.

Má tři etapy:

1. Dopředné šíření vstupního signálu tréninkového vzoru
2. Zpětné šíření chyby
3. Aktualizace váhových hodnot na spojeních

Nejprve obdrží všechny neurony ve vstupní vrstvě vstupní signál, který přenesou k neuronům vnitřní vrstvy. Tyto neurony vypočítají svou aktivaci a pošlou signál neuronům ve výstupní vrstvě. Neurony v této vrstvě vypočítají svou aktivaci, která odpovídá skutečnému výstupu po předložení vstupního vzoru [41]

Aplikace

Neuronové sítě se používají jak k řízení, tak i k predikci dopravy. Nejčastěji probíhaly simulace na větší oblasti. Většina simulací měla dobré výsledky, nicméně výzkum stále pokračuje a je snaha o zlepšení těchto výsledků.

V článku s názvem Traffic Management Applications of Neural Networks, jehož autoři jsou J. F. Gilmore a J. E. Khalid [42] byl použit Hopfieldův model Neuronové sítě pro adaptivní systém řízení sítě ve městě Atlanta v roce 1993. Neuronová síť zefektivňuje řízení dopravy na základě předem získaných dat, které využívá k učení. V tomto článku se jedná o řízení oblasti a cílem je odklon dopravy z více zatížených úseků do úseků volnějších a prevence kongescí. Simulace se zaměřovala na okolí dvou sportovišť, kde byly plánovány olympijské hry a očekávala se nárazová vysoká intenzita dopravy při příjezdu a odjezdu diváků.

U Hopfieldova modelu jsou všechny neurony sítě vzájemně propojeny. Nejprve jsou inicializovány binárními nebo bipolárními souřadnicemi. Protože jsou všechny neurony propojeny, začnou se navzájem ovlivňovat, až dokud systém nedosáhne stabilního stavu.

V článku, který napsali M. S. Dougherty a M. R. Cobbett a který nese název Short-term inter-urban traffic forecasts using neural network, [43] byla předpovídána dopravní situace v oblasti Rotterdamu, Haagu a Utrechtu. Bylo známo, že systém funguje velmi

přesně, pokud má k dispozici všechna známá data. Takové množství dat ale systém moc zatěžuje a proto se hledalo ideální množství vstupních dat. Vstupními daty byla intenzita, obsazenost a rychlost dopravního proudu. Nejprve byla data aktualizována po 1 minutě, ale tento způsob systém zahlcoval a vedl k nepřesnostem. Ideální časový interval na sběr dat byl stanoven na 5 minut.

V článku [44] od E Bingham s názvem Reinforcement learning in neurofuzzy traffic signal control je popsán neurofuzzy algoritmus pro řízení dopravy. U tohoto řízení neuronová síť nastavuje polohu a typ funkce příslušnosti fuzzy řízení a uplatňuje se hlavně při rovnoměrném zatížení uzlu.

Řízení pomocí neuronové sítě dosahuje dobrých výsledků, pokud máme k dispozici kvalitní učící podklady. Nejvíce se uplatňuje při řízení a predikci dopravy určité oblasti. Jedním z důvodů je, že dokáže zpracovávat více dat najednou. U řízení uzlu nalezneme její využití hlavně v kombinaci s fuzzy logikou.

4.4.3. Agentní a multiagentní systémy

Dalším algoritmem pro řízení uzlu mohou být agentní a multiagentní systémy, které mohou pracovat buď samostatně, nebo například mohou spolupracovat s neuronovými sítěmi, o kterých pojednávala minulá kapitola.

Historie

Prvním krokem ke vzniku agentních systémů byla distribuovaná umělá inteligence, ve které se objevují autonomní jednotky řešící samostatně problémy. Nazývají se aktéři. Z nich se později vyvinul pojem agenti používaný v agentních systémech.

Princip

Tyto systémy jsou založeny na agentech, kteří umí samostatně pracovat. Agent vnímá prostředí pomocí senzorů a samostatně pracuje tak, aby vyhověl stanoveným požadavkům. Pokud je v systému pouze jeden agent, nebo i více, ale vzájemně spolu nekomunikují, jedná se o agentní systém (AgS). Pokud agenti komunikují i mezi sebou, jedná se o multiagentní systém (MAS).

Základní vlastnosti agentů:

- Autonomie (agent se rozhoduje nezávisle)
- Reaktivita (agent reaguje na změny)
- Proaktivita (ovlivňování okolí tak, aby agent dosáhl svého cíle co nejjednodušeji)

[45]

Druhy agentů:

- Inteligentní agent (Agent má schopnost plnit cíle s využitím matematické dedukce)
- Reaktivní agent (Agent má pouze autonomní a reaktivní vlastnosti, je schopen reagovat na podněty.)
- Deliberativní agent (Agent má autonomní, reaktivní i proaktivní vlastnosti, je schopen plánovat akce dopředu.)
- Kognitivní agent (Agent má autonomní a reaktivní vlastnosti, ale může mít i vlastnosti proaktivní. Je schopen vyvozovat závěry z pozorování.)
- Racionální agent (Agent má všechny výše uvedené vlastnosti. Dokáže si jak plánovat akce dopředu, tak i vytvářet nová pravidla na základě pozorování.)

[45]

Druhy prostředí:

- Plně/částečně pozorovatelné (Agent může získat všechny/ některé informace z prostředí pomocí detektorů)
- Statické/ dynamické (Prostředí se mění pouze akcemi agenta/ mění se i jinak)
- Deterministické/ nedeterministické (Každá akce má právě jeden výsledek/ nemá zaručený jeden výsledek)
- Diskrétní/ spojité (Prostředí má konečné nebo početné množství stavů/ nekonečné nebo nepočetné množství stavů)

[45]

Agenti mohou využívat kromě vlastní báze znalostí i neuronové sítě nebo expertní systémy. Výhodou multiagentních systémů oproti agentním je, že mohou řídit i skupinu křížovatek.

Aplikace

V článku A Multi-Agent Approach for Intelligent Traffic-Light Control, který publikovali autoři Hirankitti, Krohkaew a Hogger [46] byla vytvořena dopravní simulace pomocí multiplatformního prostředí NetLogo. Tento simulátor využívá několik předpokladů:

- Rozdíl dvou senzorů před křižovatkou se rovná velikosti fronty.
- Rozdíl dvou senzorů za křižovatkou se rovná velikosti místa za křižovatkou.
- Příchozí intenzita se rovná počtu aut, která se dostanou do dané fronty za sekundu.
- Odchozí intenzita se rovná počtu aut, která se dostanou z dané fronty za sekundu.

Díky senzorům výše dostaneme kvalitní vyhodnocení provozu. Báze znalostí obsahuje kromě 8 pravidel i několik podpravidel. Ty slouží pro spolupráci agentů a práci se SSZ. Do simulace byly zahrnuty celkem 4 křižovatky a sloužila k porovnání agentních a multiagentních systémů. Bylo dokázáno, že multiagentní systémy dosahují lepších výsledků, než systémy agentní. Průměrná doba zpoždění poklesla z 82 s u agentních systémů na 66,16 s u multiagentních systémů.

Článek Agent controlled traffic lights od D. A. Roozemonda a J. L. H. Rogiera [47] využívá agenty s proaktivními vlastnostmi a dále je rozděluje do 4 skupin.

- Agenti úseku silnice
- Agenti křižovatek
- Agenti oblasti
- Agenti tras

Agent křižovatky sbírá a distribuuje data pomocí agenta úseku silnice, analyzuje dopravní situaci, optimalizuje a spolupracuje s dalšími agenty. Těmito akcemi se snaží dosáhnout globálního optima. Tento agent zahrnuje i predikční model, který zohledňuje budoucnost, a meta model, který porovnává přesnost této predikce a případně upravuje její parametry.

Agentní a multiagentní systémy obsahují samostatně pracující jednotky, které spolu mohou komunikovat. Při řízení uzlu teda může být každému řadiči přiřazen agent, který optimalizuje řízení. Pokud se jedná o multiagentní síť, je možné, aby spolu agenti komunikovali a tím se zefektivnilo řízení celé oblasti.

4.4.4. Genetický algoritmus

Dalším algoritmem, který je inspirován biologickým principem, přesněji evoluční teorií, je genetický algoritmus. Jedná se o relativně nový algoritmus, proto neexistuje velké množství simulací pro jeho zhodnocení. Zajímavé je, že společně s fuzzy algoritmem byl opravdu aplikován pro řízení uzlu ve městě Taipei.

Historie

V roce 1960 Ingo Rechenberg přišel s myšlenkou evolučních výpočtů, kterou zpracoval ve své práci *Evolution strategies*. Genetický algoritmus byl popsán o 15 let později v knize *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, kterou napsal John Holland. V roce 1992 John Koza použil tento algoritmus pro vývoj programů, které mají plnit zadané úlohy. Tím vzniklo genetické programování. [48]

Princip

Tento algoritmus řadíme mezi evoluční algoritmy, které vycházejí z Darwinovy evoluční teorie vývoje populací. Genetické algoritmy pracují na základě evoluce a genetiky. Nejprve je náhodně vygenerována množina chromozómů. Z těch jsou pak vybrány dvojice, které nejlépe odpovídají požadavkům. Potomci vznikají křížením těchto dvou chromozómů, rodičů, které následně nahrazují. Během křížení hraje důležitou roli mutace. Při mutaci se prochází geny chromozómu a mění se jejich hodnota.

Algoritmus probíhá v 7 krocích.

1. Návrh struktury

Jedinec se navrhuje tak, aby se snadno provádělo křížení a dobře se vyjadřovala jeho kvalita.

2. Inicializace

Jedná se o počáteční nastavení vektorů tvořících jedince. Většinou se používají náhodné hodnoty.

3. Ohodnocení

V této fázi se vypočítá kvalita jedince.

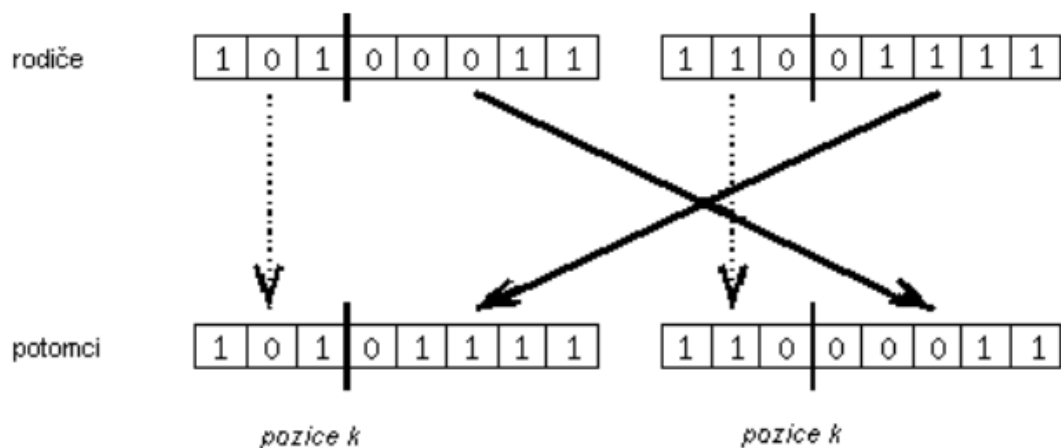
4. Selektce

V této fázi se kopírují řetězce ze staré generace do generace nové. Nevznikají ale ještě žádní noví jedinci.

5. Křížení

Křížení probíhá ve dvou krocích a graficky je znázorněno na obrázku [11].

1. Stanoví se náhodně pozice chromozómu. Na obrázku se jedná o pozici k .
2. Z původních dvou chromozómů se vytvoří dva noví jedinci. První potomek je tvořen chromozómy 1 až k prvního z rodičů a chromozómy $k+1$ až n , kde n je délka chromozómu, druhého z rodičů. Druhý potomek má zase chromozómy 1 až k od druhého z rodičů a zbylé od prvního. Tím vzniknou dva nové chromozómy.



Obrázek 11- Princip křížení u genetického algoritmu [40]

6. Mutace

Při mutaci je možné vytvořit kvalitnější řetězec pozměněním jednoho chromozómu.

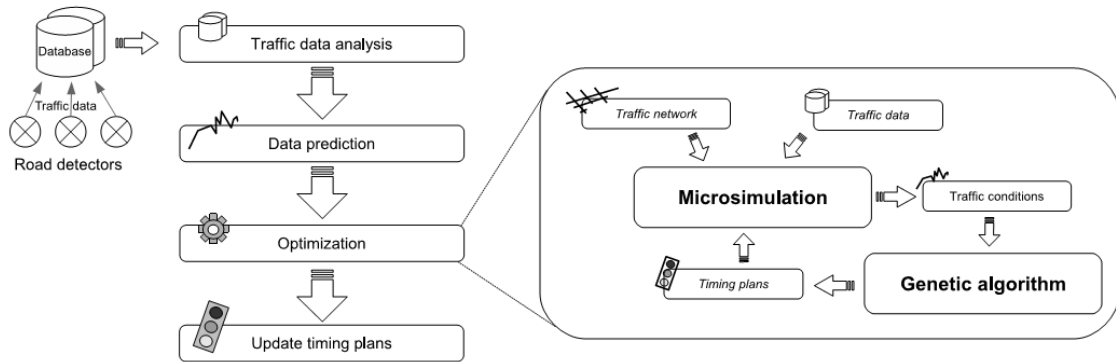
7. Reprodukce

Jsou vybrány nejvhodnější řetězce pro další selekce, křížení a mutace.

[49]

Aplikace

V článku [50] autoři Michal Staněk a Halina Kwasnicka využívají genetický algoritmus pro optimalizaci řízení uzlu. V tomto článku popisují počítačový systém, který se skládá z mikrosimulačního modelu a genetického algoritmu. Nejprve jsou posbírány data z dopravních detektorů a poté proběhne proces optimalizace za použití genetického algoritmu a simulace. Je ovšem nutno předpovídat dopravu dopředu a tím kompenzovat čas, který je potřeba pro optimalizační algoritmus. Schéma řízení je znázorněno na následujícím obrázku [12].



Obrázek 12- Schéma řízení pomocí mikrosimulace a genetického algoritmu [50]

Pro řízení dopravy se většinou tento algoritmus kombinuje s výše popsaným fuzzy algoritmem. Ve článku Adaptive traffic signal control with iterative genetic fuzzy logic controller (Y. C. Chiou, L. Lan) [51] je využit genetický algoritmus pro výběr fuzzy pravidla a nastavení funkce příslušnosti. Tento systém byl aplikován na Tchajwanu ve městě Taipei.

Genetický algoritmus, podobně jako algoritmus evoluční, nachází své využití hlavně při optimalizaci řízení. Výhodou je, že není potřeba učící množina, algoritmus se díky křížení a mutaci sám optimalizuje a hledá nejlepší možné řešení.

4.4.5. Petriho síť

Petriho síť se používají hlavně k modelování a simulacím, nicméně se dají využít i pro řízení uzlu.

Historie

Matematik C. A. Petri zavedl tento pojem ve své práci v 60. letech 20. stol. V 80. letech se začali vyvíjet Petriho síť vyšší úrovně. Ty odstraňovaly nedostatky, které do té doby vývoj brzdily. Jednalo se hlavně o velikost modelů a hierarchický koncept, který dosud chyběl. [52]

Princip

Petriho síť jsou nástroj určený k modelování a analýze procesů. Základními prvky P/T Petriho síť jsou místa (places) a přechody (transitions). Místa reprezentují podmínku a

jsou zobrazována kružnicemi. Přechody znázorňujeme úsečkami a symbolizují nějakou událost. Místo a přechod nebo přechod a místo jsou propojeny orientovanými hranami. Stav sítě je definován umístěním tokenů v místech. Přechod má vždy definovanou množinu vstupních a výstupních míst, která určuje počet odebraných nebo přidaných tokenů. Jedná se vlastně o ohodnocení orientovaných hran. Přechod může být proveden, pokud jsou splněny všechny vstupní podmínky. Místa musí obsahovat dostatečné množství tokenů. Na obrázku [13] je znázorněna změna stavu v Petriho síti před a po provedení přechodu. [53]



Obrázek 13- Příklad změny stavu v Petriho síti [53]

Aplikace

Nejčastější uplatnění nacházejí Petriho sítě při synchronizaci asynchronních procesů a je tedy možné je uplatnit i při návrhu řídicí logiky světelných křižovatek. Pro návrh je ideální využít P/T Petriho sítě a při vytváření struktury se prvky sestavují tak, aby prostřednictvím pravidel pro uskutečňování přechodů byl splněn princip světelného řízení křižovatek. [54]

V článku s názvem Příspěvek o možném využívání P/T Petriho sítí při navrhování světelného řízení křižovatek, který napsal M. Turek, [53] byl použit pro sestavení a simulaci Petriho sítě software Snoopy a Pipe2. Nejprve byla provedena analýza vstupních podkladů, což bylo schéma křižovatky a schéma fází, ze kterého se zjistí časové intervaly, ve kterých mají volno určité dopravní proudy na křižovatce. Poté se sestaví Petriho síť. Místa v Petriho síti budou představovat světelné signály, přechody okamžiky, kdy dochází k jejich přepínání. Poloha tokenu bude reprezentovat aktuální návěstní znak a hrany budou umožňovat změny stavů. Postupně se sestaví Petriho síť představující všechny fáze a vzájemně se propojí, aby se fáze mohly v rámci cyklu střídat. Poté je navržena řídicí logika ve dvou etapách. V první etapě se provede návrh posloupností jednotlivých světelných signálů na návěstidle (pořadí světelných signálů) a ve druhé návrh posloupnosti jednotlivých světelných signálů u jednotlivých návěstidel, které zajišťují správné přechody mezi fázemi.

Petriho síť se využívá hlavně k modelování a dopravním simulacím. Nicméně jak plyne z výše uvedeného článku, lze je využít i pro návrh SSZ. Všechna pravidla pro řízení lze splnit skrze pravidla pro uskutečňování přechodů. Nevýhodou je, že efektivita algoritmu závisí na jeho návrhu, Petriho síť neumí algoritmus řízení sama zefektivňovat, na rozdíl od některých dříve uvedených algoritmů.

5. Porovnání nalezených metod

V předchozí kapitole bylo popsáno několik algoritmů, které lze využít k řízení dopravy. Jednalo se jak o základní, které se již řadu let používají, tak o některé moderní. Nelze samozřejmě tvrdit, že novější metody jsou vždy efektivnější. Je nutné se zamyslet nad požadavky na řízení konkrétního uzlu i na náklady na toto řízení.

5.1. Zhodnocení metod

Statické řízení

Statické řízení je vhodné hlavně při konstantních intenzitách. Jeho výhodou jsou nízké náklady jak na zavedení, tak na provoz. Proto je vhodné jej použít na méně zatížených křižovatkách, kde se neobjevují vysoké výkyvy v provozu. I na těchto místech ovšem zůstává nebezpečí neočekávané změny stavu a s tou se neumí statické řízení vypořádat.

U nízkých intenzit je vhodné zvážit, zda není vhodnější nechat křižovatku neřízenou, nebo zda není vhodné na určitou denní dobu vypínat SSZ. Z hlediska psychiky chodců i řidičů je vhodné minimalizovat situaci, kdy je zatížení křižovatky tak malé, že účastníci provozu získávají pocit, že není nutné čekat na signál Volno a tím porušují dopravní předpisy.

Statické řízení lze možné použít i na uzlech, které jsou naopak velmi zatížené a ani dynamické řízení kongesce nesnížilo. V takovéto situaci je vhodné použít statické řízení doplněné o časový odpočet, který informuje chodce, popřípadě i řidiče, za jakou dobu mají očekávat signál Volno.

U statického řízení máme dvě základní možnosti. První je snižování doby cyklu a tím i propustnosti uzlu, druhou je naopak maximalizace doby cyklu a propustnosti uzlu. Je nutné najít určité optimum mezi dvěma extrémy. Vhodnější je ovšem přiklánět se k první možnosti, která sice snižuje kapacitu křižovatky, ale snižuje čekací dobu chodců a vozidel, což působí velmi pozitivně na bezpečnost.

Dynamické řízení

Dynamické řízení bez aplikace inteligentního řízení je v současné době nejpoužívanější metodou. Na rozdíl od statického umí reagovat na neočekávané situace a kongesce. Nutnost instalace dopravních detektorů a jejich údržba ovšem zvyšuje náklady na zavedení i provoz.

Toto řízení je velmi důležité pro preferenci MHD nebo vozidel hasičské a integrované záchranné služby, což je jeden z důvodů, proč se u řady křižovatek mění řízení z pevného na dynamické.

Nejpoužívanější metodou je prodlužování signálu Volno v závislosti na měření časové mezery. Tato metoda dosahuje dobrých výsledků při snižování rizika vzniku kongescí na zatíženějších ramenech křižovatky. Je vhodné indukční smyčky instalovat na všechny ramena, abychom předešli situaci, kdy se pro teoreticky zatíženější směr prodlužuje signál volno, zatímco na obvykle méně zatíženém směru se tvoří kongesce.

Dále bych z této kategorie ráda vyzdvihla princip řízení pomocí celočervené, který je s oblibou používán hlavně v nočních hodinách při malých intenzitách. Jako velmi pozitivní přínos tohoto způsobu řízení hodnotím motivaci k dodržování maximální povolené rychlosti. Velké procento řidičů jezdí po stejných trasách, a proto je šance, že i řidič, který by za normálních okolností nejvyšší povolenou rychlost překročil, si uvědomí, že v tomto případě to pro něj nemá význam, protože bude donucen zastavit.

Vyšší algoritmy řízení

Poslední skupinou je inteligentní řízení, které zahrnuje fuzzy řízení, řízení pomocí neuronových sítí, agentní a multiagentní řízení, genetické algoritmy a Petriho sítě. Tyto algoritmy se používají jak samostatně, tak ve vzájemných kombinacích. Jejich výhodou je optimalizace řízení uzlů a velice efektivní jsou i při řízení větších oblastí. Jejich nevýhodou je složitější programování a málo reálných aplikací, přestože simulace probíhají už řadu let. Nicméně lze předpokládat, že do výzkumů těchto algoritmů se bude nadále investovat a jejich využití pro řízení se bude zdokonalovat.

Fuzzy řízení dosahuje velmi dobrých výsledků jak u izolované křižovatky, tak u řízení oblasti, ale pouze za předpokladu, že jsou tímto způsobem řízeny všechny nebo většina uzlů v dané oblasti. Důležitou podmínkou pro fungování systému jsou správně sestavená pravidla, která jsou využívána k řízení.

Efektivita využití neuronových sítí je závislá na kvalitě dat, které jsou k dispozici k učení. Pokud je učící množina kvalitní, algoritmus dosahuje dobrých výsledků. Je ale třeba dát pozor na přehlcení sítě daty. Neuronové sítě se také dají využít k určení funkce příslušnosti pro fuzzy řízení.

Umělá inteligence agentů u agentních a multiagentních systémů se jeví jako velmi efektivní metoda pro řízení uzlu. Při porovnání multiagentních a agentních systému bylo dokázáno, že multiagentní systémy dosahují lepších výsledků, než systémy agentní, což je dáno komunikací mezi agenty. Tento způsob řízení je opět možný kombinovat s neuronovými sítěmi a využívat jejich bázi znalostí.

Genetický algoritmus je možné využít jak pro optimalizaci řízení uzlu, tak v kombinaci s jinými algoritmy. V kombinaci s fuzzy řízením je vhodný na výběr pravidla a nastavení funkce příslušnosti tohoto typu řízení.

Petriho sítě se používají hlavně k modelování dopravy, ale je možné je využít i pro návrh logiky světelné signalizace.

5.2. Doporučení pro další sledování

Z výše zmíněných algoritmů a možností řízení uzlu doporučuji pro další sledování algoritmus poslední, a tím je využití Petriho sítí. Nejenže bylo dokázáno, že je možné vytvořit síť, která je vhodná pro návrh logiky řízení pomocí SSZ a ve které jsou splněny všechny základní podmínky pro řízení, ale ukazuje se, že Petriho sítě mohou mít i další využití v dopravním inženýrství.

Pokud tedy předpokládáme, že lze navrhnout logiku řízení, která splňuje všechna základní bezpečnostní kritéria pro řízení uzlu, je pravděpodobné, že by se daná Petriho síť mohla dále rozrůstat a pracovat i s dalšími parametry, které by toto řízení optimalizovaly.

Myslím, že pozitivní vliv na rozvoj této metody by mohla mít i spolupráce ČVUT Fakulty dopravní s Institutem dopravy na Vysoké škole báňské, kde se tímto problémem zabýval výše zmiňovaný Michal Turek. Využíváním Petriho sítí se zde zabýval i Richard Turek, který publikoval příspěvek s názvem Možnosti využití software Snoopy a Pipe2 k navrhování linek MHD.

6. Návrh vlastního algoritmu pro řízení

V následující kapitole je ukázáno, jak se dá navrhnout zjednodušený algoritmus pro řízení uzlu. Protože se jedná o smyšlenou křižovatku a nemáme k dispozici jakákoliv vstupní data, předpokládejme, že je tato křižovatka řízena dvoufázově, dynamicky s dobou signálu Volno 30 s a možností prodloužení o 0-8 s. Zda se signál Volno prodlouží a o kolik bude rozhodnuto právě na základě fuzzy algoritmu. Pro lepší plynulost provozu jsou na navrhované křižovatce zřízeny samostatné odbočovací pruhy pro levé odbočení.

6.1. Popis z hlediska funkčnosti

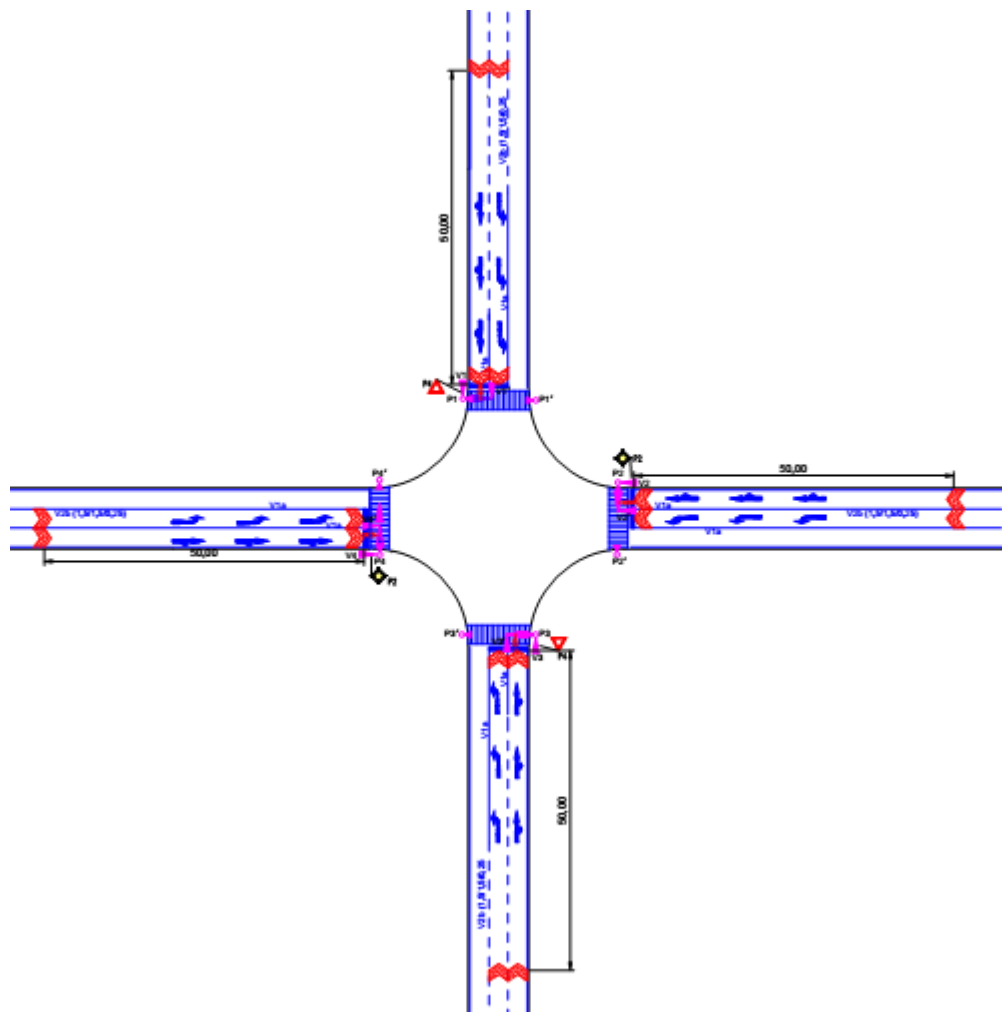
Tento algoritmus funguje na principu fuzzy řízení, kdy je podle délky kolony a počtu vozidel, která projela skrze křižovatku rozhodnuto, zda se bude prodlužovat signál Volno nebo nikoliv. V navrženém algoritmu se bere v potaz počet vozidel, která vjela na signál Volno do křižovatky a současně délka kolony, která se vytvořila na ramenech křižovatky na signál Stůj. Pro tento algoritmus je rozhodující hodnotou součet délky kolony v přímém směru s odbočením doprava a délky kolony v opačném směru v levém odbočovacím pruhu. V daný okamžik pro uzel existují dvě takovéto hodnoty, ale rozhodující je ta vyšší. Obdobně je přistoupeno k hodnotě počtu vozidel, která je pro algoritmus použita. Tímto jsem se snažila zohlednit i provoz doleva odbočujících vozidel

Na každém rameni křižovatky jsou instalovány videodetektory, které jsou schopny díky více detekčním zónám detekovat počet vozidel, která projela danou křižovatkou i délku kolony na daném rameni.

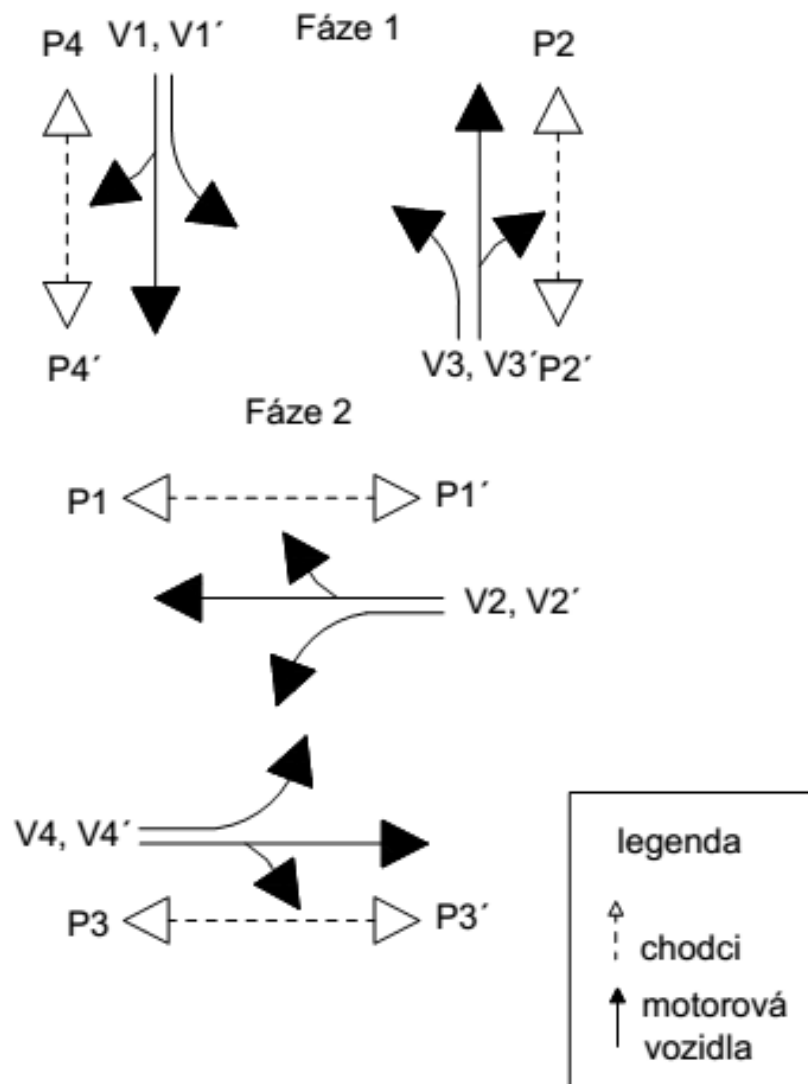
6.2. Schéma křižovatky a fází

Na následujícím obrázku [14] je znázorněna řešená křižovatka, v příloze nalezneme tuto křižovatku v měřítku 1:500, včetně legendy.

Řízení probíhá ve dvou fázích, které jsou znázorněny níže na obrázku [15]. V první fázi mají signál Volno signální skupiny V1, V3, P2 a P4, v druhé fázi V2, V4, P1 a P3. Odbočující vozidla na signál volno při průjezdu křižovatkou musí dodržovat další zákonná ustanovení o přednosti protijedoucích vozidel i na signál Volno přecházejících chodců.



Obrázek 14 Schéma křižovatky, zdroj: autor



Obrázek 15 Schéma fází, zdroj: autor

6.3. Popis řízení

Řízení probíhá na principu prodlužování signálu Volno, algoritmus je navržen pomocí fuzzy logiky. Nejprve jsou pomocí detektorů posbírána data, poté je provedena fuzzifikace, fuzzy inference a defuzzifikace.

Každé rameno křižovatky je vybaveno videodetektory. Každý detektor má celkem dvě detekční zóny v každém pruhu, tzv. virtuální smyčky. První detekční zóna je těsně za stopčárou, druhá je vzdálena 50 m od stopčáry.

Podle toho, zda se v detekční zóně nachází vozidlo, případně podle počtu vozidel, která zónou projela, zjistíme délku kolony. Virtuální smyčky těsně u stopčáry mají za cíl detekovat počet vozidel, která projela křižovatkou.

Následně jsou naměřeným hodnotám přiřazeny jazykové proměnné. Pro tento účel byla použita funkce příslušnosti.

V následující tabulce [2] jsou uvedeny zkratky, které jsou dále používány pro lepší přehlednost a orientaci v textu.

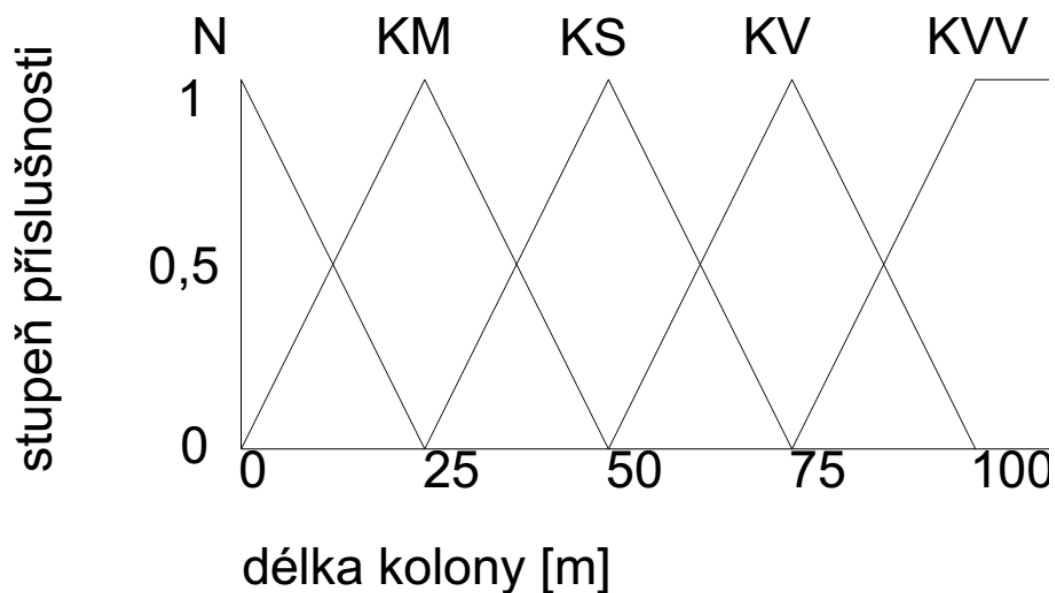
Nulová hodnota	N
Kladná malá hodnota	KM
Kladná střední hodnota	KS
Kladná velká hodnota	KV
Kladná velmi velká hodnota	KVV

Tabulka 2 Zkratky používané pro fuzzy množiny, zdroj: autor

Fáze 1

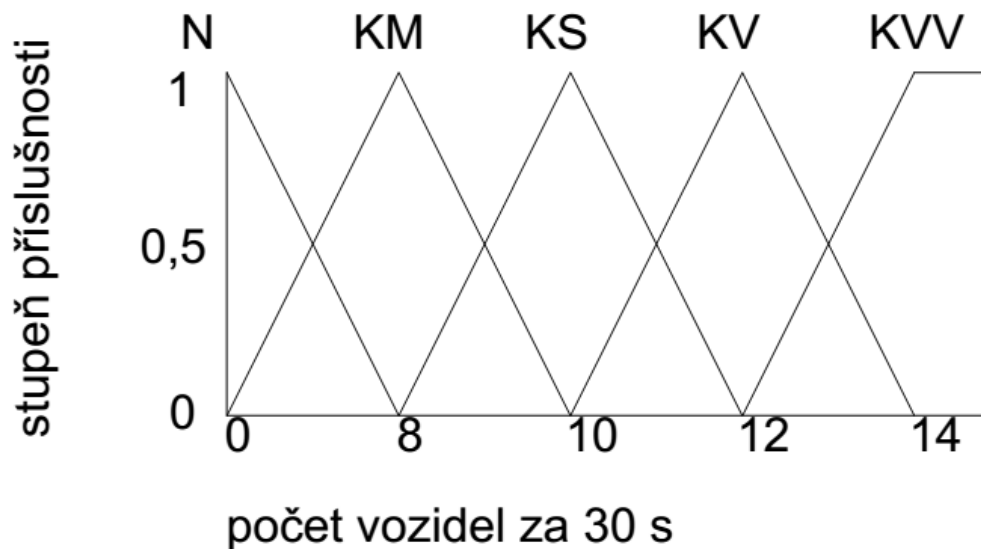
V první fázi mají signál Volno signální skupiny V1, V3, P2 a P4. Dále je uveden příklad algoritmu pro tuto fázi.

První měřenou dopravní charakteristikou je délka kolony, grafické znázornění je na následujícím obrázku [16]. Jedná se o délku kolony ve směru, který aktuálně nemá signál Volno a rovná se součtu kolony v přímém směru s odbočením doprava a kolony v opačném směru v odbočovacím levém řadicím pruhu. Virtuální smyčky se nacházejí za stopčárou a dále 50 m od stopčáry. Teoreticky můžeme dosáhnout hodnoty délky kolony odpovídající 100 m. Stupeň příslušnosti nám udává, jak moc daná hodnota patří do určité fuzzy množiny.



Obrázek 16 Fuzzifikace délky kolony pro signální skupinu V2, V4, zdroj: autor

Druhou měřenou veličinou je počet vozidel, která projela křižovatkou a rovná se součtu vozidel jedoucích v přímém směru s odbočením doprava a počtu vozidel jedoucích v opačném směru a odbočujících doleva. Opět získáme dvě naměřené hodnoty a vybereme tu vyšší. Jedná se o vozidla, která mají v daný okamžik signál Volno a projíždějí daným uzlem. Grafické znázornění je opět na následujícím obrázku [17], jako časový úsek je bráno 30 s.



Obrázek 17 Fuzzifikace počtu vozidel pro signální skupiny V1, V3, která projela křižovatkou, zdroj: autor

Poté jsou použita pravidla, která jsou uložena v bázi pravidel a mají nahrazovat myšlení expertů. V tomto případě se jedná celkem o 25 pravidel, která jsou vypsána níže a následně zobrazena v matici, kde délka kolony (V2, V4) je délka kolony na daném rameni křižovatky v přímém a doprava odbočujícím jízdním pruhu spolu s kolonou doleva odbočujících vozidel z protisměru. Počet vozidel (V1, V3) je počet vozidel, která projela stopčárou na určitém vjezdu, získáme pravidla pro prodloužení zelené na návěstidle (V1, V3):

1. IF délka kolony (V2, V4) je N AND počet vozidel (V1, V3) je N THEN prodloužení zelené (V1, V3) je N
2. IF délka kolony (V2, V4) je N AND počet vozidel (V1, V3) je KM THEN prodloužení zelené (V1, V3) je KM
3. IF délka kolony (V2, V4) je N AND počet vozidel (V1, V3) je KS THEN prodloužení zelené (V1, V3) je KS
4. IF délka kolony (V2, V4) je N AND počet vozidel (V1, V3) je KV THEN prodloužení zelené (V1, V3) je KV

5. IF délka kolony (V2, V4) je N AND počet vozidel (V1, V3) je KVV THEN prodloužení zelené (V1, V3) je KVV
6. IF délka kolony (V2, V4) je KM AND počet vozidel (V1, V3) je N THEN prodloužení zelené (V1, V3) je N
7. IF délka kolony (V2, V4) je KM AND počet vozidel (V1, V3) je KM THEN prodloužení zelené (V1, V3) je KS
8. IF délka kolony (V2, V4) je KM AND počet vozidel (V1, V3) je KS THEN prodloužení zelené (V1, V3) je KS
9. IF délka kolony (V2, V4) je KM AND počet vozidel (V1, V3) je KV THEN prodloužení zelené (V1, V3) je KV
10. IF délka kolony (V2, V4) je KM AND počet vozidel (V1, V3) je KVV THEN prodloužení zelené (V1, V3) je KVV
11. IF délka kolony (V2, V4) je KS AND počet vozidel (V1, V3) je N THEN prodloužení zelené je N
12. IF délka kolony (V2, V4) je KS AND počet vozidel (V1, V3) je KM THEN prodloužení zelené (V1, V3) je N
13. IF délka kolony (V2, V4) je KS AND počet vozidel (V1, V3) je KS THEN prodloužení zelené (V1, V3) je KS
14. IF délka kolony (V2, V4) je KS AND počet vozidel (V1, V3) je KV THEN prodloužení zelené (V1, V3) je KV
15. IF délka kolony (V2, V4) je KS AND počet vozidel (V1, V3) je KVV THEN prodloužení zelené (V1, V3) je KVV
16. IF délka kolony (V2, V4) je KV AND počet vozidel (V1, V3) je N THEN prodloužení zelené (V1, V3) je N
17. IF délka kolony (V2, V4) je KV AND počet vozidel (V1, V3) je KM THEN prodloužení zelené (V1, V3) je N
18. IF délka kolony (V2, V4) je KV AND počet vozidel (V1, V3) je KS THEN prodloužení zelené (V1, V3) je KM
19. IF délka kolony (V2, V4) je KV AND počet vozidel (V1, V3) je KV THEN prodloužení zelené (V1, V3) je KS
20. IF délka kolony (V2, V4) je KV AND počet vozidel (V1, V3) je KVV THEN prodloužení zelené (V1, V3) je KV
21. IF délka kolony (V2, V4) je KVV AND počet vozidel (V1, V3) je N THEN prodloužení zelené (V1, V3) je N
22. IF délka kolony (V2, V4) je KVV AND počet vozidel (V1, V3) je KM THEN prodloužení zelené (V1, V3) je N

23. IF délka kolony (V2, V4) je KVV AND počet vozidel (V1, V3) je KS THEN prodloužení zelené (V1, V3) je N
24. IF délka kolony (V2, V4) je KVV AND počet vozidel (V1, V3) je KV THEN prodloužení zelené (V1, V3) je KM
25. IF délka kolony (V2, V4) je KVV AND počet vozidel (V1, V3) je KVV THEN prodloužení zelené (V1, V3) je KS

Matice pravidel, která je uvedena v tabulce [3] je sestavena tak, aby byl prodloužován signál Volno podle počtu naměřených vozidel, která vjela do křižovatky, ale současně nedocházelo k vytváření neúměrně dlouhých kolon vozidel na ramenech křižovatky se signálem Stůj. Takto nastavený model vede k tomu, že např. při vjezdu 14 vozidel (12 přímý směr a 2 odbočující vlevo s povinností dání přednosti jízdy protijedoucím, příp. chodcům) a délky kolony vozidel 75 metrů (představuje 15 motorových vozidel) dojde sice k prodloužení signálu Volno, ale již menšího než v případě kolony kratší (např. 50 metrů).

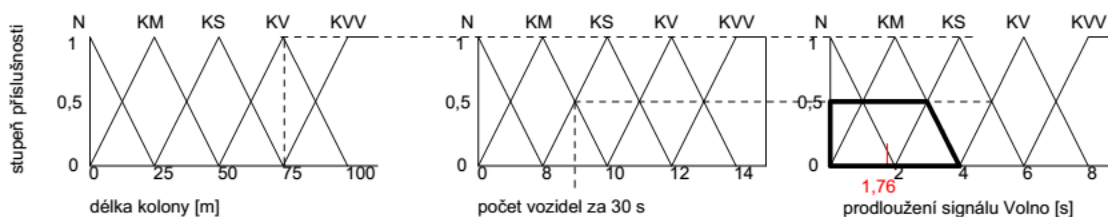
Matice pravidel

Počet vozidel (V1, V3)	N	KM	KS	KV	KVV
Kolona (V2, V4)					
N	N	KM	KS	KV	KVV
KM	N	KS	KS	KV	KVV
KS	N	N	KS	KV	KVV
KV	N	N	KM	KS	KV
KVV	N	N	N	KM	KS

Tabulka 3 Matice pravidel pro první fázi, zdroj: autor

Podle těchto pravidel a pomocí Mamdaniho implikace dostaneme výstupní ostré veličiny. K nalezení ostré veličiny byla v níže znázorněném příkladu použita metoda těžiště plochy.

Na obrázku [18] je znázorněno nalezení ostré hodnoty pro prodloužení signálu Volno v první fázi. Předpokládejme kolonu o délce 40 m na rameni V2 (rovně a vpravo) + V4 (vlevo) a 75 m na rameni V4 (rovně a vpravo) + V2 (vlevo), která mají aktuálně červenou (ramena V2, V4). Dále předpokládejme, že na signál Volno projelo křižovatkou 9 vozidel ze směru V1 (rovně a vpravo) + V3 (vlevo) a 8 vozidel ze směru V3 (rovně a vpravo) + V1 (vlevo). Pomocí Mamdaniho implikace zjistíme délku prodloužení signálu Volno. V tomto případě vyjde 1,76 s, celková doba signálu Volno tedy je 32 s.

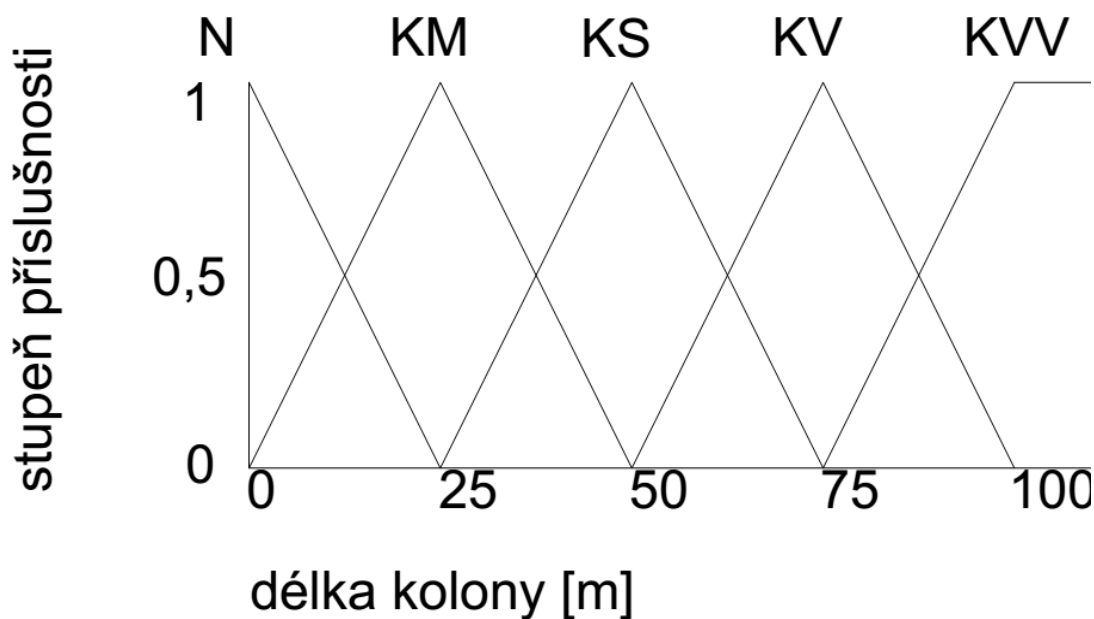


Obrázek 18 Nalezení výstupní veličiny pomocí Mamdaniho implikace pro první fázi, zdroj: autor

Fáze 2

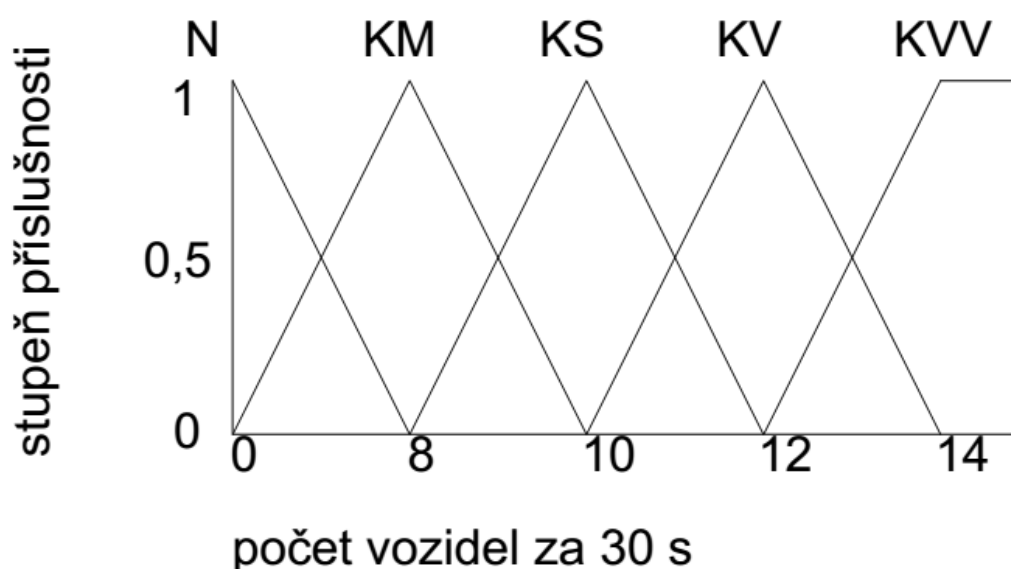
Obdobně postupujeme u druhé fáze. V druhé fázi mají signál Volno signální skupiny V2, V4, P1 a P3. Dále je uveden příklad algoritmu pro tuto fázi.

Délku kolony v tomto případě měříme na ramenech V1 a V3 a grafické znázornění je uvedeno na obrázku [19].



Obrázek 19 Fuzzifikace délky kolony pro signální skupinu V1, V3, zdroj: autor

Počet vozidel měříme u signální skupiny, která má aktuálně signál Volno, tedy V2 a V4, grafické znázornění je opět na následujícím obrázku [20].



Obrázek 20 Fuzzifikace počtu vozidel pro signální skupiny V2, V4, která projela křižovatkou, zdroj: autor

Stejným způsobem upravíme i bázi pravidel a matici pravidel:

1. IF délka kolony (V1, V3) je N AND počet vozidel (V2, V4) je N THEN prodloužení zelené (V2, V4) je N
2. IF délka kolony (V1, V3) je N AND počet vozidel (V2, V4) je KM THEN prodloužení zelené (V2, V4) je KM
3. IF délka kolony (V1, V3) je N AND počet vozidel (V2, V4) je KS THEN prodloužení zelené (V2, V4) je KS
4. IF délka kolony (V1, V3) je N AND počet vozidel (V2, V4) je KV THEN prodloužení zelené (V2, V4) je KV
5. IF délka kolony (V1, V3) je N AND počet vozidel (V2, V4) je KVV THEN prodloužení zelené (V2, V4) je KVV
6. IF délka kolony (V1, V3) je KM AND počet vozidel (V2, V4) je N THEN prodloužení zelené (V2, V4) je N

7. IF délka kolony (V1, V3) je KM AND počet vozidel (V2, V4) je KM THEN prodloužení zelené (V2, V4) je KS
8. IF délka kolony (V1, V3) je KM AND počet vozidel (V2, V4) je KS THEN prodloužení zelené (V2, V4) je KS
9. IF délka kolony (V1, V3) je KM AND počet vozidel (V2, V4) je KV THEN prodloužení zelené (V2, V4) je KV
10. IF délka kolony (V1, V3) je KM AND počet vozidel (V2, V4) je KVV THEN prodloužení zelené (V2, V4) je KVV
11. IF délka kolony (V1, V3) je KS AND počet vozidel (V2, V4) je N THEN prodloužení zelené (V2, V4) je N
12. IF délka kolony (V1, V3) je KS AND počet vozidel (V2, V4) je KM THEN prodloužení zelené (V2, V4) je N
13. IF délka kolony (V1, V3) je KS AND počet vozidel (V2, V4) je KS THEN prodloužení zelené (V2, V4) je KS
14. IF délka kolony (V1, V3) je KS AND počet vozidel (V2, V4) je KV THEN prodloužení zelené (V2, V4) je KV
15. IF délka kolony (V1, V3) je KS AND počet vozidel (V2, V4) je KVV THEN prodloužení zelené (V2, V4) je KVV
16. IF délka kolony (V1, V3) je KV AND počet vozidel (V2, V4) je N THEN prodloužení zelené (V2, V4) je N
17. IF délka kolony (V1, V3) je KV AND počet vozidel (V2, V4) je KM THEN prodloužení zelené (V2, V4) je N
18. IF délka kolony (V1, V3) je KV AND počet vozidel (V2, V4) je KS THEN prodloužení zelené (V2, V4) je KM
19. IF délka kolony (V1, V3) je KV AND počet vozidel (V2, V4) je KV THEN prodloužení zelené (V2, V4) je KS
20. IF délka kolony (V1, V3) je KV AND počet vozidel (V2, V4) je KVV THEN prodloužení zelené (V2, V4) je KV
21. IF délka kolony (V1, V3) je KVV AND počet vozidel (V2, V4) je N THEN prodloužení zelené (V2, V4) je N
22. IF délka kolony (V1, V3) je KVV AND počet vozidel (V2, V4) je KM THEN prodloužení zelené (V2, V4) je N
23. IF délka kolony (V1, V3) je KVV AND počet vozidel (V2, V4) je KS THEN prodloužení zelené (V2, V4) je N
24. IF délka kolony (V1, V3) je KVV AND počet vozidel (V2, V4) je KV THEN prodloužení zelené (V2, V4) je KM

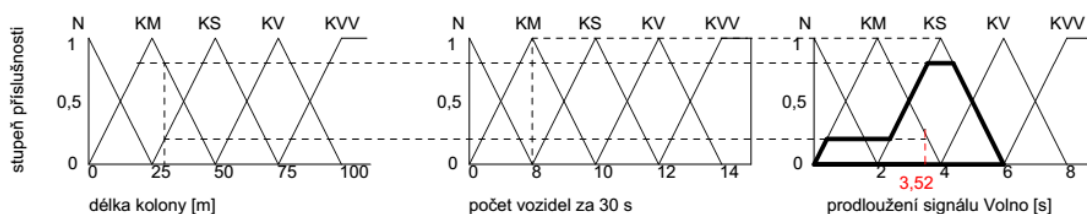
25. IF délka kolony (V1, V3) je KVV AND počet vozidel (V2, V4) je KVV THEN
 prodloužení zelené (V2, V4) je KS

Matrice pravidel je uvedena v tabulce [4]

Počet vozidel (V2, V4)	N	KM	KS	KV	KVV
Kolona (V1, V3)					
N	N	KM	KS	KV	KVV
KM	N	KS	KS	KV	KVV
KS	N	N	KS	KV	KVV
KV	N	N	KM	KS	KV
KVV	N	N	N	KM	KS

Tabulka 4 Matice pravidel pro druhou fázi, zdroj: autor

Na následujícím obrázku [21] je uveden konkrétní příklad této implikace, pokud uvažujeme délku kolony na rameni V1 (rovně a vpravo) + V3 (vlevo) 30 m a na rameni V3 (rovně a vpravo) + V1 (vlevo) 20 m a počet vozidel, která projela křižovatkou na vjezdu V2 (rovně a vpravo) + V4 (vlevo) 8 a na vjezdu V4 (rovně a vpravo) + V2 (vlevo) 6, vyjde nám prodloužení doby signálu Volno ve druhá fázi o 3,52 s. Celková délka tohoto signálu je tedy 34 s.



Obrázek 21 Nalezení výstupní veličiny pomocí Mamdaniho implikace pro druhou fázi, zdroj: autor

6.4. Posouzení metody

Pro návrh vlastního algoritmu jsem si vybrala fuzzy algoritmus, který je popsán výše. Samotné řízení funguje na principu dynamického řízení uzlu a fuzzy logika je použita při rozhodování, zda a o kolik se prodlouží signál Volno pro danou fázi.

Hlavní výhodou tohoto způsobu řízení je, že pracuje s větším množstvím dopravních charakteristik, a je tedy schopen se přizpůsobit lépe provozu a aktuálním podmínkám.

Velkou roli tedy hraje, jaká dopravní data máme k dispozici. Ve výše popsaném algoritmu pracuji s délkou kolony v jedné fázi a počtem vozidel, která projela křižovatkou v opačné fázi. Tento způsob jsem zvolila, protože jsem chtěla, aby algoritmus pracoval v danou chvíli s daty z každého ramene křižovatky. Data získáme pomocí dopravních detektorů, v tomto konkrétním případě se jedná o videodetekci, kterou jsem zvolila nejen kvůli vzrůstajícímu rozvoji a klesající ceně této technologie, ale i kvůli jejímu možnému dalšímu využití, jako je monitorování vozidel, která projela na červenou.

Tento způsob sběru a použití dat sebou ovšem nese určité nevýhody, jakými jsou nepřesnost videodetekce a velké nároky na řadič, který musí v jedné chvíli vyhodnocovat velké množství dat a podle toho se rozhodovat, zda prodlouží dobu signálu Volno nebo nikoliv.

Kvůli výše popsaným důvodům se data pro tento algoritmus většinou získávají pomocí elektromagnetických detektorů, kdy jeden detektor je umístěn za stopčárou a počítá stejně jako ve výše popsaném algoritmu počet vozidel, která projela křižovatkou a druhý v určité vzdálenosti od stopčáry zjišťuje délku kolony na tomtéž rameni křižovatky. Pro zjištění délky kolony se může stejně jako v navrženém algoritmu použít rozdíl počtu vozidel, která opustila křižovátku a vozidel, která na křižovátku přijela a byla detektorem zaznamenána.

Další podstatnou složkou fuzzy algoritmu je báze znalostí, ve které jsou uchovány logické podmínky pro řízení. Tyto podmínky nahrazují myšlení expertů, a proto je důležité, aby byly správně navrženy. Velkou výhodou toho řízení je, že pokud jsou podmínky dobře a funkčně navrženy, je možné je použít i pro další křižovatky.

Další výhodou tohoto způsobu řízení je relativně jednoduchá možnost modifikace algoritmu. Pokud zjistíme, že algoritmus nevyhovuje našim požadavkům, jak kvůli špatnému návrhu, tak kvůli změně dopravních podmínek, není potřeba jej celý předělávat. Stačí změnit funkci příslušnosti, a tím zařazení určitých hodnot do fuzzy množin. Pokud se nám například zdá, že se signál Volno prodlužuje nedostatečně a kolona zůstává příliš dlouhá, můžeme

pouze pozměnit funkci příslušnosti tak, aby se délka kolony, která byla vyhodnocena jako malá vyhodnocovala jako střední, střední jako velká atd. a tím změním výstupní hodnoty algoritmu.

Ačkoliv jsem zde vyjmenovala řadu výhod a podle článků, které jsou zmíněny v kapitole 4.4.1, se ve většině případů při řízení uzlu pomocí tohoto algoritmu zmenšily čekací doby i počet zastavených vozidel, má tento způsob řízení i určitá úskalí.

Dle dostupných zdrojů je tento způsob řízení vhodný obzvláště pro izolované uzly. Nicméně křižovatky, které kapacitou nedostačují, a kde vznikají nejčastěji kongesce, se obvykle nacházejí ve městě a je potřeba brát v potaz koordinaci křižovatek. Je logické, že pokud bude část uzlů dané oblasti řízena pomocí fuzzy algoritmu a část pomocí pevného signálního plánu, nebude tento způsob řízení dosahovat tak dobrých výsledků.

Další nevýhodou jsou samozřejmě finanční náklady. Ačkoliv se jedná o relativně jednoduchý algoritmus, je potřeba investovat nejen do technologií, jako jsou například vhodné dopravní detektory, ale i do odborníků, kteří musí umět s daným algoritmem pracovat a správně jej navrhnou.

Určitě si myslím, že je tento algoritmus vhodné dále sledovat a rozvíjet. Jak zmiňuji v práci, je vhodný ke kombinaci s dalšími algoritmy a může tak dosahovat ještě lepších výsledků. Nicméně pro případnou reálnou aplikaci je třeba vybrat vhodnou křižovatku. Pokud by se toto podařilo, mělo by to velmi dobrý vliv nejen na životní prostředí a psychickou stránku účastníků provozu, ale i na další rozvoj tohoto algoritmu.

7. Závěr

Vzhledem ke stále rostoucímu stupni motorizace a rozvoji měst je problém s řízením dopravy velice aktuální. Je nutné využívat stávající infrastrukturu co nejlépe a nejefektivněji a vyhnout se tak budování rozsáhlých pozemních komunikací a křižovatek. Jednou z možností zvyšování propustností křižovatek a tím i celé komunikace je právě řízení uzlu.

Přestože se s řízenou křižovatkou setkáváme již po řadu let, efektivita řízení se stále zlepšuje. Z této práce vyplývá, že není nutné zvyšovat kapacitu křižovátky pouze málo efektivním a za to pro řidiče i chodce nepříjemným a nebezpečným prodlužováním cyklu, ale lze tohoto efektu dosáhnout i správným algoritmem pro řízení.

Hlavní náplní této práce bylo nalezení, sepsání a vysvětlení algoritmů, které lze použít pro řízení uzlu. Jedná se jak o známé statické řízení a algoritmy dynamického řízení, jako je prodlužování signálu Volno nebo například vkládání fáze na výzvu pro preferenci MHD, tak o méně známe algoritmy, které jsou řazeny k vyšším algoritmům řízení. Články, které byly k těmto algoritmům nalezeny, jsou k dispozici v elektronické podobě na ústavu dopravní telematiky (K620) FD ČVUT v Praze.

Mezi tyto algoritmy jsem zařadila fuzzy řízení, genetický algoritmus, neuronové sítě, agentní a multiagentní systémy a petriho sítě.

Všechny tyto algoritmy se jeví jako vhodné pro řízení dopravy buď samostatně, nebo v kombinaci. Jdou dále rozvíjeny a probíhá řada simulací, které dokazují jejich účinnost. Nicméně se tato práce věnovala hlavně řízení izolované křižovátky a není zde zahrnut velmi důležitý aspekt řízení dopravy ve městě a tím je koordinace dopravy.

Bohužel tyto algoritmy se zatím dočkaly jen mála reálných aplikací, což značně zpomaluje jejich vývoj. Tyto technologicky náročnější systémy mají svá negativa, jako jsou vyšší náklady nebo vyšší paměťové nároky, ale také nesporná pozitiva. Věřím, že větší informovanost o těchto možnostech řízení může napomoci k jejich reálné aplikaci a zlepšení dopravní situace.

Efektivní řízení křižovátky se neprojevuje jen na snížení čekací doby nebo délky kolony, ale projevuje se i na zlepšení životního prostředí vlivem menšího zastavování a následného rozjíždění vozidel nebo větší bezpečnosti všech účastníků provozu, což má pozitivní vliv na celou společnost.

Na závěr práce byl navržen algoritmus pro řízení křižovatky na principu fuzzy řízení. Tento algoritmus využívá data z dopravních detektorů a dle informací a délce kolony a počtu vozidel, která projela přes křižovatku, je rozhodnuto o prodlužování doby signálu Volno.

8. Zdroje

[1] Příbyl Pavel, Mach Radim. Řídicí systémy silniční dopravy. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2003. 212 s. ISBN 80-01-02811-9.

[2] Pithardt, Josef Karel. Dopravní signalizace v Praze. Praha: NADAS, 1976. 75 s.

[3] Předpis č. 361/2000 Sb. Zákon o provozu na pozemních komunikacích a o změnách některých zákonů [online]. [cit. 10. 4. 2015]. Dostupné z: <http://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-361>

[4] Smělý Martin. Dopravní inženýrství. Modul 4. Řízené úrovňové křižovatky [online]. [cit. 10. 4. 2015]. Dostupné z: [http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/CM04-Dopravn%C3%AD%20in%C5%BEen%C3%BDrstv%C3%AD%20\(DST\)/M04-%C5%98%C3%ADzen%C3%A9%20%C3%BArov%C5%88ov%C3%A9%20k%C5%99i%C5%BEovaty%20l.pdf](http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/CM04-Dopravn%C3%AD%20in%C5%BEen%C3%BDrstv%C3%AD%20(DST)/M04-%C5%98%C3%ADzen%C3%A9%20%C3%BArov%C5%88ov%C3%A9%20k%C5%99i%C5%BEovaty%20l.pdf)

[5] Traffic Engineering and Operations Office. Traffic Signals [online]. [cit. 16. 5. 2015]. Dostupné z: <http://www.dot.state.fl.us/trafficoperations/FAQs/TrafSignalFAQ.shtm>

[6] Uncontrolled Intersection. Right-of-Way Rules [online]. [cit. 10.9.2015] . Dostupné z: <http://www.epermittest.com/drivers-education/uncontrolled-intersection>

[7] Automated Red-light Camera Program, Memphis [online]. [cit. 17.9.2015] . Dostupné z: <http://www.memphistn.gov/portals/0/html/WebsiteContentMemphis2009.html>

[8] Road junctions [online]. [cit. 19. 5. 2015]. Dostupné z: <https://www.gov.uk/using-the-road-159-to-203/road-junctions-170-to-183>

[9] Office of International programs. Chapter Three - Design, Operation, and Maintenance of Traffic Control Devices [online]. [cit. 21. 8. 2015]. Dostupné z: <http://international.fhwa.dot.gov/pubs/pl03020/chp03.cfm>

[10] Pokorný Petr. Sdílené prostory- síla v jednoduchosti [online]. [cit. 9. 4. 2015]. Dostupné z: <http://www.dot.state.fl.us/trafficoperations/FAQs/TrafSignalFAQ.shtm>

[11] Ministerstvo dopravy ČR. Slovník dopravní terminologie [online]. [cit. 20. 8. 2015]. Dostupné z: <http://www.slovníkdopravy.cz/>

[12] Technický list výrobku č. RS18, Návěstidlo světelného signalizačního zařízení [online]. [cit. 22. 8. 2015]. Dostupné z: http://www.pjpk.cz/metodikaZDZ_1/metodika%202013/RS%2018%20rev1.pdf

- [13] ČSN 73 6102 Projektování křižovatek na pozemních komunikacích. Praha: Český normalizační institut, 2007. 180 s.
- [14] Navrhování světelných signalizačních zařízení pro řízení silničního provozu. Brno: Centrum dopravního výzkumu, 1996. 124 s. ISBN 80-902141-2-6.
- [15] Manual on Uniform Traffic Control Devices. Chapter 4C. Traffic Control Signal Needs Studies. [online]. [cit. 1. 6. 2015]. Dostupné z: <http://mutcd.fhwa.dot.gov/htm/2009/part4/part4c.htm>
- [16] <http://www.stvo.de/strassenverkehrsordnung/117-37-wechsellichtzeichen-dauerlichtzeichen-und-gruenpfeil>
- [17] Transport research laboratory 1996. Overseas road note 13. [online]. [cit. 20.9.2015] Dostupné z: <http://www.researchgate.net/publictopics>.
- [18] STN 73 6102 – Projektovanie križovatiek pozemných komunikácií, kap. 6.18 Svetelné signalizačné zariadenie
- [19] Kryteria stosowania sygnalizacji świetlnej [online]. [cit. 26.10.2015]. Dostupné z: <http://www.scribd.com/doc/13570152/Michal-Stanek-Inteligentne-Systemy-w-Zarz%C4%85dzaniu-Ruchem-Drogowym#scribd>
- [20] Vzdělávací modul FAST 11- Dopravní inženýrství. Kapitola III. ITS (Inteligentní dopravní systémy) [online]. [cit. 12. 7. 2015]. Dostupné z: <http://projekt150.ha-vel.cz/node/93>
- [21] Systémy pro silniční dopravu. Dopravní detektory [online]. [cit. 16.9.2015]. Dostupné z: <https://www.azd.cz/admin/files/Dokumenty/pdf/Produkty/Silnicni/Dopravni-detektory.pdf>
- [22] Mikroprocesorové řadiče pro moderní řízení silniční dopravy [online]. [cit. 19. 8. 2015]. Dostupné z: http://automa.cz/index.php?id_document=39337
- [23] ČSN 36 5601 Světelné signalizační zařízení. Technické a funkční požadavky. Část 1. Praha: Český normalizační institut, 1996. 36 s.
- [24] Černá Ivana. Městská dopravní ústředna- mozek řízení městského provozu [online]. [cit. 20. 8. 2015]. Dostupné z: <http://automa.cz/res/pdf/44834.pdf>
- [25] Dopravní informační centra. Technická podmínky [online]. [cit. 18. 8. 2015]. Dostupné z: <http://www.pjpk.cz/TP%20172.pdf>
- [26] Institute of Transportation Engineers [online]. [cit. 27.9.2015] . Dostupné z: <http://www.ite.org/standards/atc/index.asp>

- [27] ITE Advanced Transportation Controller (ATC) Family of Standards [online]. [cit. 25.9.2015]. Dostupné z: <https://www.standards.its.dot.gov/Factsheets/Factsheet/14>
- [28] Open Communication Interface for Road Traffic Control Systems [online]. [cit. 22. 8. 2015]. Dostupné z: <http://ocit.org/schnittstellenE.htm>
- [29] Příbyl Pavel, Svítek Miroslav. Inteligentní dopravní systémy. Praha: BEN, 2001. 543 s. ISBN 80-7300-029-6.
- [30] Cabrera Luis I. Garcia. A methodology to design traffic signal controllers based on fuzzy logic. 1999. University of Puerto Rico
- [31] Slovník pojmů Group [online]. [cit. 19.9.2015] Dostupné z: <http://preference.prazsketramvaje.cz/showpage.php?name=slovnicek>
- [32] Zajíčková Lenka. Fuzzy logika pro řízení světelné signalizace křižovatky. Proceedings of the StatGis Conference 2013. Olomouc: Univerzita Palacého, 2013. 171 s. ISBN 978-80-244-3879-5
- [33] Koukol Milan: Přehled současných vědeckých a aplikačních výsledků v řízení světelné signalizace pomocí fuzzy logiky. Výzkumná zpráva [online]. [cit. 17. 5. 2015]. Dostupné z: <http://library.utia.cas.cz/separaty/2014/AS/prikryl-0439926.pdf>
- [34] Jura Pavel. Fuzzy logika v modelování a řízení dynamických systémů. Současný stav, perspektivy a výuka [online]. [cit. 9. 5. 2015]. Dostupné z: <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/80-214-3019-2.pdf>
- [35] Chiu Stephen, Chand S. Adaptive traffic signal control using fuzzy logic [online]. [cit. 11. 4. 2015]. Dostupné z: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=327593&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D327593
- [36] Zhang W.-b., Wu B.-z., Liu W.-j. Anti-Congestion Fuzzy Algorithm for Traffic Control of a Class of Traffic Networks [online]. [cit. 15. 4. 2015]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4403080&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F4403044%2F4403045%2F04403080.pdf%3Farnumber%3D4403080>
- [37] Wen K., Yang W., Qu S. A stochastic adaptive traffic signal control model based on fuzzy reinforcement learning [online]. [cit. 2. 5. 2015]. Dostupné z:

http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5451248&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D5451248

[38] Přecechtěl Roman. Optimalizace řízení aktivního síťového prvku. Brno, 2009. [online]. [cit. 21. 4. 2015]. Dostupné z:

https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=15871. Bakalářská práce. VÚT v Brně.

[39] Zatyková Jarmila. Adaptivní neuronové sítě. Použití v dopravě [online]. [cit. 13. 5. 2015].

Dostupné z: <http://k612.fd.cvut.cz/vyuka/its/prace/ITS%202012%20-%20Jarmila%20Zatykov%C3%A9%20-%20Adaptivn%C3%AD%20neuronov%C3%A9%20s%C3%ADt%5B011b%5D%20v%20doprav%5B011b%5D.pdf>

%20Jarmila%20Zatykov%C3%A9%20-%20Adaptivn%C3%AD%20neuronov%C3%A9%20s%C3%ADt%5B011b%5D%20v%20doprav%5B011b%5D.pdf

[40] Volná Eva. Evoluční algoritmy a neuronové sítě [online]. [cit. 3. 5. 2015]. Dostupné z:

http://www1.osu.cz/~volna/Evolucni_algoritmy_a_neuronove_site.pdf

[41] Volná Eva. Neuronové sítě 1[online]. [cit. 3. 5. 2015]. Dostupné z:

http://www1.osu.cz/~volna/Neuronove_site_skripta.pdf

[42] Gilmore J.F., Khalid J.E. Traffic Management Applications of Neural Networks [online].

[cit. 2. 6. 2015]. Dostupné z: <https://www.aaai.org/Papers/Workshops/1993/WS-93-04/WS93-04-012.pdf>

[43] Dougherty M.S., Cobbett M.R. Short- term inter-urban traffic forecasts using neural networks [online]. [cit. 9. 6. 2015]. Dostupné z:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169207096006978>

[44] Bingham Ella. Reinforcement learning in neurofuzzy traffic signal control[online]. [cit. 9.

6. 2015]. Dostupné z: <http://users.ics.aalto.fi/ella/publications/ejor.pdf>

[45] Neruda Roman, Pilát Martin. Multiagentní systémy [online]. [cit. 22. 6. 2015]. Dostupné

z: <http://ktiml.mff.cuni.cz/~neruda/mas-14.pdf>

[46] Hirankitti, V.; Krohkaew, J.; Hogger, C. A Multi-Agent Approach for

Intelligent Traffic-Light Control. [online]. [cit. 29. 7. 2015]. Dostupné z:

http://www.iaeng.org/publication/WCE2007/WCE2007_pp116-121.pdf

[47] Roozmond, D. A.; Roogier, J. L. H. Agent controlled traffic lights [online]. [cit. 9. 6.

2015]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.5.2178>

- [48] Štunc Pavel. Genetické algoritmy a jejich praktické využití [online]. [cit. 17. 6. 2015]. Dostupné z: http://nlp.fi.muni.cz/uui/referaty2012/pavel_stunc/referat.pdf
- [49] Volná Eva. Evoluční algoritmy a neuronové sítě [online]. [cit. 3. 5. 2015]. Dostupné z: http://www1.osu.cz/~volna/Evolucni_algoritmy_a_neuronove_site.pdf
- [50] Staněk Michal, Kwasnicka Halina. Genetic Approach to Optimize Traffic Flow by Timing Plan Manipulation [online]. [cit. 7. 6. 2015]. Dostupné z: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4021830&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D4021830
- [51] Chiou Yu- CHiun, Lan Lawrence W. Adaptive traffic signal control with iterative genetic fuzzy logic controller (GFLC) [online]. [cit. 28. 5. 2015]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/222976833_Genetic_fuzzy_logic_controller_An_iterative_evolution_algorithm_with_new_encoding_method
- [52] Kochaničková Monika. Petriho sítě [online]. [cit. 17. 5. 2015]. Dostupné z: http://phoenix.inf.upol.cz/esf/ucebni/petriho_site.pdf.renamed
- [53] Turek Michal. Příspěvek o možném využívání P/T Petriho sítí při navrhování světelného řízení křižovatek [online]. [cit. 11. 4. 2015]. Dostupné z: http://pernerscontacts.upce.cz/19_2010/Turek_M.pdf
- [54] Veselý Jaroslav. Informační systémy pro podporu rozhodování v dopravě. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2005. 263 s. ISBN 80-01-03246-9.

Seznam obrázků

Obrázek 1- Architektura OCIT [28]	21
Obrázek 2- Základní způsoby řízení uzlu [14]	22
Obrázek 3- Umístění detektoru při částečně a plně dynamickém řízení [30]	25
Obrázek 4- Velikost časové mezery a umístění detektoru [13].....	26
Obrázek 5- Funkce příslušnosti [34].....	30
Obrázek 6- Schéma fuzzy řízení [30].....	31
Obrázek 7- Porovnání doby zdržení a počtu zastavení [35].....	32
Obrázek 8- Porovnání délky fronty [37]	33
Obrázek 9- Schéma neuronu [39].....	34
Obrázek 10- Architektura neuronové sítě [40]	35
Obrázek 11- Princip křížení u genetického algoritmu [40]	41
Obrázek 12- Schéma řízení pomocí mikrosimulace a genetického algoritmu [50]	42
Obrázek 13- Příklad změny stavu v Petriho síti [53].....	43
Obrázek 14 Schéma křižovatky, zdroj: autor	49
Obrázek 15 Schéma fází, zdroj: autor.....	50
Obrázek 16 Fuzzifikace délky kolony pro signální skupinu V2, V4, zdroj: autor	52
Obrázek 17 Fuzzifikace počtu vozidel pro signální skupiny V1, V3, která projela křižovatkou, zdroj: autor.....	53
Obrázek 18 Nalezení výstupní veličiny pomocí Mamdaniho implikace pro první fázi, zdroj: autor.....	56
Obrázek 19 Fuzzifikace délky kolony pro signální skupinu V1, V3, zdroj: autor	56
Obrázek 20 Fuzzifikace počtu vozidel pro signální skupiny V2, V4, která projela křižovatkou, zdroj: autor.....	57
Obrázek 21 Nalezení výstupní veličiny pomocí Mamdaniho implikace pro druhou fázi, zdroj: autor.....	59

Seznam tabulek

Tabulka 1- Minimální doby signálu volno.....	18
Tabulka 2 Zkratky používané pro fuzzy množiny, zdroj: autor	51
Tabulka 3 Matice pravidel pro první fázi, zdroj: autor	55
Tabulka 4 Matice pravidel pro druhou fázi, zdroj: autor.....	59

Seznam příloh

1 Křižovatka v měříku 1:500