

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Jan Crha

**ŘÍZENÍ SVĚTELNÝCH KŘIŽOVATEK S PODPOROU
SÍTĚ INTERNET OF THINGS**

Diplomová práce

2018

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

d ě k a n

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



K617 Ústav logistiky a managementu dopravy

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Ing. Bc. Jan Crha

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

N 3710 – LA – Logistika a řízení dopravních procesů

Název tématu (česky): **Řízení světelných křižovatek s podporou sítě
Internet of Things**

Název tématu (anglicky): The Proceeding of Traffic Light Crossroads with Internet of
Things Support

Zásady pro vypracování

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

- Teorie hromadné obsluhy - Markovův řetězec a proces
- Telekomunikační síť s podporou Internet of Things
- Model křižovatky s optimálně nastavenou signalizací dle hustoty provozu
- Model křižovatek vzájemně propojených přes telekomunikační síť Internet of Things, v níž křižovatky výměnou dat mezi sebou komunikují a řídí provoz
- Zabezpečení telekomunikační sítě na provoz křižovatek
- Ekonomická analýza řízení světelných křižovatek s podporou sítě Internet of Things



- Rozsah grafických prací: dle charakteru diplomové práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: LUKÁŠ, L. Pravděpodobnostní modely v managementu. Academia, 2009
ZELINKA, T. Telekomunikační řešení pro informační systémy síťových odvětví. Grada, 2009
UCKELMANN, D. Architecting The Internet of Things. Bremen, 2011
- Vedoucí diplomové práce: **Ing. Mgr. Václav Baroch, Ph.D.**

Datum zadání diplomové práce: **30. června 2017**
(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 diplomové práce: **29. května 2018**
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. Lukáš Týfa, Ph.D.
vedoucí
Ústavu logistiky a managementu dopravy




.....
prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek, dr. h. c.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.


.....
Ing. Bc. Jan Crha
jméno a podpis studenta

V Praze dne30. června 2017

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi poskytli podklady na vypracování této práce. Zvláště pak děkuji panu Ing. Mgr. Václavu Barochovi, Ph.D. za odborné vedení a konzultování diplomové práce a za rady, které mi poskytoval po celou dobu mého studia a dále bych chtěl vřele poděkovat personálu knihovny ČVUT v Děčíně a Severočeské vědecké knihovny za umožnění přístupu k mnoha důležitým informacím a materiálům. V neposlední řadě je mou milou povinností poděkovat svým rodičům a blízkým za morální a materiální podporu, které se mi dostalo po celou dobu studia.

Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při 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 související s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 25. 5. 2018

.....

podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

ŘÍZENÍ SVĚTELNÝCH KŘIŽOVATEK S PODPOROU
SÍTĚ INTERNET OF THINGS

diplomová práce

květen 2018

Jan Crha

ABSTRAKT

Předmětem diplomové práce „Řízení světelných křižovatek s podporou sítě Internet of Things“ je řešení řízení světelných křižovatek a jejich optimalizace s fuzzy regulátorem a internetu věcí podle intenzity dopravního proudu. Cílem diplomové práce je vytvoření modelu světelné křižovatky propojené v síti internetu věcí. Zaměřil jsem se na řízení křižovatek dle fuzzy řadiče a na modely inteligentních křižovatek IoT.

Zvolený problém jsem řešil na čtyřramenné křižovatce podle teorie hromadné obsluhy, pomocí intenzit, Markovského rozhodovacího procesu a s teorií toku v síti.

ABSTRACT

The subject of the diploma thesis „The Proceeding of Traffic Light Crossroads with Internet of Things Support“ is the solution of light intersection control and their optimization with fuzzy controller and the Internet of Things according to the intensity of the traffic flow. The aim of this diploma thesis is to create a light crossing model interconnected in the Internet of Things Network. I focused on the control of junctions according to fuzzy controller and IoT intelligent crossroads.

I have solved the problem in a four-armed intersection according to the theory of mass operation, using the intensities, the Markov decision process and the network flow theory.

Klíčová slova

Fuzzy logika, internet věcí, IoT, Markovův řetězec, stochastický proces, telematika

Keywords

Fuzzy Logic, Internet of Things, IoT, Markov's chain, Stochastic Process, Telematics

Obsah

Obsah.....	6
1 Úvod.....	11
2 Teorie hromadné obsluhy – Markovův řetězec a proces, telematika, fuzzy logika.....	14
2.1 Stochastický proces.....	14
2.1.1 Bodový proces, typy procesů.....	14
2.1.2 Stochastické procesy.....	15
2.1.3 Poissonův proces.....	16
2.1.4 Markovovy řetězce a rozhodovací procesy.....	18
2.2 Teorie hromadné obsluhy.....	19
2.2.1 Popis systémů hromadné obsluhy.....	19
2.3 Telematika a inteligentní dopravní systémy.....	21
2.3.1 Telematika.....	22
2.3.2 Dopravní proud.....	22
2.3.3 Detektory silničních vozidel.....	23
2.4 Fuzzy logika.....	25
2.4.1 Pojem fuzzy logiky.....	25
2.4.2 Fuzzy systém.....	26
2.4.3 Jazyková aproximace.....	27
2.4.4 Fuzzy logika v dopravním inženýrství.....	29
2.4.5 Příklad izolované křižovatky řízené řadičem fuzzy logiky.....	30
2.4.6 Inteligentní SSZ pod kontrolou fuzzy logiky.....	34
2.5. Závěr kapitoly teorie hromadné obsluhy, telematiky a fuzzy logiky.....	37
3 Telekomunikační sítě s podporou Internet of Things.....	39
3.1 Internet věcí – Internet of Things, IoT.....	39
3.1.1 Pojem a úvod do internetu věcí.....	39
3.1.2 Nástroje pro přístup ke koncovému uživateli v internetu věcí.....	43
3.1.3 Autonomní kooperace logistických procesů.....	44
3.1.4 Ukládání dat – Clustering.....	45
3.1.5 Protokoly.....	48
3.2 Propojení světelných křižovatek v telekomunikační síti internetu věcí.....	49
3.2.1 Propojení světelných signalizačních zařízení na křižovatce.....	49
3.2.2 Řízení provozu s Internet of Things.....	50
3.2.3 Inteligentní řízení dopravy založené na IoT.....	54

3.2.4	Řízení křižovatek podle na Kernerových tří fází teorie dopravy	56
3.3	Internet věcí a zlepšení životního prostředí v dopravě.....	61
3.3.1	Řízení světelných křižovatek s podporou IoT sníží CO ₂ emise	61
3.3.2	Dohled nad emisemi s podporou IoT a řízením světelných křižovatek.....	63
3.4	Přehled o internetu věcí a přístupová řešení	64
3.4.1.	Představení a význam IoT.....	64
3.4.2	IoT komunikační model	65
3.4.3	Interoperabilita IoT	67
3.4.4	Telekomunikační systémy	68
3.5	Závěr kapitoly telekomunikační sítě s podporou internetu věcí.....	69
4	Model křižovatky s optimálně nastavenou signalizací dle hustoty provozu.....	70
4.1	Model křižovatky a hustota provozu	70
4.1.1	Deterministický, makroskopický model.....	70
4.2	Optimalizační úlohy pro dopravní proud v křižovatce.....	81
4.2.1	Optimalizace řízení křižovatky podle kapacity na výstupu z křižovatky.....	81
4.2.2	Aplikace teorie hromadné obsluhy na řízení světelné křižovatky	82
4.2.3	Optimalizace řízení světelné křižovatky s fuzzy řadičem	96
4.2.4	Řízení světelné křižovatky podle Markovova rozhodovacího procesu	97
4.3	Závěr kapitoly modelu křižovatky s optimálně nastavenou signalizací.....	102
5	Model křižovatek vzájemně propojených přes telekomunikační síť Internet of Things, v níž křižovatky výměnou dat mezi sebou komunikují a řídí provoz	103
5.1	Model křižovatek v síti IoT.....	103
5.1.1	Úvod do architektury sítě IoT.....	103
5.1.2	Systém propojení dvou křižovatek a vzájemná synchronizace	105
5.1.3	Architektura propojených křižovatek v síti internetu věcí	108
5.1.4	Maximální dopravní tok v síti křižovatek	111
5.2	Závěr kapitoly modelu vzájemně propojených křižovatek	112
6	Zabezpečení telekomunikační sítě na provoz křižovatek	113
6.1	Zabezpečení internetu věcí	113
6.1.1	Osvědčené postupy zabezpečení internetu věcí	113
6.1.2	Hrozby internetu věcí	115
6.1.3	Zabezpečená IoT platforma.....	116
6.2	Zabezpečení sítě křižovatek s podporou IoT	118
6.2.1	Zabezpečení navrhované sítě	118
6.3	Závěr kapitoly zabezpečení telekomunikační sítě na provoz křižovatek	120
7	Ekonomická analýza řízení světelných křižovatek s podporou sítě Internet of Things.	121

7.1	Analýza přínosů řízení světelných křižovatek s IoT	121
7.1.1	Přínosy pro snížení emisí	121
7.1.2	Přínosy pro snížení onemocnění vlivem kratších čekacích dob	124
7.1.3	Přínosy pro snížení hluku, vibrací a zkrácení časů jízd	125
7.1.4	Přínosy pro snížení dopravní nehodovosti na křižovatkách	126
7.2	Analýza nákladů řízení světelných křižovatek s IoT	128
7.2.1	Nákladovost projektu na vybavení a konfiguraci systému	128
7.2.2	Rozdělení nákladů	133
7.2.3	Průběh nákladů v čase 10 let	135
7.3	Analýza nákladů a přínosů	137
7.3.2	Analýza nákladů a přínosů vzájemně propojených křižovatek v síti IoT	138
7.4	Hodnocení ekonomické efektivity modelu na řízení křižovatek	139
7.5	Závěr kapitoly ekonomické analýzy řízení světelných křižovatek s podporou sítě internetu věcí	142
8	Závěr	143
	Literatura	147
	Seznam obrázků	153
	Seznam tabulek	156

Seznam použitých zkratk

Atd.	a tak dále
ASE	asymetrické šifrování
C(k)	nákladová funkce
ČR	Česká republika
DDoS	útok na internetovou službu
EU	Evropská unie
FIFO	First In, First Out – první dovnitř, první ven
FLC	Fuzzy Logic Controller
G	graf
HDLC	High Level Data Link Control - protokol
IoT	Internet věcí
IP	Internet Protocol - základní protokol v síťové vrstvě
IPsec	zabezpečený internet protokol
LAN	Local area network – místní síť
max	maximum
M/M/1	system řazení do řad
NFC	Near Field Communication – bezdrátová technologie
P	pravděpodobnost
PIR	Private Information Retrieval - protokol na vyhledávání dat
RFID	Radio Frequency Identification – identifikace na rádiové frekvenci
PPP	Point to Point Protocol - protokol
SHO	system hromadné obsluhy

SSE	symetrické šifrování
SSZ	světelné signalizační zařízení
TCP/UDT	sady protokolů internetu
Tj.	to je
TLS	Transport Layer Security - kryptografický protokol
Tzv.	tak zvaně
VPN	Virtual private network – virtuální soukromá síť
WAN	Wide area network – rozlehlá síť
WSN	Wireless sensor networks – bezdrátová síť senzorů
$X(t)$	náhodná veličina
α	množina α
λ	intenzita vstupu
μ	intenzita výstupu
σ	rozptyl
\in	patří, náleží
∞	nekonečno
Δt	přírůstek času
\leq	větší nebo rovno

1 Úvod

Platforma internetu věcí rozšiřuje možnosti vzájemně propojených věcí a vytváří nové příležitosti pro lidi a podniky. Úvod formuluje vymezení tématu diplomové práce a důvod vybraného tématu. Dále v úvodu navazuje charakteristika současného stavu a následně je uveden cíl diplomové práce, zejména i struktura práce a též v závěru úvodu je uveden přínos této práce.

Diplomová práce se zabývá světelnými křižovatkami, které v navrhovaném modelu jsou součástí telekomunikační sítě. Světelné křižovatky si předávají informace v reálném čase o současném stavu dopravních proudů na jednotlivých křižovatkách. Hlavním účelem je řízení světelných signálů k minimalizaci času vozidel čekajících v řadách před křižovatkou a tím i vlastně zmírnění kongescí.

Sestavená telekomunikační síť dovoluje vzájemnou komunikaci mezi světelnými křižovatkami. Tato infrastruktura křižovatek a senzorů umožňuje sbírat informace o dopravním proudu v jízdnicích pružích. Na základě změřeného počtu vozidel, rychlosti vozidel, ujeté dráze a době jízdy je vyhodnocen současný dopravní stav pro řízení provozu na křižovatce.

S ohledem na délky silničních úseků mezi křižovatkami, křižovatka nastaví podle aktuální dopravní situace délku světelných signálů. Tímto způsobem křižovatka reguluje počty projetých vozidel s ohledem na situaci za křižovatkou. Takovýmto regulačním způsobem se předejde tomu, aby křižovatka v prvním sledu s nastavenými intervalovými světelnými signály nezpůsobovala přetížení silničního provozu i na následné druhé křižovatce, kde je vytvořena kongesce v důsledku přetížení komunikace početnými dopravními prostředky.

Důvodem k výběru tématu je zájem o komunikační technologie a i o internet věcí, který posouvá schopnosti komunikace nejen mezi lidmi, ale i mezi věcmi, které jsou schopny přinést užitek nejen na konkrétní událost, nýbrž i pro veřejnost, pokud je k tomu architektura sítě věcí a internetu naplánovaná.

Myšlenka na téma diplomové práce řízení provozu světelných křižovatek s podporou sítě internetu věcí vznikla ve spojitosti z představení nových technologií komunikujících mezi sebou, síťové architektury internetu věcí a inspirací převést tuto technologii na dopravní infrastrukturu, jakým je inteligentní řízení dopravy podle hustoty dopravního proudu.

Současnou charakteristikou stavu řízení provozu na světelných křižovatkách je aplikování přednastavených pevných intervalů na světelné signalizaci, které pak nejsou schopny adekvátně řídit dopravu pro účinek minimalizaci čekacích dob před křižovatkou. S nárůstem

počtu motorových vozidel na komunikacích vzrůstá intenzita dopravy a následně dopravní situace si vyžaduje efektivnější řízení provozu na světelných křižovatkách. V odborné literatuře jsou uvedeny modely na řízení křižovatky pomocí fuzzy logiky. Také jsou na technických univerzitách z různých částí světa uvedeny návrhy na řízení křižovatky podle technologie internetu věcí, založeného například na technologii RFID.

Cílem práce je vytvoření modelu na řízení provozu několika křižovatek, které jsou propojeny komunikační sítí. Na navrhovaných křižovatkách jsou senzory pro sběr dopravních dat, tyto data jsou nadále vyhodnocovány. Na základě těchto dat je řízen provoz s ohledem na minimalizaci čekacích dob vozidel čekajících v řadách před křižovatkou. Pomocí komunikační technologie internetu věcí, křižovatky spolu vzájemně komunikují a vyhodnocují dopravní situaci pomocí hodnotících algoritmů.

Použité metody k dosažení cíle práce je použití teorie hromadné obsluhy, Markovova rozhodovacího procesu, fuzzy logiky, architektury sítě IoT k propojení senzorů a příslušného komunikačního vybavení.

Diplomová práce je strukturovaná podle kapitol, po úvodní kapitole o představení práce následuje druhá kapitola s teoretickou částí o teorii hromadné obsluhy, Markovovým řetězcem, Poissonovým rozdělením, telematikou a fuzzy logikou. V této kapitole jsou uvedeny části, které budou využity pro návrh modelu řízení světelné křižovatky podle hustoty provozu.

Třetí kapitolou je telekomunikační síť internetu věcí, ve které jsou uvedeny teoretické části pro praktické využití k návrhu modelu sítě propojených křižovatek. Také jsou zde uvedeny navrhované modely z různých technických univerzit ohledně provozu s podporou internetu věcí.

Ve čtvrté kapitole je řízení světelné křižovatky s optimálně nastaveným signalizačním zařízením dle hustoty provozu, kapitola se zabývá dopravním proudem a využití předchozích znalostí z teoretické části k optimalizačnímu modelu na řízení provozu světelné křižovatky podle hustoty provozu.

V páté kapitole se pojednává o návrh modelu na komunikační sítě vzájemně propojených křižovatek s podporou internetu věcí.

V šesté kapitole se pojednává o zásadách zabezpečení internetu a o navrženém modelu zabezpečeného internetu věcí v propojené síti křižovatek.

V sedmé kapitole je ekonomická analýza řízení světelných křižovatek s podporou sítě internetu věcí, ve které je uvedena analýza nákladů a přínosů a hodnocení ekonomické efektivnosti modelu řízení křižovatek s podporou IoT.

Poslední kapitolou je závěr, kde se jedná o shrnutí předchozích znalostí.

Práce je určena pro dopravní inženýrství, kdy nové technologie internetu věcí posouvají dále možnosti k dynamičtějšímu řízení křižovatky a také pro širší publikum se zájmem o dynamické stochastické procesy a k tomu odvozené algoritmy.

Přínosem diplomové práce je rozšíření znalostí internetu věcí a fuzzy logice, také o stochastických systémech a Markovském rozhodovacím procesu. Dále o zabezpečení internetu věcí před škodlivými kódy. Přínosy jsou spatřovány v navrženém modelu síti křižovatek, které řídí dopravní proudy a křižovatky v komunikační síti si mezi sebou zasílají informace o zatíženosti dopravních proudů. V závěrečné kapitole jsou uvedeny přínosy a náklady sítě křižovatek s podporou internetu věcí, kdy mezi přínosy patří snížení čekacích dob na červené signalizaci a snížení emisí z motorových vozidel, sníženy doby hluku z motorových vozidel, zkrácení jízdnicích dob a dalším přínosem je snížení zátěže znečištění ovzduší výfukovými plyny a tím i snížení úmrtí a chorob ve společnosti, které vyplývají ze zhoršeného životního prostředí vlivem prašnosti, emisí a hluku z dopravy. Přínosy a náklady jsou v závěrečné kapitole uvedeny v analýze nákladů a přínosů.

2 Teorie hromadné obsluhy – Markovův řetězec a proces, telematika, fuzzy logika

2.1 Stochastický proces

Diplomová práce se zabývá v první kapitole bodovým procesem a stochastickými procesy, Poissonovým procesem a Markovovým řetězcem, kdy tato teoretická část bude využita v praktické části k řešení optimálního průjezdu křižovatkou dle hustoty dopravního provozu.

2.1.1 Bodový proces, typy procesů

Představme si posloupnost nějakého jevu, který nastává náhodně v čase, například vozidlo jede po silnici a přijíždí ke křižovatce. Jedním typem procesů je bodový proces, kde sledujeme chod určitého procesu, v němž čas od času dochází k význačné události od počátku (s) v čase (t). Podle času význačné události, jsou buď posloupnosti časových okamžiků t_1, t_2, \dots, t_n , nebo posloupnosti intervalů $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$. Registrujeme počet událostí $N(t)$ v průběhu časového intervalu $\langle 0, t \rangle$.

Počet událostí $N(s, t)$ během časového intervalu $\langle s, s+t \rangle$:

$$\text{kde } \forall s \geq 0, t \geq 0, \quad \mathbf{N(s,t) = N(s + t) - N(s)} \quad (1)$$

Základní třídění procesů je na:

- **regulární (pravidelný) tok**,
- **proces s nezávislými přírůstky**, který určen posloupností nezávislých náhodných událostí $N(s, t)$ během vzájemně disjunktních časových intervalů $(s, s+t)$. Výskyty jevů E_n jsou v časových intervalech $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ nezávislé náhodné veličiny,
- **regenerativní proces**, interval τ_n je posloupnost nezávislých náhodných veličin,
- **rekurentní proces**, interval τ_n je posloupnost nezávislých náhodných veličin se stejným rozdělením pravděpodobnosti,
- **homogenní proces**, který se v čase nemění, pravděpodobnosti jsou závislé na intervalu (τ) a ne na jeho počátku (s),
- **ordinární proces**, při kterém nenastanou dvě události současně,

(Dohnal, 1997, s. 9,10).

2.1.2 Stochastické procesy

Řízení světelných křižovatek v této práci vychází z teorie stochastických procesů. Stochastické modely jsou založeny na teorii pravděpodobnosti, jejímž hlavním cílem je studium zákonů popisujících náhodu. Základním pojmem je náhodná veličina či jinak řečeno stochastická proměnná, která může nabývat více hodnot a to s každou nějakou pravděpodobností ovlivněnou náhodnými vlivy. Pravděpodobnostní prostor (Ω, A, P) představuje trojici pojmů:

Ω - neprázdná množina, tzv. prostor elementárních jevů,

A - systém vytvořený z podmnožin prostoru elementárních jevů Ω , tzv. pole jevů,

P - normovaná míra definovaná na A , tzv. pravděpodobnostní míra,

(Lukáš, 2009, s. 20).

Axiomatická definice říká, že pravděpodobnost P je nezáporná normovaná σ -aditivní míra na systému jevů A , který je sestaven z prostoru elementárních jevů Ω , a tato míra pravděpodobnosti P splňuje požadavky:

1. Množina pravděpodobnosti $P(\alpha) \geq 0$, pro každý náhodný jev $\alpha \in A$.
2. $P(\Omega) = 1$.
3. Pro soustavu množin $\{\alpha_i\}$, $i = 1, \dots, \infty$, navzájem neslučitelných náhodných jevů, navzájem disjunktních prvků z A platí: $P(\cup_i \{\alpha_i\}) = \sum_i P(\alpha_i)$, pro $i = 1, \dots, \infty$. Množiny jsou navzájem disjunktní, když průnikem je prázdná množina,

(Lukáš, 2009, s. 18).

Stochastický proces, též náhodná funkce je funkce dvou proměnných, jednak času $t \in T$ a jednak elementárního jevu $e \in \Omega$. Definiční obor T nejčastěji chápeme jako časovou množinu. Oborem hodnot je stavový prostor či prostor stavů R .

Typy stochastických procesů podle definičního oboru T a stavového prostoru R mohou obsahovat:

- konečný nebo spočetný počet hodnot, jedná se o diskrétní časy,
- nespočetný počet hodnot, příslušná množina je hustá, pak jde o spojitý čas,

(Lukáš, 2009, s. 19).

Konečná a spočetná množina je množina, ve které lze spočítat prvky přirozenými čísly a konečná je, že existuje největší přirozené číslo. Nespočetná množina má více prvků než množina přirozených čísel. Typy stochastických procesů jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1 - Typy stochastických procesů (Lukáš, 2009, s. 20)

Stavový prostor R	Definiční obor T, část $t \in T$	
	diskrétní	spojitý
diskrétní	(1) diskrétní náhodná veličina	(2) diskrétní náhodný proces
spojitý	(3) spojitá náhodná posloupnost	(4) spojitý náhodný proces

Přirovnání typů stochastických procesů k aplikacím podle tabulky 1, například stavový diskrétní stochastický proces s diskrétním časem (1) se často používá pro model rozhodování v konečně mnoha etapách a s konečným počtem alternativ. Stavově diskrétní stochastický proces se spojitým časem (2) vyjadřuje například **počet** vozidel ve frontě, která čekají na obsluhu v obslužné jednotce. Stavově spojitý stochastický proces s diskrétním časem (3) vyjadřuje **dobu** čekání vozidla ve frontě na obsluhu v obslužné jednotce. Stavově spojitý stochastický proces se spojitým časem (4) může popisovat změnu zásob v čase (Lukáš, 2009, s. 20).

2.1.3 Poissonův proces

Poissonův proces je základní diskrétní stochastický proces, který se používá v matematických modelech systémů hromadné obsluhy. V každém systému hromadné obsluhy se vyskytuje vstup požadavků (vozidel) a obsluha požadavků. Vstup a výstup je ovlivněn náhodnými vlivy a proto vhodným matematickým objektem pro modelování požadavků je diskrétní stochastický proces. Platí S_0 – žádný požadavek (vozidlo), S_1 – jeden požadavek a S_n – n požadavků, elementární jev E_0 – žádný jev, E_1 – jeden jev, E_n – n jevů nebo n-násobná realizace jevu E_1 (Lukáš, 2009, s. 70).

Buď náhodná veličina $X(t)$ diskrétní stochastický proces udává, že v časovém intervalu délky t se systém nachází ve stavu S_n , neboli že během časového intervalu délky t nastal v systému jev E_n (Lukáš, 2009, s. 70).

Poissonův proces se nazývá diskrétní stochastický proces $X(t)$, který udává počet n výskytů požadavku v systému během časového intervalu h $[0, t)$ s pravděpodobností $P \{X(t)=n\} = p_n(t)$, který splňuje vlastnosti:

1. $X(t)$ je ordinární a homogenní stochastický proces,
2. $X(t)$ je stochastický proces s nezávislými přírůstky,

3. Pravděpodobnost $P\{X(h)=1\} = 0(h)$ v časovém intervalu délky h , $h \rightarrow 0$,
4. Počátečním stavem pro $X(t)$ je s jistotou stav S_0 .

Diskrétní stochastický proces $X(t)$ se nazývá ordinárním, když platí:

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{1-p_0(h)-p_1(h)}{h} = 0, \quad (2)$$

(Lukáš, 2009, s. 70).

Počátečním stavem pro $X(t)$ je jistý stav S_0 . tedy $p_0(0) = 1$, a proto platí:

$$1 = \sum_{k=0}^{\infty} p_k(0) \quad (3)$$

(Lukáš, 2009, s. 73).

Poissonův proces vykazuje shodu mezi výběrovou střední hodnotou a výběrovým rozptylem:

$$D(X(t)) = \sigma^2(X(t)) = E((X(t)-E(X(t)))^2) = \lambda t \quad (4)$$

označení σ je směrodatná odchylka či střední kvadratická odchylka diskrétní náhodné veličiny X (Lukáš, 2009, s. 78).

Mají-li počty požadavků, které vstupují během doby t do systému hromadné obsluhy Poissonovo rozdělení, pak mají i doby, chápané jako náhodné veličiny mezi dvěma po sobě následujícími požadavky exponenciální rozdělení, platí to i obráceně. Poissonův proces má exponenciální rozložení doby obsluhy (Lukáš, 2009, s. 80).

Jednotka λ_n je průměrná intenzita příchodů požadavků (zrození) do systému hromadné obsluhy za jednotku času za předpokladu, že v časovém okamžiku t se v systému hromadné obsluhy ve stavu S_n , se nachází právě n požadavků (Lukáš, 2009, s. 81).

Jednotka μ_n je intenzita obslužení (úmrtí) požadavků, počet obslužených požadavků za jednotku času za předpokladu, že v časovém okamžiku t se v systému hromadné obsluhy ve stavu S_n nachází právě n požadavků, a když je systém hromadné obsluhy prázdný, tj. S_0 ($n=0$), je $\mu_0=0$ (Lukáš, 2009, s. 81).

Mezi charakteristiky stochastických procesů patří střední hodnota $X(t)$, která je nenáhodná funkce pro každou hodnotu času $t \in T$ rovna střední hodnotě odpovídajícího průseku $X(t)$ v čase t . Rozptyl, též disperze či variace $X(t)$ je nenáhodná funkce, která je pro každou hodnotu času $t \in T$ rovna rozptylu odpovídajícího průseku $X(t)$ v čase t . Korelační funkce $X(t)$ je nenáhodná funkce dvou proměnných $k(t_1, t_2)$, která pro každou dvojici hodnot $t = t_1$

a $t = t_2$ je rovna kovarianci odpovídajících průseků $X(t_1)$ a $X(t_2)$ v časových okamžicích t_1 a t_2 :

$$k(t_1, t_2) = E ([X(t_1) - E (X(t_1))] [X(t_2) - E (X(t_2))]) \quad (5)$$

(Lukáš, 2009, s. 22).

Problematika Poissonova procesu na příkladu. Necht' vozidla projíždějí silnicí za nějaký časový okamžik $(t; t + \Delta t)$. V časovém intervalu $(t; t + \Delta t)$ nastane událost s pravděpodobností $\lambda \Delta t + o(\Delta t)$ a více jak jedna pravděpodobností $o(\Delta t)$ nezávisle na čase t a na počtu událostí nastalých v intervalu $(0; t)$. Náhodná veličina $X(t)$ je počet výskytu událostí, počet projíždějících vozidel v časovém intervalu $(0; t)$, pak $\{X_t\}_{t \geq 0}$ je spočetný Markovův proces s množinou stavů $S = \{0, 1, 2, \dots\}$ a s počátečním rozdělením $p_0(0) = 1$ a $p_i(0) = 0$ pro stav $i \neq 0$. Poissonův proces představuje příchod zákazníků do nějakého systému obsluhy, příjezd vozidel na čerpací stanici atd.

2.1.4 Markovovy řetězce a rozhodovací procesy

Do speciálního případu stochastických procesů patří Markovské řetězce. Markovovy řetězce patří mezi diskrétní náhodné posloupnosti čili stochastické procesy, které mají diskrétní jak časovou množinu T , tak i stavový prostor R (Lukáš, 2009, s. 27).

Markovův řetězec popisuje obvykle diskrétní náhodný proces, pro který platí, že pravděpodobnosti přechodu S_n do následujícího sousedního stavu S_{n+1} závisí pouze na současném stavu, ne na stavu předchozím (Lukáš, 2009, s. 28).

Homogenní Markovův řetězec znamená, že pravděpodobnost přechodu nezávisí na okamžiku, v němž se přechod uskutečňuje (Lukáš, 2009, s. 29).

Markovovy řetězce se používají pro popis a modelování systémů, které se mohou nacházet v jednom z konečného, eventuálně v jednom z nekonečného, avšak spočetného počtu stavů a to vždy v jednotlivém časovém kroku, kterých celkem může být také konečný anebo nekonečný, avšak spočetný počet. **Markovův řetězec** je diskrétní náhodná posloupnost, u které výskyt stavu v bezprostředně následné budoucnosti dané podmíněnou pravděpodobností závisí jen na stavu, ve kterém se stochastický proces nalézá v současnosti, neboli Markovův řetězec udává budoucnost jen na základě současnosti a nezná minulost. Podmíněná pravděpodobnost udává pravděpodobnost výskytu jevu A za předpokladu, že nastal jev B (Lukáš, 2009, s. 28).

2.2 Teorie hromadné obsluhy

Nadále se diplomová práce zabývá teorií systémů hromadné obsluhy, jako rozšiřující poznatky pro stochastické modely, známé jako modely teorie front.

2.2.1 Popis systémů hromadné obsluhy

Systém hromadné obsluhy je chápán tak, že v systému jsou jistá zařízení, na kterých dochází k obsluze vstupního proudu požadavků (zákazníků) vstupujících v průběhu času do systému. Kapacita obslužných zařízení je v časovém okamžiku omezena, což má za následek, že se požadavky (zákazníci) v systému hromadí. Pak zákazníci čekají ve frontě na uvolnění obslužného zařízení k realizaci svého požadavku, nebo opouští systém bez obslužení (rezignují na obsluhu).

Čekání v systému hromadné obsluhy má různé příčiny, ke vzniku front vede omezená kapacita obslužných zařízení a nároky na obsluhu u vstupujících požadavků jsou větší, a to i v případě, kde je vstupní proud deterministický a fronta roste nade vše meze. Fronta nejčastěji vzniká tak, že požadavky vstupují v nepravidelných intervalech, vstupní proud je stochastický, takže vstupní požadavky musí na obsluhu čekat.

Základem řízení provozu na světelné křižovatce je vytvoření modelu s mírou podobnosti, aby odpovídal realitě. K přiblížení modelu realitě se používá teorie pravděpodobnosti a u k určení parametrů modelu výsledky statistického pozorování. Teorie hromadné obsluhy vychází přibližně z teorie pravděpodobnosti a z matematiky. Základní jednotkou systémů hromadné obsluhy je obslužný systém, ten je složen z trojice zákazník – linka – obsluha. Zákazník je subjekt, který požaduje vyřízení svého požadavku, v tomto příkladu je zákazníkem řidič vozidla či vozidlo na křižovatce čekající na povel volno k projetí křižovatkou. Obslužnou linkou je místo nebo zařízení, kde se požadavky zpracovávají, v tomto příkladu je to prostor křižovatky s příjezdnými jízdními pruhy. Obsluhou se rozumí zpracování požadavku, činnost vedoucí k uspokojení požadavku zákazníka, v tomto příkladu je systém na obsluhu světelných křižovatek (Dohnal, 1997, s. 4).

Vlastností obslužného systému je, že zákazníci přicházejí se svými požadavky opakovaně v čase, tedy ne nutně titíž. Okamžiky příchodu do systému mohou být deterministické či náhodné, závislé nebo nezávislé, se známým rozdělením pravděpodobnosti, nebo s rozdělením, které neznáme. Systém obsluhuje jednu nebo několik paralelních obslužných linek. V jedné obslužné lince může být v jeden okamžik obsluhováno vždy určité množství

zákazníků, ostatní příchozí zákazníci se řadí spolu s dříve přišedšími zákazníky do fronty. Zpracování zakázky představuje čerpání určité kapacity obslužné linky neboli množství obsluhy. Množství kapacity může být měřeno v čase, v počtu zákazníků, množství spotřebované energie, finančních nákladech a podobně. V případě, že počet zákazníků je větší, než je systém schopen obsloužit, hromadí se zákazníci ve frontě, která může mít řadu různých podob. Podle silničních pravidel se vozidla řadí před křižovatkou za sebou, jak přijela, v tomto příkladu se jedná o frontový režim FIFO (first in, first out). Obslužné linky se obvykle spojují do obslužných sítí, kde je třeba uvažovat způsob, jakým zákazník touto sítí prochází, než je zcela obsloužen. Takovou obslužnou sítí může být například systém křižovatek, přepravní systém přes různé uzly, počítačový systém (Dohnal, 1997, s. 4).

V systému řízení světelných křižovatek se uvažují řidiči vozidel, kteří se řadí před světelnou křižovatkou do jízdnic pruhů. Řidiči jsou obslouženi obsluhou křižovatky podle preference obsluhy křižovatky, neobsloužení řidiči se řadí do fronty a čekají ve frontě na obsloužení. Systém řízení světelných křižovatek může být spojen do sítě více křižovatek a tím řídit provoz. Způsob jakým řidiči prochází touto sítí, než jsou zcela obslouženi, tedy projetím sítí křižovatek s minimalizovanou čekací dobou ve frontě, závisí na dynamickém řízení křižovatek.

Příjezdy vozidel ke křižovatce nastávají v náhodném čase. Náhodnou veličinu času t_n reprezentuje dobu n-té události, přičemž $t_n(\omega) = x_n$ je čas, kdy n-tá událost nastala. Posloupnost náhodných veličin $\{t_n\}_{n=-\infty}^{\infty}$, $t_n: \Omega \rightarrow \mathbb{R}$, takových, že:

$$-\infty \leq \dots \leq t_{-n} \leq \dots \leq t_{-1} \leq t_0 \leq t_1 \leq \dots \leq t_n \leq \dots \leq \infty \quad (6)$$

(Dohnal, 1997, s. 6).

Nechť:

$$-\infty \leq \dots \leq t_{-n} \leq \dots \leq t_{-1} \leq t_0 \leq t_1 \leq \dots \leq t_n \leq \dots \leq \infty \quad (7)$$

Za tohoto předpokladu:

- a) t_0 je čas první pozorované události, počátek pozorování procesu,
- b) v jeden časový okamžik nemohou nastat současně dvě události,

(Dohnal 1997, s. 7).

Posloupností nezávislých náhodných veličin nazýváme posloupnost $\{X_n\}_{n=-\infty}^{\infty}$ takovou, že jakoukoli k-tici (i_1, \dots, i_k) , $k = 1, 2, \dots$ platí:

$$P(X_{i1} \leq x_1, X_{i2} \leq x_2, \dots, X_{ik} \leq x_k) = \prod_{j=1}^k P(X_{ij} \leq x_j) \quad (8)$$

Bodový proces $N(t)$ nazýváme procesem s nezávislými přírůstky právě, když pro libovolnou k -tici vzájemně disjunktních intervalů $(s_1, s_1 + t_1), (s_2, s_2 + t_2), \dots, (s_k, s_k + t_k)$, $k \geq 2$, tvoří posloupnost nezávislých náhodných veličin $N(s_1, s_1 + t_1), N(s_2, s_2 + t_2), \dots, N(s_k, s_k + t_k)$ (Dohnal, 1997, s. 9).

Průjezdy motorových vozidel určitým místem na silnici mohou tvořit bodový proces s nezávislými přírůstky (Dohnal, 1997, s. 9).

Cílem teorie hromadné obsluhy je vyhledání závislostí ve vztahu mezi charakterem vstupů požadavků, produktivitou linek a efektivností obsluhy. Při optimalizaci systému jsou vždy proti sobě dva cíle, tedy co nejvyšší využití linky a minimalizace ztráty času zákazníků (Voráčová, 2015, s. 2).

Základními prvky charakterizující systém hromadné obsluhy je vstupní proud požadavků, doba obsluhy, disciplína čekání ve frontě, režim fronty a režim obsluhy. Vstupní proud požadavků značí intenzitu vstupů požadavků (vozidel) společně s intenzitou jejich obsluhy (projetí světelné křižovatky). Vstupní proud přicházející do systému hromadné obsluhy za jistý časový interval vyhovuje Poissonově procesu. Vstupní proud lze alternativně popsat i dobou mezi příchody dvou požadavků za jistý časový interval, pak Poissonovu proudu počet požadavků za časový interval odpovídá exponenciálnímu rozdělení dob mezi jejich příchody. Doba obsluhy je měřena v časových jednotkách a může nabývat Poissonova procesu, nebo doba obsluhy je náhodná s exponenciálním rozdělením. Disciplína čekání ve frontě je beze ztrát nebo vznikají ztráty, různé druhy netrpělivosti požadavků nebo omezený počet míst. Režimy fronty jsou FIFO a k tomu reverzní režim je LIFO, priorita může být absolutní nebo relativní. Absolutní priorita znamená, že požadavek je obslužen okamžitě. Relativní může mít několik stupňů, umožňuje nastoupit obsluhu, jakmile se uvolní místo v obsluze. Režimů obsluhy je více typů, jedná se o uspořádání obslužných míst, například sériové a paralelní, jednakanálové (s jednoduchou) a vícekanálové (s vícenásobnou obsluhou) [Lukáš, 2009, s. 66, 67].

2.3 Telematika a inteligentní dopravní systémy

Pro praktické využití obsluhy křižovatky se poznatky v této kapitole rozšiřují o telematiku a dopravní proud. Dopravní proud je následně rozpracován v makroskopickém modelu

v kapitole pro optimalizaci řízení křižovatky podle hustoty. Dalším obsahem jsou i detektory silničních vozidel.

2.3.1 Telematika

Telematika je obor, který má obrovský potenciál a velkou škálu využití. Propojení telekomunikačních a informačních technologií s dopravním inženýrstvím, ekonomikou, teorií dopravy, systémovým inženýrstvím a jinými souvisejícími obory dopravní infrastruktury je možné dosáhnout optimalizaci různých činností dopravy, jako např. zvýšení bezpečnosti a komfortu dopravy (Čujan, 2012, s. 2).

2.3.2 Dopravní proud

Zákon kontinuity lze aplikovat na dopravní proud. Zákonem kontinuity ve smyslu pro dopravní proud lze charakterizovat jako zákon o zachování počtu vozidel (Čujan, 2012, s. 3).

Rovnice kontinuity vychází ze zákona zachování hmotnosti. Rozdíl hmotnosti na vstupu a na výstupu z elementárního objemu se rovná časové změně hmotnosti akumulované v elementárním objemu (Hall, 2015).

Rovnice na zachování hmoty je:

$$m_{\text{vstup}} - m_{\text{výstup}} = \frac{\delta}{\delta t} m_{\text{element}} \quad (9)$$

(Hall, 2015).

Pro elementární objem je hmotnost konstantní a celková změna hmotnosti je nulová, $\delta m = 0$. Změna hmotnosti se dělí na časovou změnu a hmotnostní změnu (Hall, 2015).

Součet časové změny a hmotnostní změny je roven nule. Rovnici můžeme vyjádřit:

$$\delta t + \delta m = 0, \text{ neboli: } \delta t + \delta (u(p, x, t)p) = 0 \quad (10)$$

kde x a t představují prostorovou a časovou proměnou. Funkce $p(x, t)$ je hustota vozidel a funkce $u(p, x, t)$ je jejich rychlost. V rovnici kontinuity figuruje rychlost, hustota a čas. Časová změna počtu vozidel od úseku X_1 do úseku X_2 je dána rozdílem mezi počtem vozidel, které bodem X_1 do úseku vjedou a bodem X_2 úsek opustí (Čujan, 2012, s. 3).

Zákon o zachování hmotnosti je základním konceptem spolu se zákonem o zachování energie a zákonem o zachování hybnosti. Hmotnost je určena objemem a hustotou předmětu. Pokud se předmět pohybuje oblastí, mění polohu, prochází bodem A v určitém čase t a když předmět prochází plochou A rychlostí V, můžeme definovat objem. Hustota H, Rychlost V, Plocha A při násobení mezi sebou vznikne intenzita (Hall, 2015).

$$\text{Zápis: } \frac{\text{hmotnost}}{\text{vzdálenost}^3} \times \frac{\text{vzdálenost}}{\text{čas}} \times \frac{\text{vzdálenost}^2}{1} = \frac{\text{hmotnost}}{\text{čas}} \quad (11)$$

Kontinuita: **hustota H x rychlost V x plocha A = konstanta,**

(Hall, 2015).

Rovnice kontinuity lze pro tyto účely vyjádřit intenzitou, hustotou a rychlostí. Intenzita dopravy je počet vozidel za jednotku času. Jako délkový odstup vozidel je dán součinem průměrné rychlosti a časového odstup, po dosažení vznikne rovnice:

$$I = H \times V \quad (12)$$

rovnice kontinuity, kde I je intenzita [voz/h], H je hustota [voz/km] a V je rychlost [km/h]. Rovnice platí při použití prostorově-časových veličin. Rovnice kontinuity platí pro stacionární dopravní proud, použije-li se střední okamžitá rychlost (Lachnit, 2005, s. 21).

2.3.3 Detektory silničních vozidel

Pokročilým způsobem detekce motorových vozidel jsou neintrusivní detektory, které se instalují bez zásahu do vozovky. Jejich výhodou je, že neničí vozovku a dají se snadno přemístit a sejmut. Fungují bezdotykově ve styku s měřeným objektem na základě elektromagnetického nebo mechanického vlnění, zvuku (Příbyl, 2016).

Pasivní detektor hluku měří průjezd a rychlost vozidla a jeho přítomnost, detekují hluk způsobený průjezdem vozidla. Měří časový rozdíl přicházející zvukové vlny mezi okrajovými částmi detektoru. Když vozidlo přijíždí, zvukové vlny se zkracují, a když odjíždí, zvukové vlny se prodlužují, rychlost je určena podle softwarového algoritmu. Tyto detektory měří intenzitu, rychlost průjezdu, přítomnost vozidel, obsazenost dopravního proud v jednotlivých jízdních pružích. Výhodou je odolnost vůči vlhkosti, možnost měřit jednotlivé jízdní pruhy a pasivní detekce. Nevýhodou je, že není vhodný do nízkých teplot a do rychle měnících se dopravních podmínek (Příbyl, 2016).

Ultrazvukové detektory vysílají tlakové vlny zvukové energie o frekvenci 25 a 50 kHz. Pracují na principu pulzních detektorů, v pravidelných intervalech vysílají vlny a měří čas, kdy se odražená vlna vrátí detektoru. Časový rozdíl je rozdílem mezi vzdáleností k povrchu vozovky a přítomností vozidla. Měří velikost odražené energie a přemění ji na elektrickou energii. Pulzní detektory měří přítomnost, počet a obsazenost vozidel, délku a výšku vozidel. Rychlost vozidla je vypočítána Dopplerovým efektem, kde jeden detektor vysílá a druhý přijímá signál, změna signálu detekuje vozidlo a zároveň jeho rychlost (Příbyl, 2016).

Mikrovlnný radar je elektronický přístroj určený k zaměření, identifikaci a určení vzdálenosti objektů pomocí velmi krátkých elektromagnetických vln. Vlnové délky jsou 1 až 30 cm, o frekvenci 1 GHz až 30 GHz. Mikrovlnný radar s pulzní vlnou vysílá impuls stanovené délky ve stanovených intervalech, měří vzdálenost, směr, výšku, velikost objektu. S nemodulovanou spojitou vlnou mikrovlnný radar vysílá signál o konstantní amplitudě a frekvenci, měří počet vozidel a rychlost. Mikrovlnný radar s frekvenčně modulovanou spojitou vlnou vysílá signál o proměnné frekvenci s konstantní amplitudou, měří vzdálenost, rychlost, velikost objektu, počet, přítomnost a průjezd vozidla. Mikrovlnný radar vysílá velmi krátké impulsy o velkém výkonu a v pauzách přijímá odražené vlny. Vyslané vlny se šíří prostorem a mohou se odrážet od objektů nebo od rozhraní různých prostředí, jako je oblačnost, rozhraní teplého a studeného vzduchu. Vzdálenosti detekovaných předmětů jsou určovány pomocí časové korelace vyslaného a přijímaného signálu (Příbyl, 2016).

Aktivní infračervené detektory využívají záření o frekvenci řádově 10^{13} Hz, vlnové délky 10^{-5} až 10^{-6} m, oblast pokrývají zářením o nízkém výkonu pomocí LED diod. Vysílají paprsek a měří dobu, za kterou se vrátí zpět. Přijatou energii ve formě záření přeměňují na elektrický signál. Měří přítomnost, rychlost a délku vozidla. Výhodou aktivních infračervených detektorů, že pracují ve dne i v noci, vhodné na provoz ve více jízdních pruzích. Nevýhodou je ovlivnění kvality hustou mlhou a vánicemi (Příbyl, 2016).

Pasivní infračervené detektory snímají emitované tepelné záření z objektů, pracuje na principu, že každý objekt emituje tepelné záření. Pokud nedosahuje teploty absolutní nuly, termodynamické teploty 0 K. Senzor měří rozdíly teplot mezi vozovkou a vozidlem, zaznamenává se změna energie při průjezdu vozidla. Nevýhodou je složitá kalibrace a výkon je ovlivněn změnami teplot (Příbyl, 2016).

Kombinované detektory používají kombinaci technologií mikrovln, ultrazvuku a pasivního infračerveného záření. Mají schopnost identifikovat přítomnost vozidla a rozpoznat dopravní zácpy, zachytí obsazení a časový odstup vozidla, zachytí rychlosti jednotlivých vozidel a počet všech druhů vozidel. Kombinují Dopplerův efekt, frekvence ultrazvuku a infračervené senzory (IR senzory) [Příbyl, 2016].

Videodetekce využívá dva typy systémů, integrované videodetektory a videodetekční modulární systémy. Integrované videokamery jsou kamerové systémy, které integrují kameru a detektor do jednoho celku. Videodetekční modulární systémy mají komplexnější funkce, mohou měřit rychlost, obsazenost úseku a jiné. Výhodou videodetekčního modulárního systému je možnost připojení k existujícímu kamerovému systému s analogovým výstupem, tento systém je pro svou technickou vybavenost značně finančně náročný, přičemž z pohledu řízení dopravy integruje několik indukčních smyček (AŽD Praha).

2.4 Fuzzy logika

K této kapitole je uvedena i fuzzy logika, která má schopnost pracovat s neurčitostí, jako je neurčité a nepředvídatelné chování dopravního proudu. Fuzzy logika je vhodným pomocníkem k řešení dopravního proudu pro úlohu dynamických stochastických systémů.

2.4.1 Pojem fuzzy logiky

Fuzzy je slovo z anglického jazyka a znamená mlhavý, nejasný, neostrý, neurčitý. Člověk před řešením nějakého složitého problému neuvažuje ve své mysli pomocí přesně naměřených hodnot, ale spíše počítá s mlhavými pojmy typu daleko, blízko, rychle, pomalu. Člověk lépe počítá se slovy, vyjadřuje se v nenumerických pojmech. Fuzzy logika se odlišuje od klasické teorie, v klasické teorii množin máme dvě možnosti, prvek x patří do množiny A , nebo nepatří do množiny A , tj. patří do B . Ať odpovíme, že patří či nepatří, nebude tato odpověď popisovat reálnou situaci věrně. Věrnějšího popisu s realitou docílíme, když odpovíme, že daný prvek x náleží do množiny A částečně (Jura, 2005, s. 5).

Nechť daný prvek leží na hranici dvou množin a tento prvek leží částečně v první a současně i v druhé množině. Odpovíme, že prvek patří do první množiny jen částečně, jestliže připustíme, že charakteristická funkce množiny může nabývat hodnot z intervalu $<0,1>$. Tímto krokem je zaveden pojem fuzzy množina. Množina, do které prvek může patřit jen částečně. Například daný prvek x patří do množiny A s příslušností 0,7 a s příslušností 0,3 do množiny B . Fuzzy množina je zobecněním klasické množiny (Jura, 2005, s. 7).

Příkladem je jízda vozidla v koloně. Jedno z pravidel, kterým se řidič řídí, je, jestliže rychlost je velká a současně vzdálenost mezi vozidly je malá, potom brzdná síla je velká. Vyskytují se výroky rychlost v = velká, vzdálenost d = malá, síla F = velká. Algoritmicky je akce popsána jako $\text{if } (v = \text{velká}) \text{ and } (d = \text{malá}) \text{ then } (F = \text{velká})$. Zapsali jsme činnost řidiče algoritmicky, ale

použili jsme vágní pojmy „malý“, „velký“. Přestože řidič při řízení automobilu, dynamického systému, používá vágní údaje a přitom řídí vozidlo úspěšně. Nejedná se o ostré (klasické) výroky s pravdivostí 0 nebo 1, ale o fuzzy výroky, jejichž pravdivostní hodnota může nabývat některé z hodnot od 0 do 1 (Jura, 2005, s. 6).

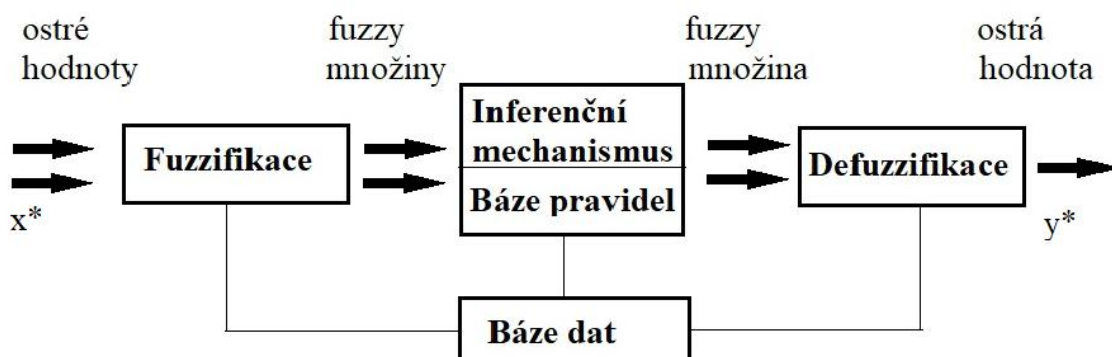
Ve fuzzy logice je prvek x , který s příslušností 0,65 spadá do množiny A vyjádřen: $\mu_A(x) \in [0,1]$. V klasické množině je prvek x vyjádřen: $\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & x \in A \\ 0 & x \notin A \end{cases}$ s tím, že prvek x je v množině A či nikoliv.

Pro tvar funkce příslušnosti fuzzy množiny se používají tvary sestavené z lomených čar, jejímž důvodem je výpočetní jednoduchost (Jura, 2005, s. 8).

Je-li rychlost kolony přijíždějících vozidel 80 km/hod. a vzdálenost mezi automobily 18 m, potom pravdivostní hodnota výroku rychlost v = velká je 0,4 a vzdálenost d = malá je 0,6.

2.4.2 Fuzzy systém

Při praktické aplikaci získáváme hodnoty vstupních veličin ve formě naměřených čísel. Tato reálná čísla je potřeba převést na fuzzy množiny, neboť vstupem do inferenčního mechanismu jsou fuzzy množiny. Tento převod provádí blok fuzzifikace, stejně výstup do řízeného procesu musí být reálné číslo. Zatímco výstupem inferenčního mechanismu je fuzzy množina, tento převod provádí blok defuzzifikace. Inferenční mechanismus se nazývá fuzzy systém a obsahuje bázi pravidel, což je soubor pravidel, jimiž prostupuje proměnná x a také obsahuje bázi dat. Báze dat jsou parametry jednotlivých funkcí příslušnosti všech proměnných (Jura, 2005, s. 12).

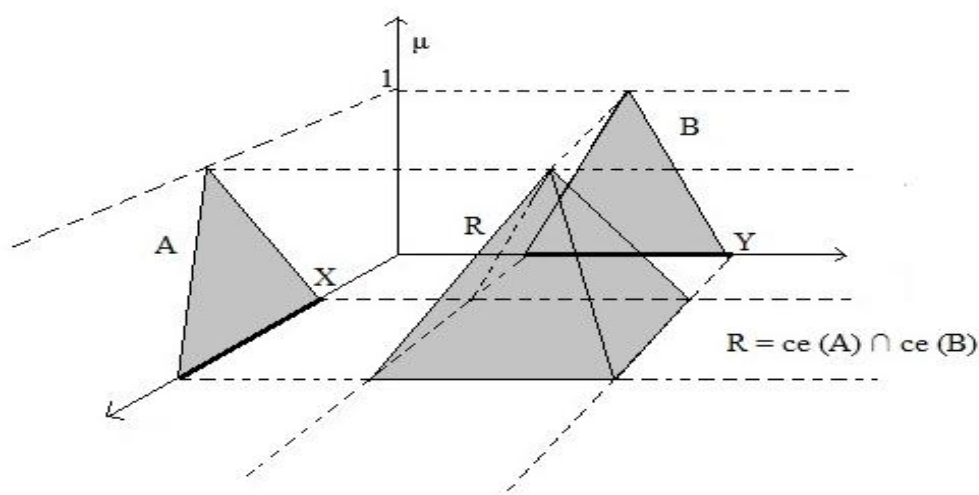


Obrázek 1 - Struktura fuzzy systému (Jura, 2005, s. 13)

Fuzzifikace, vstupní ostrá hodnota x je reprezentována singletonem a její průsečík s funkcí příslušnosti určuje pravdivostní hodnotu, s jakou hodnota patří do fuzzy množiny (Jura, 2005, s. 13).

Defuzzifikace je převedení fuzzy množiny na reálné číslo. Metod defuzzifikace je celá řada. Nejčastěji užívanou je metoda těžiště, to znamená, že je určeno těžiště plochy, které leží pod funkcí příslušnosti výsledné fuzzy množiny (Jura, 2005, s. 13).

Konstrukce fuzzy relace prvků X a Y z množin A , B vychází z kartézského součinu $A \times B$ těchto množin, tedy vytvoření množiny všech uspořádaných dvojic. Fuzzy implikace je matematicky fuzzy relací např. $\text{if } (x = A) \text{ then } (y = B)$. Fuzzy množina je definována na univerzu X a B je na univerzu Y . Pro snadné vysvětlení předpokládejme, že fuzzy množiny A a B mají trojúhelníkový tvar funkcí příslušnosti.



Obrázek 2 - Konstrukce fuzzy relace $\text{if } (x = A) \text{ then } (y = B)$ [Jura, 2005, s. 10]

Kartézský součin univerza X a Y , matematicky je fuzzy relace popsána operací $R = ce(A) \cap ce(B)$. Cylindrické rozšíření fuzzy množiny A na kartézský součin X krát Y , znamená protažení trojúhelníku A do prostoru a podobně i fuzzy množiny B . Vzniknou tak dva prostorové útvary, jejich průsek je čtyřboký jehlan R (Jura, 2005, s. 10).

2.4.3 Jazyková aproximace

Do fuzzy systému vstupují ostré hodnoty proměnných a výstupem fuzzy systému je ostrá hodnota. Fuzzy systém realizuje funkci n proměnných $y^* = f(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$. Na příkladu z počtu přijíždějících vozidel ke křižovatce je univerzum vstupní proměnné x pokryto čtyřmi fuzzy množinami ($N = \text{Nulová}$, $M = \text{Malá}$, $S = \text{Střední}$, $V = \text{Velká}$). Tyto fuzzy množiny

vyjadřují slovně hodnoty proměnné x . Univerzum výstupní proměnné y je stejným způsobem pokryto čtyřmi fuzzy množinami stejných jmen (Jura, 2005, s. 13).

Je dán soubor pravidel:

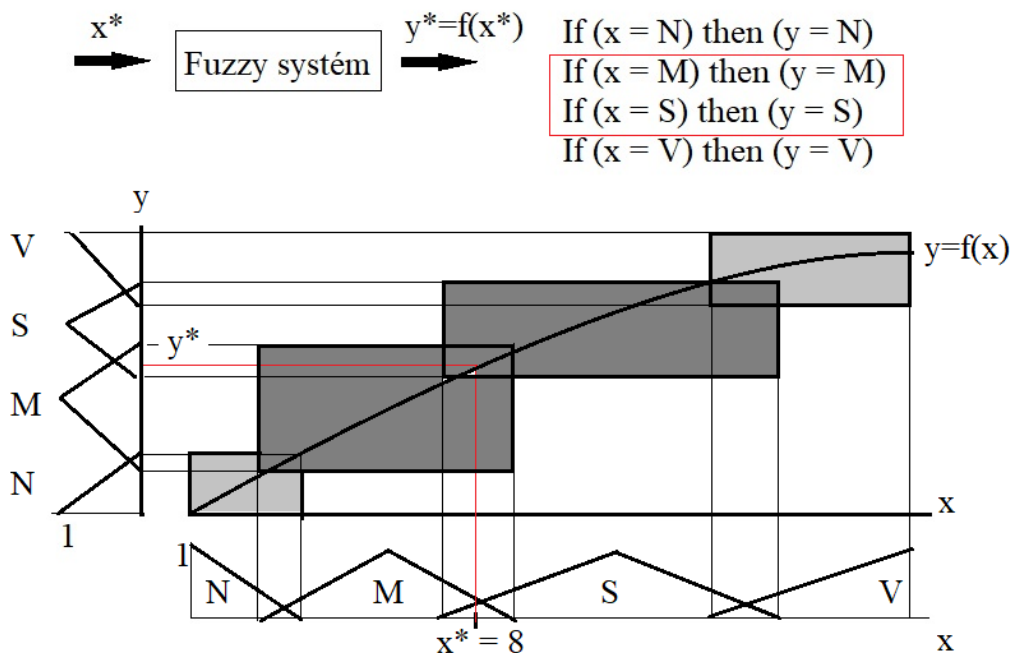
if ($x = N$) then ($y = N$)

if ($x = M$) then ($y = M$)

if ($x = S$) then ($y = S$)

if ($x = V$) then ($y = V$).

Nabude-li vstupní proměnná x nějaké hodnoty x^* , potom provedením tří kroků, fuzzifikace, vyhodnocení pravidel, defuzzifikace, obdržíme ostrou hodnotu výstupu y^* . V uvedeném příkladu přijíždí 8 vozidel ke křižovatce, počet 8 znamená, že je aktivní druhé pravidlo ($x = M$) a třetí pravidlo ($x = S$). Situace je zobrazena na obrázku 3.



Obrázek 3 - Příklad jazykové realizace, aproximace (Jura, 2005, s. 14)

Podstatný rozdíl mezi klasickou metodou a metodou fuzzy aproximace je ten, že fuzzy aproximovaná funkce je popsána pomocí fuzzy pravidel. Existuje-li expert, dokáže daný problém vyjádřit slovním popisem typu „jestliže x_1 je malé a současně x_2 je velké, potom veličina y je střední“, je možno tuto znalost problému vyjádřit ve formě fuzzy pravidel (Jura, 2005, s. 14).

Fuzzy aproximace má vlastnost tak zvané lokální citlivosti, kdy hodnoty aproximační funkce lze změnit v nějakém okolí pracovního bodu změnou pravidla nebo změnou polohy či tvaru

funkce příslušnosti, aniž by se změnil tvar aproximační funkce v celém univerzu na rozdíl od aproximace polynomem (Jura, 2005, s. 14).

V mnoha reálných situacích není expert k dispozici a k dispozici máme množinu dat, hodnot vstupních proměnných a jim odpovídající hodnoty výstupní proměnné. V tomto případě je třeba parametry určit z těchto dat. Jednou z možností, jak realizovat fuzzy systém, je neuronová síť a trénováním této sítě na zadaných datech, najít potřebné hodnoty parametrů (Jura, 2005, s. 17).

2.4.4 Fuzzy logika v dopravním inženýrství

Houstnoucí doprava se zvyšujícím se počtem vozidel vyžaduje konstantní vývoj a komplexnější řešení dopravní situace včetně řízení světelných signálů. Monitorování a řízení dopravy uvnitř města se stal rozhodující úkol. Schopnost převzít kontrolu nad silnicemi, má tím pádem přímý účinek na kvalitu života. V současnosti světelné křižovatky používají data v reálném čase a data kombinují se sofistikovanými algoritmy. Tyto algoritmy užívají prostá matematická pravidla, která byla vhodná k účelům pro nižší zatížení křižovatek, ale začaly být zastaralé se začátkem rozvoje hustoty silničních sítí a zvyšujícím se počtem vozidel. Současné algoritmy musí být více adaptivní a inteligentní, aby zvládly stále měnící se dopravní situace. To znamená mít rozhodující systém, který by měl být schopný realizovat a ovládat situace z běžného reálného života, který je podobný lidskému myšlení (Koukol et al., 2015).

Tyto podmínky mohou být splněny implementací procesu fuzzy logiky a fuzzy algebry do kontrolního systému. Například člověk by mohl myslet následujícím způsobem k řízení křižovatky určité spojení: „jestliže je na severu a jihu hodně vozidel, na východě a západě je méně vozidel, pak by zelené světlo mělo svítit déle pro severní a jižní směr. Tyto pravidla mohou být snadno přizpůsobena v řadiči fuzzy logiky. Hlavní moc fuzzy logiky je, že dokáže termíny a podmínky jako „hodně“, „málo“ a „delší“ vyčíslit a porozumět pro zpracování počítači (Koukol et al., 2015).

Různé predikce a modelování chování dopravy deterministickými modely vede na jednu stranu, že deterministickými modely jsou vysvětlovány a popisovány reálné situace. Výhoda deterministického modelu leží ve stabilitě a ve snadném řešení problému. Na druhou stranu trpí na reakci okamžitých a neočekávaných změn chování řidičů. V tomto ohledu fuzzy logika nabízí potenciál pracovat s oběma významnými změnami, které rychle ovlivňují kontinuitu dopravy a také s malými změnami, které jsou obtížné řešit statisticky. Nicméně jejich účinek

může být rozhodně důležitý. V tomto vývoji bylo představeno mnoho stochastických přístupů, nicméně kombinace s fuzzy logikou stále představuje nejlepší spolehlivost (Koukol et al., 2015).

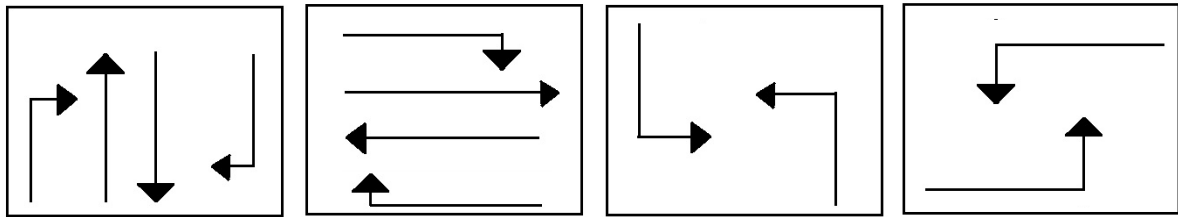
Křižovatka se světelnou signalizací na bázi fuzzy logiky byla představena poprvé v roce 1977. Tehdy byl popsán teoretický model aplikace řadiče fuzzy logiky (Fuzzy Logic Cotroller – FLC) na izolované křižovatce s LSE (light signaling equipment) [Koukol et al., 2015].

2.4.5 Příklad izolované křižovatky řízené řadičem fuzzy logiky

Řadič kontroluje čas světelné signalizace a fázi sekvence k zajištění plynulého provozu dopravy s minimálním zpožděním. Obvykle je řadič přizpůsoben maximalizovat dopravní provoz a minimalizovat zpoždění v běžných dopravních podmínkách. Následně nejsou řadiče vhodné ve výjimečných případech, jako jsou dopravní zácpy a silniční nehody. Vylepšená verze řadiče sbírá data z příjíždějícího jízdního pruhu do křižovatky a z odchozího jízdního pruhu z křižovatky, řadič využije data přijaté ze senzorů pro rozhodnutí k minimalizaci zpoždění (Nair a Cair, 2007, s. 1229).

Vzrůstající městská doprava vyžaduje vhodné kroky k řízení dopravního provozu. Světelné signalizace na křižovatkách jsou společným krokem k řízení dopravního proudu na různých typech křižovatek. Řádně koordinované časování světelných signálů může zajistit plynulý provoz dopravy (Nair a Cair, 2007, s. 1229).

Světelné signály pracují na základních pravidlech. Křižovatka má čtyři nebo více fází. Fáze se rozumí, kdy jízdní pruhy mají signál volno k opuštění křižovatky. Na obrázku 4 jsou typické čtyři fáze pro křižovátku. Dokončení čtyř fází se jmenuje cyklus. Délka cyklu je deterministicky nastavena délkou fází v tomto cyklu. V pevně daném čase je každá délka fáze předem určena a cyklus je časově zafixovaný. Nicméně pokud je dynamické nastavení času, délka cyklu může nabývat různého časového trvání v závislosti na dopravě. Světelné barvy na SSZ ukazují začátek a konec fáze. Zelené světlo ukazuje začátek fáze, žluté ukazuje ukončení fáze a červené světlo ukazuje konec fáze a začátek nové fáze (Nair a Cair, 2007, s. 1229).



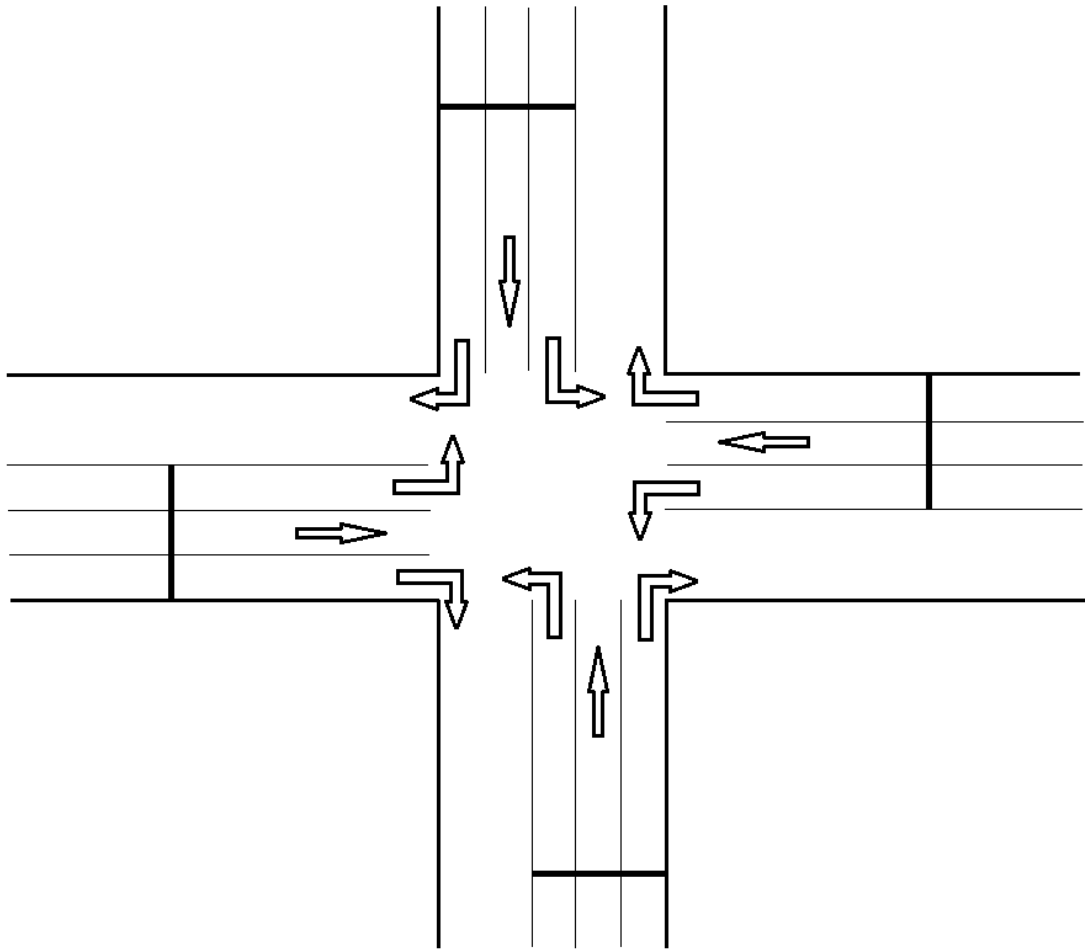
Obrázek 4 - Čtyři fáze izolované křižovatky (Nair a Cair 2007, s. 1229)

K řízení světelné signalizace jsou dva postupy. Postup hrubé metody používá zafixovaný čas. Doba trvání fáze zeleného světla je odvozena od dopravního provozu v křižovatce v místě umístění řadiče. Delší zelená signalizace je během dopravní špičky a kratší doba zelené signalizace je mimo dopravní špičku. Tento postup funguje efektivně při běžném provozu, pokud se náhle změní dopravní situace, může tato metoda vést k chybnému výsledku. Proto je přáním vyvinout dynamické nastavení signalizace reagující na změny v dopravě (Nair a Cair, 2007, s. 1230).

Druhým z postupů na dynamickou změnu signalizace je metoda ovládána vozidly. V této metodě jsou nainstalovány detektory vozidel v určité vzdálenosti v jízdním pruhu. Doba trvání zelené signalizace je minimální a postupně se rozšiřuje, když přijíždějící vozidla jsou detekována během rozšiřovací periody. Rozšíření doby světelné signalizace je omezeno na maximální možnou dobu, tato doba je upravena předpisem. Ačkoliv tato metoda je dynamičtější než hrubá metoda s fixovaným časem signalizace, obě metody nejsou schopny zvážit dopravní podmínky provozu v době čekání na červené signalizaci, chybí koordinace fází v obou metodách (Nair a Cair, 2007, s. 1230).

Alternativně fuzzy logika bere podmínky ostatních fází v úvahu. Fuzzy logika umožňuje rozhodovat jako člověk, to co není možné v metodě zafixovaného času, nebo v metodě na detekci přijíždějících vozidel čistě založené na kvantitativní hodnotě (Nair a Cair, 2007, s. 1230).

Příkladem fuzzy logiky je izolovaná čtyřramenná křižovatka na obrázku. Každé rameno má tři přijíždějící jízdní pruhy, jak vidíme na obrázku 5. Chodci do modelu křižovatky nejsou zahrnuti. Na modelu jsou čtyři fáze. V první fázi vozidla projíždí ze severu na jih (přímý směr), odbočují ze severu na východ, z jihu na sever (přímý směr), odbočují z jihu na západ. V druhé fázi vozidla projíždějí křižovatkou ze západu na východ v přímém směru, z východu na západ v přímém směru, odbočují ze západu na sever a odbočují z východu na jih. Ve třetí fázi vozidla projíždí křižovatkou tak, že odbočují ze severu na západ a odbočují z jihu na západ. Ve čtvrté fázi vozidla projíždí křižovatkou tak, že odbočují z východu na jih a odbočují z východu na sever. Obrázek 5 zobrazuje izolovanou křižovatku (Nair a Cair, 2007, s. 1230).



Obrázek 5 - Izolovaná křižovatka (Nair a Cair, 2007, s. 1230)

Pro výpočet se používají čtyři parametry jako vstupní vektory do řadiče fuzzy logiky. Prvním parametrem je délka fronty na červenou signalizaci (Red Queue Length – RQL), toto znamená zbytek vozidel od zeleného signálu plus přijíždějící vozidla během současného červeného signálu:

$$\mathbf{RQL} = \mathbf{Q}_{\text{zelená}} + \Sigma \mathbf{Vr} (i) \quad (13)$$

kde $Q_{\text{zelená}}$ jsou vozidla, která neopustila křižovatku během zelené signalizace a $\Sigma Vr (i)$ je součet přijíždějících vozidel v i -té vteřině na červené signalizaci (Nair a Cair 2007, s. 1230).

Druhým parametrem je poměr časů zelené signalizace k celkovému času přiděleného pro zelenou fázi, značí se RGT – Ratio of Green Time.

$$\mathbf{RGT} = \mathbf{g} (t) / \mathbf{T}_g \quad (14)$$

kde T_g je celkový čas pro zelenou fázi a $g (t)$ je zbývající čas zelené signalizace v čase t od začátku zelené fáze (Nair a Cair, 2007, s. 1230, 1231).

Třetím parametrem je příjezd vozidel během zelené periody (AG), kde $\sum Vg (i)$ je součet přijíždějících vozidel v i-té vteřině pro zelenou fázi.

$$AG = \sum Vg (i) \quad (15)$$

(Nair a Cair, 2007, s. 1231).

Konečným čtvrtým zásadním parametrem pro tento model je průměrný čas zelené signalizace pro opuštění křižovatky (Average Green Discharge Time – AGDT). Čas pro opuštění křižovatky ukazuje, zda vozidla opouští křižovatku během normální nebo abnormální hodnoty. Definujeme AGDT jako následující,

$$AGDT (n) = \alpha (CDT) + (1-\alpha) AGDT (n-1) \quad (16)$$

kde CDT je současná hodnota času pro opuštění křižovatky, AGDT (n-1) je předešlá kalkulace průměrného času na opuštění křižovatky a α je koeficient pro vyhlazení funkce. Hodnotu α pokládáme za 0,8 k rychlému přizpůsobení ve většině změn časů pro opuštění křižovatky, když není možné zjistit průměrný čas (Nair a Cair, 2007, s. 1231).

Výstupem řadiče fuzzy logiky je zvýšit, nebo snížit čas zelené signalizace. Zpoždění se rovná rozdílu času pro opuštění vozidel křižovatky a času příjezdu vozidel do křižovatky (Nair a Cair, 2007, s. 1231).

Fuzzy pravidla pro normální řadič. Fuzzy řadič má tři vstupní parametry. První dva parametry jsou AG a RGT, které jsou převzaty ze současné zelené fáze. Třetím parametrem je RQL, který je převzat z červené fáze. Tyto parametry se porovnají pro rozhodnutí, zda rozšířit či zkrátit délku zelené signalizace. Výstupem fuzzy řadiče je určení změny časů zelené signalizace (Nair a Cair, 2007, s. 1231).

Například fuzzy pravidlo by mohlo začínat takto, když délka fronty na červenou signalizaci (RQL) je „hodně“ a průjezd vozidel na zelenou signalizaci (AG) je „velmi málo“ a poměr časů zelené signalizace (RGT) je „hodně“, tak časování signálů je „velmi zkrácené“ (Nair a Cair, 2007, s. 1231).

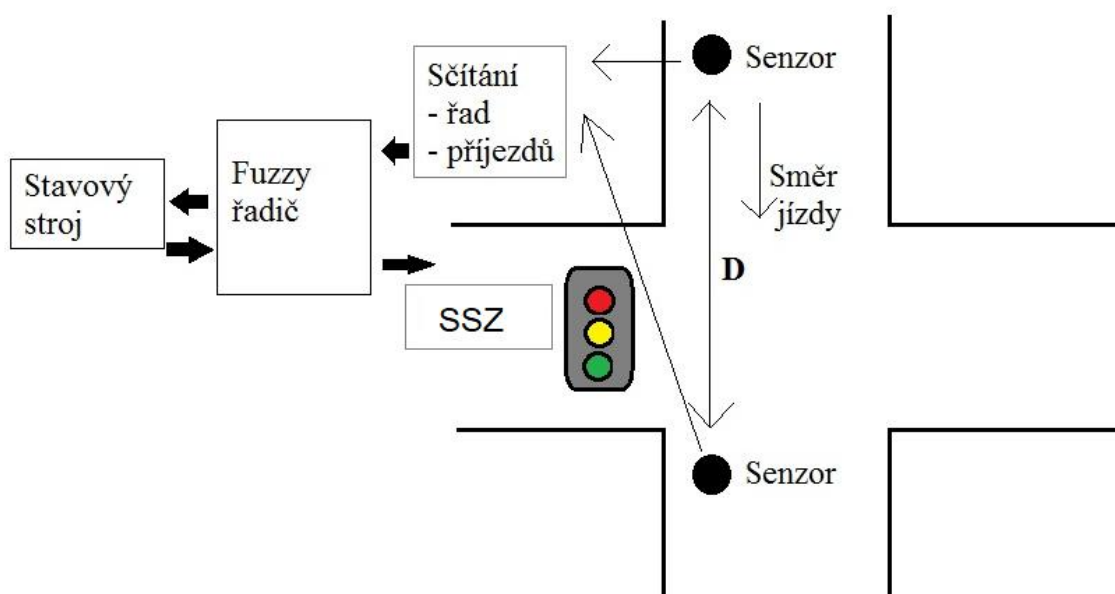
Fuzzy pravidla pro abnormální řadič. Tento řadič je podobný jako normální fuzzy řadič, ale má navíc průměrný čas zelené signalizace na opuštění křižovatky AGDT parametr. AGDT ukazuje, kolik času v průměru potřebuje vozidlo na opuštění křižovatky během zelené fáze. Když se hodnota AGDT zvyšuje, pak je možnost, že čas pro zelenou signalizaci by mohl být promarněn. Například fuzzy pravidlo pro tento model by mohl začít, když délka fronty na červenou signalizaci (RQL) je „malá“ a průjezd vozidel na zelenou signalizaci (AG) je „střední“ a poměr časů zelené signalizace (RGT) je „hodně“ a průměrný čas zelené

signalizace na opuštění křižovatky (AGDT) je „velmi dlouhý“ pak časování signálů je „zkrácené“ (Nair a Cair, 2007, s. 1231).

2.4.6 Inteligentní SSZ pod kontrolou fuzzy logiky

Monitorování a řízení městské dopravy se stává závažným problémem se vzrůstajícím počtem vozidel ve velkých městech. Inteligentní řízení SSZ používajících technologii fuzzy logiky mají schopnost napodobovat lidskou inteligenci pro kontrolu světelných signálů. Software založený na jazyku Visual Basic byl vyvinut k simulování izolované křižovatky. Software je schopný simulovat řízení signalizací SSZ oběma způsoby, jak konvenčním způsobem s fixovaným časem, tak i na řadiči fuzzy logiky a dokáže simulovat časové prostoje, hustotu dopravy, náklady a jiné. Technologie fuzzy logiky dovoluje implementovat pravidla z běžného reálného života, tak jak člověk přemýšlí (Khiang, Khalid a Yusof, s. 1).

Řízení SSZ s podporou fuzzy logiky má širší pole působnosti v křižovatce a používá senzory, které sčítají vozidla namísto sensorů indikujících pouze přiblížení vozidel u SSZ s fixovaným časem signalizace. Tento způsob snímání vozidel poskytuje intenzity dopravy v jízdních pruzích a dovoluje lepší zhodnocení měnící se struktury dopravy. Jak dopravní provoz kolísá, fuzzy řadič může měnit světelné signály podle dopravního provozu. Běžná struktura fuzzy systému řízení SSZ je zobrazena na obrázku 6.



Obrázek 6 - Obecná struktura řízení SSZ systémem fuzzy logiky (Khiang, Khalid a Yusof, s. 2)

V každém jízdním pruhu na silnici jsou 2 elektromagnetické senzory. První senzor je za SSZ a počítá počet vozidel projíždějících křižovatkou a druhý senzor je umístěn v jízdním pruhu ve vzdálenosti D před křižovatkou a snímá počet přijíždějících vozidel. Počet vozidel v křižovatce je určen rozdílem snímání vozidel mezi senzory. Toto je kontrast s konvenčním řízením křižovatek s aproximačními senzory, které jsou před SSZ a snímají pouze vozidla čekající před SSZ, nikoliv komplexní počty vozidel čekajících v jízdních pruzích před křižovatkou. Vzdálenost D mezi senzory je dána individuálně podle dopravního provozu křižovatky. Fuzzy řadič je zodpovědný za kontrolu délky zelené signalizace podle podmínek na křižovatce. Stavový stroj kontroluje sekvenci stavů, které by fuzzy řadič měl cyklovat. Je jeden stav pro každou fázi světelné signalizace. Existuje výchozí (defaultní) stav, pokud přijíždějící vozidla nejsou detekována. Výchozí stav koresponduje časově se zelenou signalizací specificky podle hlavního dopravního proudu na křižovatce. V sekvenci stavů může být stav přeskočen, pokud není vozidlo blížící se ke křižovatce detekováno, tedy ke křižovatce v jednom směru nepřijíždí vozidla, stav signálu zelená je přeskočen pro tento směr (Khiang, Khalid a Yusof, s. 2).

Ve vývoji SSZ řízených fuzzy systémem se předpokládá izolovaná čtyřramenná křižovatka s příjezdy ze severu, jihu, západu a východu. Když doprava na severu a jihu se pohybuje, na západě a východě je zastavena nebo naopak. Odbočování doprava ani doleva není považováno. Fuzzy řadič pozoruje intenzitu provozu na severu a jihu na jednu stranu a dopravu na západě a východě na druhou stranu. Západovýchodní směr je předpokládán za hlavní. Minimální a maximální čas na zelenou signalizaci jsou 2 vteřiny a 20 vteřin respektive. Fuzzy řadič rozeznává 2 vstupy, množství přijíždějících vozidel a množství řadících se vozidel. Pokud na severu a jihu je zelená signalizace, jedná se o přijíždějící směr a řadící směr je na západě a východě na červené signalizaci a naopak. Výstupem fuzzy řadiče by mělo být rozšíření zelené signalizace potřebné na severojižním směru, přijíždějícím směru. Tím pádem je rozhodnutí fuzzy řadiče rozšířit nebo nerozšířit zelenou signalizaci na přijíždějícím směru podle okamžitých dopravních podmínek na křižovatce. Pokud není potřeba zelenou signalizaci rozšířit, stav signalizace se okamžitě změní na jiný stav podle okamžitých podmínek dopravního provozu (Khiang, Khalid a Yusof, s. 2).

Řízení SSZ má čtyři členy pro každý vstup a výstup fuzzy systému na proměnných příjezd, řazení, rozšíření. Tabulka 2 zobrazuje funkce a proměnné ve fuzzy systému řízení křižovatky.

Tabulka 2 - Fuzzy proměnné na řízení SSZ (Khiang, Khalid a Yusof, s. 3)

Příjezd		Řazení		Rozšíření	
Zřídka	ZR	Velmi málo	VM	Nula	N
Trochu	TR	Málo	M	Krátký	K
Hodně	HD	Střední	S	Střední	S
Příliš	PR	Dlouhý	D	Delší	D

K hodnotám trochu, málo, hodně, střední a jiné se kvantifikuje naměřená hodnota ze vstupních senzorů, například pokud je naměřená hodnota přijíždějících vozidel 6, můžeme přiřadit výraz „hodně“. Pokud hodnota řadících vozidel jsou 2, můžeme přiřadit výraz „málo“. Každá křižovatka je individuální a počty vozidel se kvantifikují podle pozorování experta, jak jsou křižovatky samy o sobě zatíženy i jak je zatíženo okolí. Přiřazování naměřených hodnot k proměnným, tedy například příjezd vozidel 1 až 3 je „zřídka“, 2 až 7 vozidel je „trochu“, 6 až 12 vozidel je hodně, 11 až 20 vozidel je „příliš“. Hodnoty by se neměly překrývat o více jak 25%, velké překrytí hodnot vede k rozostření rozdílu naměřených hodnot (Khiang, Khalid a Yusof, s. 3).

Rozhraní fuzzy řadiče připomíná lidské uvažování. Jako by člověk mohl říci, pokud je doprava ze severu města přetížena a doprava na západě je slabá, pak bych mohl dovolit pohyb na severu po delší dobu. Jinak by mohl člověk říci, pokud je doprava na severu města v intenzitě v mezích průměrná a na západě města také průměrná, tak bych dovolil normální pohyb dopravy pro oba směry. Ve vývoji fuzzy řadiče můžeme použít podobná pravidla, pokud je příliš (PR) vozidel přijíždějících a velmi málo (VM) vozidel čekajících v řadě, pak rozšíříme zelenou signalizaci na přijíždějící straně. Příjezdy vozidel a řadící se vozidla jsou vstupy a výstupem je rozšíření, velikost matice je počet kombinací vstupních členů. Počet kombinací se rovná součinu vstupních členů, v tomto případě 4 x 4 je 16 kombinací (Khiang, Khalid a Yusof, s. 4). Kombinace zachycuje tabulka 3.

Tabulka 3 - Konfigurace fuzzy pravidel v matici pro řízení SSZ (Khiang, Khalid a Yusof, s. 4)

Přijíždějící vozidla					
		ZR	TR	HD	PR
Řazení	VM	N	K	S	D
	M	N	K	S	S
	S	N	N	K	S
	D	N	N	N	K

Softwarové zařízení na simulování křižovatky s podporou fuzzy řadiče poskytuje uživateli analýzu o počtu snímaných vozidel senzory, o počtu průjezdů vozidel pro každý jízdní pruh za minutu, o čase během čekání (Wait Time) na křižovatce v každém jízdním pruhu, o čase průjezdu (Drive Time) všech vozidel v každém jízdním pruhu, o počtu vozidel (CAR IN) v každém jízdním pruhu pro každou minutu simulace, o počtu vozidel (CAR OUT) opouštějících křižovatku, nákladovou funkci. Nákladová funkce poskytuje numerickou kalkulaci nákladů. Nižší hodnota ukazuje lepší výkon řadičů minimalizující dobu čekání a také náklady na palivo. Kalkulace je:

$$\text{Náklady} = (\text{CAR IN} / \text{CAR OUT}) * (\text{WAIT TIME} / \text{DRIVE TIME}) \quad (17)$$

V tomto ohledu pokud vozidla přijedou a opustí křižovatku za stejný čas, kalkulace se rovná 1. Pokud více vozidel přijede, než opustí křižovatku a doba čekání v křižovatce je delší než doba průjezdů křižovatkou, výsledná hodnota je čím dále vyšší číslo s vyšší dobou čekání a s vyšším počtem přijíždějících vozidel. Úkolem minimalizační funkce je snížit doby čekání a redukce podílu přijíždějících vozidel a odjíždějících vozidel (Khiang, Khalid a Yusof, s. 5).

2.5. Závěr kapitoly teorie hromadné obsluhy, telematiky a fuzzy logiky

Tato kapitola pojednává v teoretické části o teorii hromadné obsluhy, se kterou autor pracuje v následné kapitole o nalezení optimálního řešení provozu světelné izolované křižovatky podle hustoty provozu.

Kapitola popisuje dopravní proud a stochastické procesy, v nichž je obsaženo Poissonovo rozdělení, které představuje příjezdy vozidel do obslužného systému, jakým je křižovatka. Dále je v kapitole uveden Markovův rozhodovací proces, který vyjadřuje diskrétní náhodnou posloupnost, kde výskyt stavu v bezprostřední budoucnosti závisí na stavu, ve kterém se stochastický proces nachází v současnosti.

Dále je v kapitole teorie hromadné obsluhy, která vysvětluje teorii front jako řazení vozidel do řad, kdy cílem je zjištění závislostí mezi vstupními požadavky (přijíždějícími vozidly), produktivitou linek a efektivitou obsluhy. Část telematiky v kapitole popisuje využití technologií v dopravě pro optimalizaci různých činností v dopravě a dále uveden popis detektorů silničních vozidel, které jsou nezbytné pro zjištění informací o dopravním proudu v reálném čase k dalšímu použití.

Kapitola nadále pojednává o fuzzy logice, která se vhodně uplatnila v rozhodování v systémech s mírou neurčitosti. Část kapitoly popisuje principy fuzzy logiky a jsou zde uvedeny i modely z technických univerzit na řízení křižovatek s fuzzy řadičem, který je schopen regulovat světelné signály podle počtu vozidel v jízdnicích pruzích.

Závěrem tato část je teoretickým shrnutím potřebných znalostí k řízení provozu podle zatížení dopravního proudu a další kapitola se věnuje internetu věcí, který umožní vzájemnou komunikaci fyzických prvků v navrhovaném modelu řízení křižovatky s podporou sítě internetu věcí.

3 Telekomunikační sítě s podporou Internet of Things

3.1 Internet věcí – Internet of Things, IoT

Diplomová práce se nadále zabývá internetem věcí, ve zkratce IoT. V této kapitole je seznámení s internetem věcí, který je podstatnou součástí komunikační sítě křížovatek v následujících kapitolách.

3.1.1 Pojem a úvod do internetu věcí

Termín internet věcí (Internet of Things) poprvé zazněl v Chicagu v září 2003 na sympoziu EPC (Evolved Packet Core), kdy Auto-ID Centrum spustil počáteční vizi EPC sítě pro automatickou identifikaci a sledování toku zboží v dodavatelském řetězci (Uckelmann et al., 2011, s. 2).

Internet věcí je koncept, ve kterém virtuální svět informační technologie se plynule spojuje se skutečným světem věcí. Skutečný svět se stává přístupnější skrze počítače a síťová zařízení v obchodní sféře, tak jak tomu je v každodenním životě. S takto dostupnými a dobře zpracovanými informacemi může management nezávisle od rozsáhlejší úrovně až k nejnižší úrovni řídit, plánovat či vykonávat. Nicméně internet věcí není jen výrobní nástroj pro řízení výrobního procesu k vyšší výkonnosti a efektivitě, ale také otevírá cestu k více pohodlnému životu. Díky modernímu postupu miniaturizace a klesajících nákladů RFID (identifikace na rádiové frekvenci), síťových senzorů, NFC, bezdrátové komunikace, technologiím a programům, internet věcí se konečně stal vhodný pro průmysl i koncové uživatele (Uckelmann et al., 2011, s. 2).

Výraz internet věcí byl poprvé použit v Massachusetts Institute of Technology v roce 1999. Výraz byl zde použit ve smyslu systému sítě autonomní interakce a samoorganizovaní objektů a procesů, od nich se očekává vést komunikační sblížení fyzických předmětů s digitálním světem internetu. Výraz prodlužuje myšlenku internetu, jako globálně propojenou síť počítačů se sítí, kterou popisuje, jako síť propojených věcí, jakými jsou každodenní předměty, výrobky a věci okolního prostředí (Uckelmann et al., 2011, s. 134).

Výraz internet věcí není zcela podrobně definován, jedna definice byla formulována v roce 2009 na CERP (The Cluster of European Research Projects), avšak není postačující.

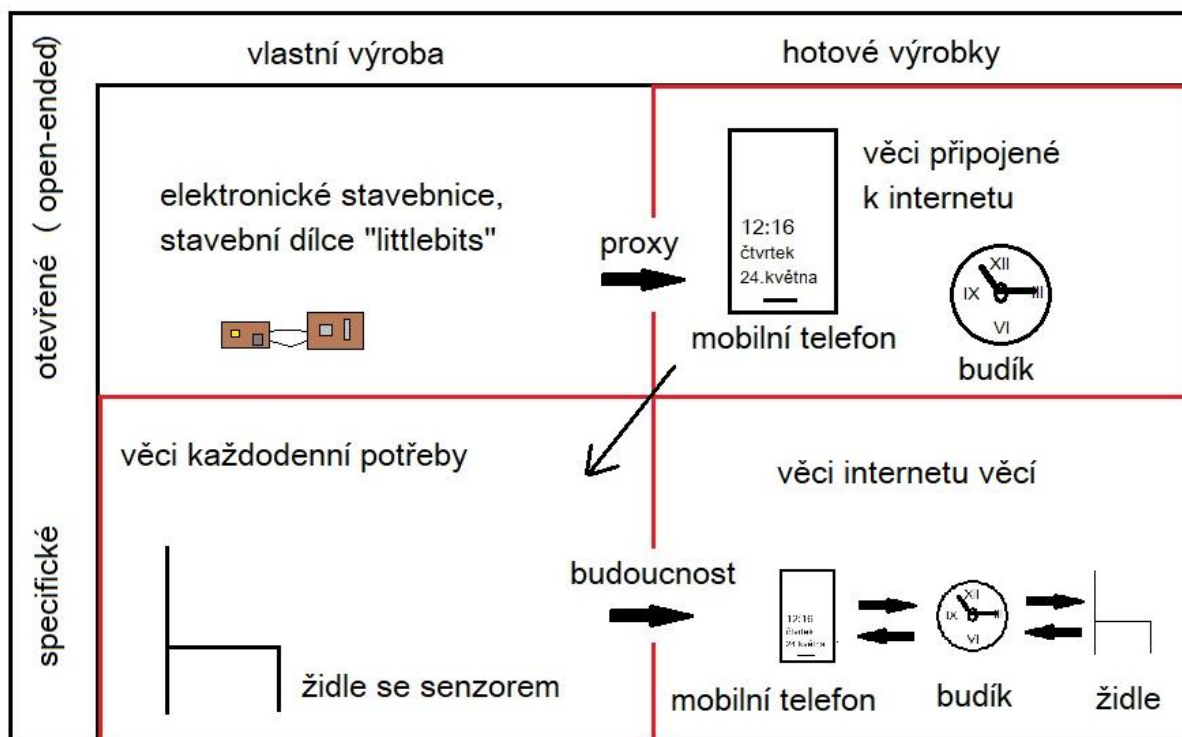
Definice zní: „Internet věcí (IoT) je propojená část internetu a mohla by být definována jako dynamická globální infrastrukturní síť s vlastní konfigurovanou schopností založená na standardu a interoperabilitě komunikačních protokolů, kde fyzické a virtuální věci mají identifikaci, fyzické vlastnosti a virtuální zosobnění a užívají inteligentní rozhraní a jsou bezproblémově integrovány do informační sítě. Očekává se, že internet věcí se stane aktivním účastníkem v byznysu, informačním a společenském procesu, kde věci jsou schopny vzájemně na sebe působit a komunikovat mezi sebou a i s okolím skrze výměnu dat a podáváním informací. Zatímco věci reagují autonomně s reálným světem, vytvářejí se události, které jsou samovolně spuštěny, buď přímým vlivem, nebo bez přímého vlivu člověka“ (Uckelmann et al., 2011, s. 4).

Jiná definice internetu věcí je odvozena z logistiky, kde se tážeme po správném zboží, ve správné kvalitě, ve správném čase, na správném místě, ve správném stavu a za správnou cenu. V této analogii správné zboží souvisí k určení přesné a vhodné informace o unikátní identifikaci fyzického předmětu, tak jako je tvar, stav a vlastnost. Toto zahrnuje použití automatické identifikace (Auto-ID) a odpovídající senzor nebo nějaký jiný druh informačního spojení s předmětem, který je schopen přijmout informaci skrze internet věcí. Správná kvalita může být dosažena skrze hlubší detail informace v kombinaci s filtrováním a inteligentním zpracováním. Správný čas neznamena nutně kdykoliv, ale přesněji „když je potřeba“. Může být postačující obdržet informaci o předmětu pouze jednou za den či v případě změny stavu. Podobně správné místo neznamena kdekoliv, ale místo, kde informace je potřeba nebo je použita, nemusí se jednat o stejné místo, kde byla informace vytvořena. Jestliže informace není použita na stejném místě, kde byla vytvořena a obě místa mají přerušené nebo nespolehlivé spojení, pak synchronizování protokolů a ukládání dat do paměti pro urychlení čtení dat „caching techniques“ může být nezbytné k zajištění dosažitelnosti informace na správném místě. Správný stav informace je splněn, pokud je využit s minimálním úsilím. Toto zahrnuje čitelnou informaci, jak pro člověka, tak stejně sémantickou a syntaktickou informaci čitelnou pro stroj, což může na vyžádání požadovat transformaci dat nízké úrovně (pravděpodobně z více zdrojů) do smysluplných informací a dokonce může vyžadovat rozpoznání vzorku a další analýzu k identifikaci vzájemného vztahu mezi dvěma procesy a trendy ve vygenerovaných datech. Správná cena není automaticky nejnižší cena, ale cena mezi náklady na zajištění informace a dosažitelnou tržní cenou. Dodání informace zahrnuje mzdové náklady a náklady na infrastrukturu. Krátká definice neobsahuje nic víc než věci, internet a spojení mezi nimi. Věci jsou identifikovatelné fyzické předměty nezávislé na technologii, která je použita pro identifikaci, nebo pro poskytnutí stavu informace z předmětů a jejich okolí. Internet v tomto případě odkazuje na všechno, co jde mimo extranet, což vyžaduje přístup k informacím pro více než malou skupinu lidí, tudíž v takovém případě se

jedná o extranet věcí. Internet pojednává o nakládání a komunikační infrastruktuře, která nese virtuální reprezentaci věcí v propojení s příslušnou informací s předmětem. Kombinací různých přístupů můžeme usuzovat, že budoucnost internetu věcí spojuje jednoznačně identifikovatelné věci s jejich virtuální reprezentací obsaženou v internetu nebo spojení s další informací k jejich identifikaci, stavu, lokalizaci, veřejné nebo soukromé informaci při finančních platbách, které přesahuje úsilí o poskytování informací a nabízí informace účastníkům, kteří nejsou předem definováni. Poskytnuté přesné a vhodné informace by měly být ve správné kvalitě a stavu, ve správném čase a místě za správnou cenu (Uckelmann et al., 2011, s. 7).

Představení sociálně kulturní praxe – proved' sám „Do it Yourself“ (DiY), jak je zřejmé ve společnosti a v diskuzi, co DiY může znamenat pro internet věcí. Představujeme typologii, jak lidé mohou vytvořit a přizpůsobit internet věcí. Ze společenské praxe DiY mnoho ovladačů a adoptivních modelů může být odvozeno tak, že mohou být aplikovány na podobné lidmi řízená díla internetu věcí (Uckelmann et al., 2011, s. 37).

Náš model na obrázku 7 uspořádává chytré „smart“ předměty podle jejich tvůrce a účelu. Někdy tvůrce individuálně vyrobí věc k osobnímu použití, zatímco v jiných případech tvůrcem je průmyslový činitel, který vyrábí předměty pro masovou spotřebu. Na obrázku 7 můžeme označit předměty vyrobeny svépomocí a předměty hotové k použití. Účel „smart“ předmětu může hrát roli v aplikování, nebo dokonce ve větším záběru aplikací může sloužit jako komponenta jedné specifické aplikace. Můžeme je nazvat jako předměty s otevřeným koncovým zařízením oproti specifikovaným „smart“ předmětům (Uckelmann et al., 2011, s. 48).



Obrázek 7 - Klasifikace „smart“ předmětů podle výroby a účelu (Uckelmann et al., 2011, s. 48)

Obrázek 7 je vyplněn současnými příklady chytrých „smart“ předmětů. V horním levém kvadrantu je platforma elektronicky mezi sebou snadno propojených stavebních dílců tzv. „littlebits“, jako příklad chytrého „smart“ předmětu, který je vyroben individuálně skrze kombinaci různých elektronických komponent k účelu vytvoření aplikace, kterou si člověk vymyslel. V protějším kvadrantu dole vpravo vidíme příklady chytrých předmětů, které jsou průmyslově vyrobeny pro specifickou oblast. Jedná se o „smart“ předměty připojené k internetu s aplikacemi jako je ranní budík a spojení se sociální sítí. Nejdůležitějšími kvadranty pro diskuzi o internetu věcí je kvadrant vpravo nahoře a dole vlevo. V kvadrantu vpravo nahoře jsou příklady hotových výrobků připravených k použití a s otevřenými koncovými zařízeními, které se skládají jako modulární stavebnice, z nichž můžeme sestavit samostatné předměty v kombinaci s jinými částmi stavebnice. V kvadrantu vlevo dole jsou předměty, které mohou rozšířit každodenní předměty pro specifické aplikace, příkladem je židle vybavená senzorem, která detekuje osobu, zda na židli sedí či nikoliv. Pokud síť spojených sensorů si vymění data v internetu věcí, jejich použití kontext musí být znám pro každého, co tato interakce předmětů znamená (Uckelmann et al., 2011, s. 49).

3.1.2 Nástroje pro přístup ke koncovému uživateli v internetu věcí

V minulosti v 60. letech 20. století skupina vizionářů viděla velký potenciál v povolení sdílení informací mezi počítači. První síť, ARPANET, byla vyvinuta pro velmi speciální účel, spojení počítačů na univerzitách na jihozápadě Spojených států. Tato síť byla pro počítačové odborníky, vědce a pro vládní a vojenské účely. Komerční využití bylo zakázáno až do 80. let, kdy hlavní zlom přišel představením World Wide Web. Nově navržený protokol dal přístup k informacím veřejnosti vkládáním hypertextu do internetu. Druhá generace internetu, nazývaná Web 2.0 nebo sociální web, s její klíčovou podporou technologií Ajax, Wiki, Blog, RSS a Atom, se stala pokročilejším systémem, rychlejší a zvýšila přístup k veřejnosti. Začátky internetu se měnily rychle a nyní se stále ještě vyvíjí. Nová síť internetu věcí poskytuje vkládání dat reálných věcí do služeb propojené sítě a reaguje mezi sebou. Tyto předměty mohou uložit kontext, jsou mezi sebou propojeny sítí. Jednoduchý a nákladově efektivní systém identifikace je vyžadován. Identifikace na rádiové frekvenci „Radio Frequency Identification“ (RFID) nabízí tuto funkcionalitu. Na tomto konceptu mnoho tradičních průmyslových odvětví jako je logistika, výroba a obchod, zvýšily svoji efektivitu produkce realizací chytrých zařízení skrze RFID a technologií čárových kódů. Náklady základních RFID štítků za několik let klesnou zhruba na \$ 0,05 za jeden čip. Nejpoužívanější identifikační technologie v logistickém systému je RFID s EAN a EPC (Uckelmann et al., 2011, s. 65, 66).

Nyní existují sady, které umožní každému se zúčastnit internetu věcí. Typický software pro koncové uživatele s programovacími vlastnostmi by měl mít editor, kompilátor a interpret, kontrolu chyb, nástroje ladění, dokumentaci. Minimálním požadavkem je nástroje pro správu. Nyní je mnoho programů pro koncové uživatele, ale v internetu věcí je tento koncept docela nový (Uckelmann et al., 2011, s. 77).

Jedním příkladem je sada Arduino. Arduino je sada výpočetní techniky, má jednočipový počítač (mikrokontrolér) a je to kombinovaná software/hardware platforma s otevřeným zdrojem, může přijmout různé druhy senzorů a může ovlivnit svoje okolí kontrolou světel, motorů a jiných členů (aktuátorů). Mikrokontrolér je na desce a je naprogramovaný v jazyce Java. Arduino podporuje připojení k počítači skrze USB kabel, nebo může běžet samostatně. Arduino nabízí vše, co je potřeba pro výpočetní techniku. Sada pracuje s napětím 7-12V (Uckelmann et al., 2011, s. 78).

Druhým příkladem je Make Controller Kit, jednočipový počítač, který je otevřeným zdrojem a je schopný připojit různé senzory, motory a připojení k síti LAN a připojení k počítači přes

Ethernet a přes USB, nebo může běžet samostatně. Programovací jazyk je C, sada pracuje s napětím 6 – 12 V (Uckelmann et al., 2011, s. 80).

3.1.3 Autonomní kooperace logistických procesů

Koncepty a technologie internetu věcí se stávají důležitou výzvou na poli logistiky. Na současném globalizovaném trhu ve stavu urychlujících strukturálních změn, tradiční supply – chain se vyvíjejí do složitých sítí s mnoha účastníky. Struktura zboží, logistika a její vnitřní a vnější vztahy a vazby, charakterizují tyto změny. Za prvé nastal odklon od masové produkce, který směřoval k převisu nabídky nad poptávkou. Tento odklon způsobil trend k individuálnímu přizpůsobení výroby a v tom důsledku navýšení kusových zásilek. Za druhé nastal přesun k silniční nákladní dopravě a tím vzrostla poptávka po přepravě zásilek s vysokou kvalitou služeb se spolehlivým datem splatnosti. Za třetí, vlivem individualizace dopravy na mikrologistickou úroveň, spolupráce je vyžadována mezi poskytovateli logistických služeb k uspokojení požadavků zákazníků. Tyto tři vlivy vedou k dramatickému zvýšení složitosti a dynamiky logistického procesu (Uckelmann et al., 2011, s. 131).

Výzkum v autonomní kooperaci logistických procesů ukazuje, že rozdílné řídicí problémy umělé inteligence vznikají z různých aplikací řídicích prvků vyúsťujících do širokého spektra stupňů autonomie s příslušnými požadavky vůči charakteristikám zahrnutých v inteligentních logistických procesech, tak jako zpracování základních dat, rozhodování a strategie integrování dat. To znamená, internet věcí opravdu prospívá k autonomnímu logistickému řízení na operační úrovni. Věci nepotřebují pouze komunikovat mezi sebou, ale také je vhodně zahrnout do celkového prostředí informačních technologií (Uckelmann et al., 2011, s. 132).

Inteligentní výrobky jsou fyzické a informační předměty, které mají jedinečnou identifikaci, jsou schopné komunikovat efektivně se svým prostředím, jsou schopné ukládat data a schopné se rozhodovat podle vlastních schopností. Stupeň inteligence inteligentního výrobku se může projevit zpracováním jednoduchých dat ke složitému proaktivnímu chování (Uckelmann et al., 2011, s. 135).

Autonomní řízení je proces decentralizovaného rozhodování ve struktuře sítí prvků se společným cílem. To předpokládá interakci elementů v nedeterministických systémech, které mají schopnost a možnost rozhodovat nezávisle. Výraz autonomní je popsán jako schopnost systému, procesu nebo věci navrhnout svůj vstup, výstup jako předvídavou odpověď na měnící se parametry v prostředí. Použití autonomního kooperace logistických procesů je

očekáváno ke zvýšení robustnosti, efektivity, přizpůsobení a odpovědi na měnící se prostředí, požadavky a změny nebo částečně na konfliktní cíle. Přední charakteristikou je decentralizace zodpovědnosti rozhodování v kontrastu s tradičním, hierarchických řízením. Dynamická síť prvků, ve které jsou pasivní logistické subjekty vybaveny schopností zpracování informace k provedení rozhodnutí podle sebe, nahradí přísně centralizovaný management vedený od shora dolů, tradičního logistického řízení. Umělá inteligence je pověřena učinit svůj nejlepší záměr v mezích svoji operační, taktické a strategické autonomie. Inteligentní logistické objekty jsou materiální a nemateriální položky logistické sítě, které mají schopnost interakce s jinými logistickými objekty v považovaném systému (Uckelmann et al., 2011, s. 136).

Internet věcí je založen následujících schopností:

- jedinečnosti identifikace,
- schopnosti vnímat a uchovat informaci o jejich kondici. Kondice je stav předmětu, získaný interpretací výstupním senzorem převodníku,
- schopnosti realizace informace (být identifikován, stav, jiné atributy) jiným externím subjektům,
- schopnosti komunikace s jinými objekty,
- schopnosti rozhodnutí o sobě a v interakci s ostatními objekty,

(Uckelmann et al., 2011, s. 168).

Architektura internetu věcí potřebuje být podpořena infrastrukturou, která propojuje všechny architektonické komponenty. Touto infrastrukturou by měl být současný internet jako hlavní páteř, internet jako nejrozšířenější počítačová globální síť infrastruktury, již je dostupná dnes.

Předpokládejme, že lokální síť může komunikovat s internetem věcí transparentně, buď přímo s podporou internetového protokolu (IP), nebo skrze bránu, která přeloží protokoly do použitelného stavu pro internet. Bránou infrastruktury se rozumí výpočetní zařízení, které slouží jako přemostění lokální sítě do infrastruktury internetu.

3.1.4 Ukládání dat – Clustering

Porozuměním internetu věcí jako nové generace internetu, ve kterém více a více objektů a věcí bude propojeno globálně. Očekává se, že množství dat a informací vygenerovaných a vyměněných, extrémně poroste. Distribuovaná data internetu věcí mohou být uložena v objektech samotných nebo v online úložištích a mohou existovat v připojené či částečně

připojeném prostředí. Z tohoto pohledu je synchronizace dat mezi předměty a úložištěm nezbytná (Uckelmann et al., 2011, s. 166).

Ohledně dat samotných synchronizace zahrnuje různé typy informace, aby byla zajištěna konzistentnost. Data o objektu zahrnují informace popisující objekt, bezpečnost dat zahrnuje informace o kontrolním přístupu k informaci o objektu, událost dat zahrnuje informaci o historii objektu. Znalosti o struktuře, syntaxi a sémantice, o informaci objektu jsou požadovány k filtrování dat a musí být synchronizovány.

Pro adresování internetu věcí jsou následující požadavky:

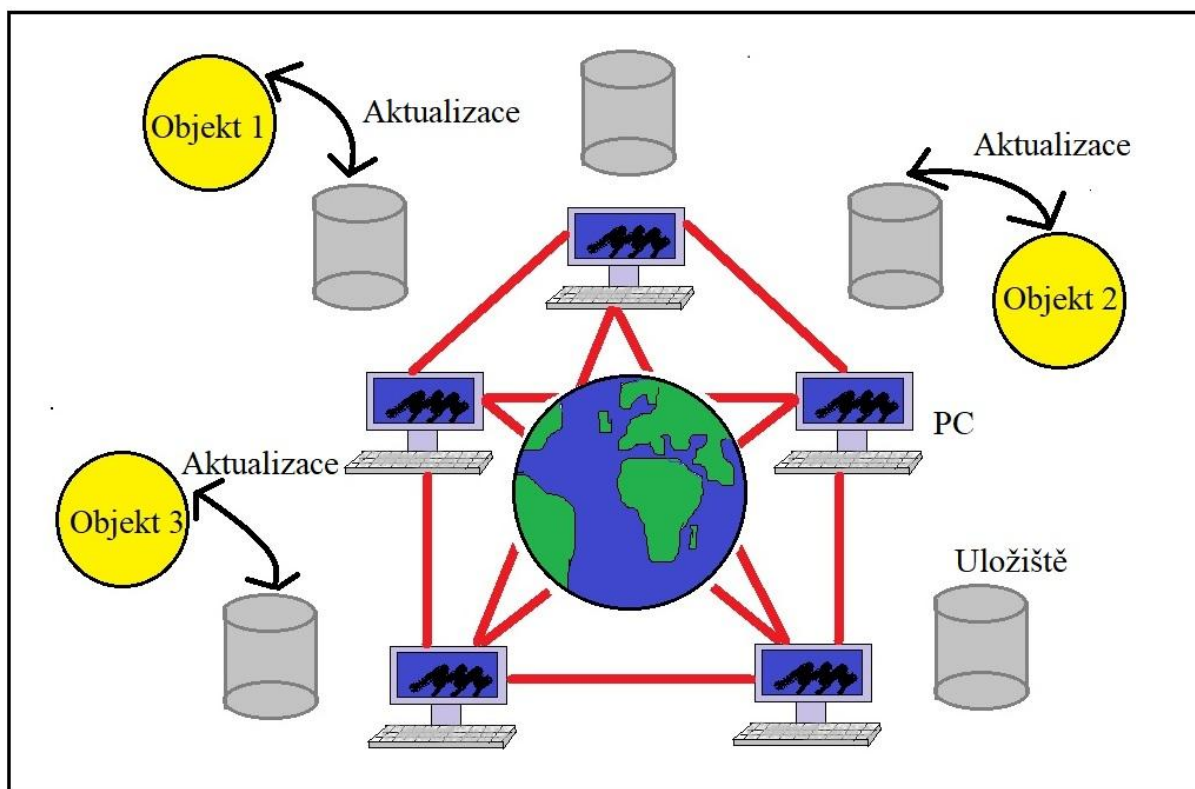
- adresy musí být unikátní uvnitř sítě,
- adresy musí být znovu použity, když předměty opustí,
- adresy musí být dynamické, přiřazování adres mělo by být plně distribuováno,
- adresy musí být škálovatelné, rozšířitelné,
- podpora sítě pro sloučení a rozdělení měla by být poskytnuta,
- „protokol overhead“ paměť pro ukládání informací o zprávě, musí být minimalizovaný,

(Uckelmann et al., 2011, s. 178).

Synchronizace dat internetu věcí záleží na dostupnosti spojení v rámci architektury sítě, ve které se věci pohybují.

Jsou zde tři typy architektury, které musí být zkoumány. První je připojená architektura (internet), druhá je oddělená infrastruktura (intranet, extranet), třetí je nepřipojená architektura (lokální zdroje). Obrázek 8 znázorňuje architekturu internetu (Uckelmann et al., 2011, s. 182).

Připojená architektura, internet je globálně distribuovaná síť počítačů, která nese mnoho služeb a informačních zdrojů. Předpokládá se, že zdroje jsou vždy připojeny ke sdílení a k aktualizaci informací. Věci, které jsou připojeny v síti, nepotřebují speciální synchronizační metody, protože informace od věcí může být aktualizována na jakémkoliv místě uvnitř sítě v reálném čase (Uckelmann et al., 2011, s. 182).



Obrázek 8 - Architektura internetu (Uckelmann et al., 2011, s. 183)

EPC (Electronic Product Code) globální architektura jako návrh pro implementaci internetu věcí podporující dodavatelský řetězec, je založena na připojené architektuře. Objekty mohou být identifikovatelné podle Electronic product code, zatímco informace jsou uloženy v distribučních úložištích. Zachycení a přístup informací vyžaduje stabilní síťové připojení (Uckelmann et al., 2011, s. 183).

Oddělená infrastruktura, internet a extranet mohou být typy oddělené sítě. Jsou založeny na stejné technologii jako internet, ale jsou k dosažení pouze uvnitř v uzavřeném prostoru (intranet) nebo se speciálním ověřením (extranet). Vedle oddělené sítě jsou částečně nepřipojená zařízení, jako mobilní zařízení, která jsou nepřipojena během aktualizace, například během údržby. Data budou aktualizována v mobilním zařízení a musí být synchronizována k podobným informačním zdrojům, když mobilní zařízení bude opět připojeno (Uckelmann et al., 2011, s. 183).

Nepřipojena architektura, mnoho věcí, které reagují s internetem věcí, nemůže být spolehlivě připojeno ke komunikační síti. To může být zapříčiněno chybějícími technickými zdroji, jako například jsou vzdálené oblasti nebo technickými omezeními, které nemohou povolit připojení k internetu, jako jsou nebezpečné výrobní oblasti. Mobilní zařízení by mohla být použita k výměně informací mezi nepřipojenými objekty a jinými síťovými zdroji (Uckelmann et al., 2011, s. 184).

Internet věcí musí vyřešit výměnu informací v heterogenní distribuční síti s charakteristikami všech tří architektur. Proto je důležité identifikovat všechna rozhraní pro informační výměnu, definovat mechanismy synchronizace k zajištění konzistence dat a zabezpečení. Integrita a zabezpečení internetu věcí jsou velmi důležité, protože mnoho různých uživatelů bude požadovat data a manipulovat s mnoha datovými zdroji. Proto je potřeba zaručit, aby žádná data nebyla zmanipulována ani zničena neautorizovanými osobami (Uckelmann et al., 2011, s. 189).

Celý internet může být chápán jako obrovská distribuční heterogenní databáze. Internet věcí se může rozšířit do enormní databáze s novými možnostmi informační výměny. Z podobnosti mezi internetem věcí a systémem databází je nezbytné vyzkoumat technické požadavky databází podle charakteristické architektury internetu věcí. Internet věcí bude potřebovat strategii řízení dat, která poskytne stejné úkoly řízení dat v databázích s ohledem na speciální potřeby (Uckelmann et al., 2011, s. 186).

Někdy je internet věcí zobrazován jako nejasná vize neznámých technologií, ale není to ani budoucí vize, která je vzdálená jako utopie, ani technologický průlom, jako byl vynález rádia nebo televize. Je to reálná předpověď budoucího vývoje ze současného technologického rozvoje, expanze architektury a obecného trendu pokročilých komunikačních online zařízení. Budoucí internet věcí bude používat stejné algoritmy a protokoly, na kterých je založen současný internet (Uckelmann et al., 2011, s. 196).

3.1.5 Protokoly

Pokročilé komunikační senzory schopné technologií bezdrátových sítí (Wireless Sensor Network - WSN) procházejí napříč mnoha prostory moderního života. Toto nabízí schopnost měřit, usoudit a porozumět okolnímu prostředí od ekologických a přírodních zdrojů k městskému prostředí. Rychlé rozšiřování těchto zařízení v komunikační síti vytváří internet věcí (IoT), kde senzory a aktory se spojují s okolním prostředím kolem nás a informace je sdílí napříč platformami (Gubbi et al., 2013, s. 1).

Protokoly koncových snímačů internetu věcí budou hrát klíčovou roli v kompletní realizaci. Formují páteř pro datový tunel mezi senzory a okolním světem. Aby systém pracoval výkonně a úsporně, MAC protokol a vhodný směrovací protokol jsou klíčovými protokoly. Některé MAC protokoly byly navrženy pro různé domény s TDMA, CSMA a FDMA schémata, dostupné uživatelům. Žádný z nich není přijat jako standard a více „věcí“ dostupných tomuto scénáři vede k zahlcení systému, což vyžaduje další výzkum (Gubbi et al., 2013, s. 13).

3.2 Propojení světelných křižovatek v telekomunikační síti internetu věcí

V této části kapitoly jsou uvedeny schémata na řízení křižovatek s podporou internetu věcí, je zde i popsána Kernerova třífázová teorie dopravy.

3.2.1 Propojení světelných signalizačních zařízení na křižovatce

Křižovatka je místo, kde se pozemní komunikace protínají nebo spojují. Pozemní komunikace před křižovatkou se dělí do jízdnic pruhů. V jízdnic pruzích jsou zabudovány indukční cívky. Indukční cívka vytváří kolem sebe magnetické pole. Když přes magnetické pole přejede vozidlo, tím že je vozidlo z kovu, změní se magnetická indukce a tento jev detekuje přijíždějící vozidlo. Tento stav změny magnetické indukce je přenesen a zaznamenán do zařízení jménem radič. Radič je umístěn u křižovatky a přijímá informace od senzorů indukčních cívek o změně magnetické indukce. Radič podle změn magnetické indukce spočítá počet aut v jízdnic pruhu a tyto data přepoše do střediska řízení provozu křižovatek. Ve středisku řízení provozu křižovatek je software na zpracování dat odeslaných z jednotlivých křižovatek a software vygeneruje vhodnou signalizaci na takto telekomunikačně propojených světelných křižovatkách a tento software odeše signály řidičům pro jednotlivé křižovatky, tím si každá křižovatka mění světelné signály v závislosti na vyhodnocení centrálního softwaru. Toto propojení křižovatek a řízení světelných signálů z centrálního softwaru, ve výsledku znamená zredukování čekací doby stání vozidel před křižovatkou s velkou intenzitou provozu.

Návrh a tvorba propojené křižovatky

- zavedení detekce dopravního provozu,
- identifikace jízdnic směrů v křižovatce,
- určení délky světelných signálů podle intenzity provozu,
- adaptace jízdnic směrů,
- přenos signálu.

Na dopravním modelu křižovatky kontrolní systém dopravního provozu sleduje situaci na křižovatce a na podmínkách dle dopravní situace jsou světelné signály přizpůsobeny podmínkám podle silničního provozu. Automatizace může pomoci zmírnit kongesci na křižovatkách. Pokud je v jízdnic pruhu více vozidel, světelný signál „volno“ se časově prodlouží a střídání časových délek světelných signálů řízení provozu na křižovatce rychleji

vozidla na křižovatce odbaví. Řazení vozidel do jízdních pruhů podle směru jízdy před křižovatkou zvyšuje účinnost odbavení vozidel a zmírňuje se riziko kongescí. V automatizované křižovatce mají vozidla s právem přednosti jízdy prioritu přednosti jízdy, která je zajištěna skrze senzory zachycující radiovou frekvenci zapnutého výstražného varovného zařízení (majáku) a pro ostatní vozidla je v prostoru křižovatky světelný signál „stůj“, pro pohotovostní vozidlo s právem přednosti jízdy se světelným signál „volno“. Řešení křižovatky je znázorněno na obrázku 9.



Obrázek 9 - Řízení běžné křižovatky a řešení provozu na křižovatce s detekcí dopravního provozu a automatického přizpůsobení světelných signálů (Zdroj: Autor)

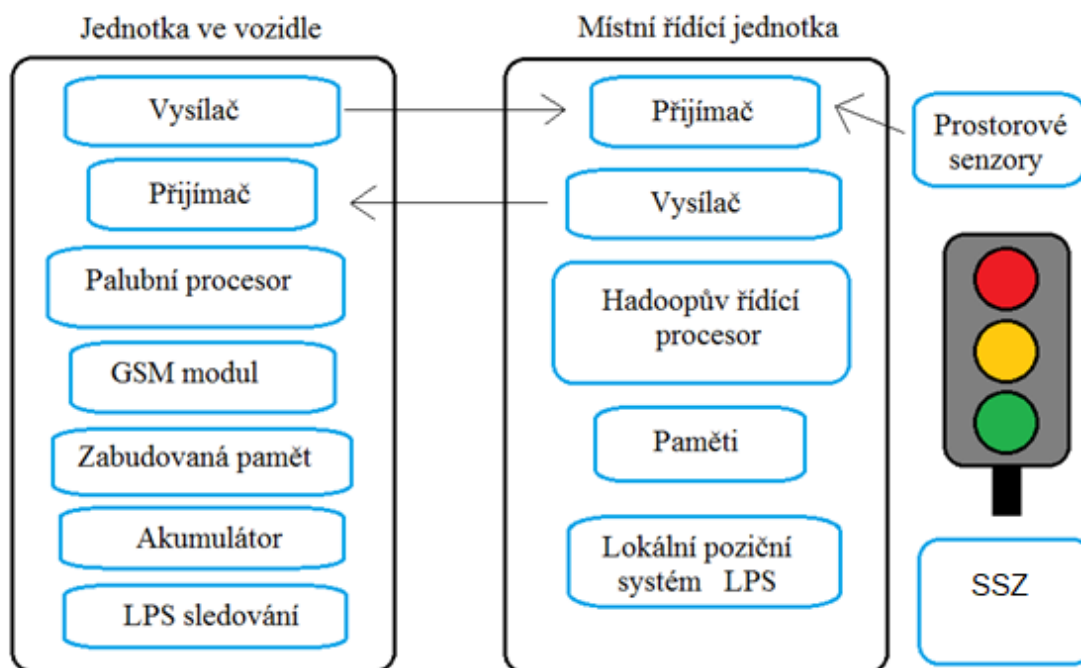
3.2.2 Řízení provozu s Internet of Things

Internet věcí je jednoduše řečeno spolupráce (interakce) mezi věcmi, které v tomto případě znamená komunikace mezi vozidly a centralizovanou řídicí jednotkou a SSZ. Následující rovnice zobrazuje jednoduchý popis IoT.

$$\text{IoT} = \text{fyzická entita} + \text{řadiče, senzory, aktory} + \text{internet}$$

Internet věcí může být porovnán s komunikací mezi lidmi. Například, lidé mají biologické senzory, jako jsou oči, uši, kůži, chuťové buňky atd. ke vnímání toho, co se děje v jejich okolí. Aby věci mezi sebou komunikovaly tak, jak komunikují lidé mezi sebou, musí senzory být připojeny k fyzickým objektům, musí být identifikovatelné, musí přijímat a vysílat data

postupně, aby se nezahltily, vyžaduje se mezi nimi digitální komunikace. Následující obrázek 10 je zaměřen na komunikaci mezi vozidly, řídicí jednotkou a SSZ. V tomto případě každé vozidlo hraje roli jakoby „očí“, které odesílají dopravní data. Komunikace je založena na způsobu spojení dvou uzlů na síti s komunikací předmětů mezi sebou (socket programming) přes připojení WiFi, porty jsou jako „ústa“ a „uši“, které vysílají a přijímají. Identifikace vozidla je na způsobu RFID (Lakshminarasimhan, 2016, s. 4, 5).



Obrázek 10 - Navrhovaný systém komunikace vozidel s lokální řídicí jednotkou v síti IoT
(Lakshminarasimhan, 2016, s. 5)

Diagram na shora uvedeném obrázku 10 reprezentuje řízení toku komunikace mezi dvěma subjekty (Flow Control) v navrženém systému. Při komunikaci je podstatné, aby jeden ze subjektů nezahltil druhý subjekt, a aby se subjekt nedostal do stavu, kdy nestíhá zužitkovat to, co druhý subjekt posílá. Systém se skládá ze dvou součástí, jednotkou ve vozidle a lokální řídicí jednotkou. Jednotka ve vozidle má přijímač a vysílač, který vysílá a přijímá rádiové vlny. Lokální řídicí jednotky jsou umístěny v pracovních stanicích (workstations), které přijímají data z vozidel a vysílají signály každému vozidlu v oblasti dosahu prostoru technologie RFID. Vestavěná jednotka ve vozidle je napájena elektrickou energií z autobaterie. Koncový uživatel může se systémem s drátovým nebo bezdrátovým připojením pomocí chytrého telefonu s vestavěným modulem GPS. Drátové připojení znamená, že uživatelé mohou připojit chytrý telefon k doku ve vozidle, kde jako

v bezdrátovém případě se chytrý telefon spáruje s vestavenou jednotkou skrze Bluetooth. Uživatelské rozhraní ukáže hustotu dopravy na silnici a přilehlá parkovací místa.

Lokální řídicí jednotka pošle data včetně lokalizace vozidla, rychlost vozidla a jiné atributy. Místo GPS systém používá LPS k lokalizaci vozidla na silnici. V GPS systému je lokalizace určena trojstranně, což znamená překrytí přijímaného signálu ze tří různých satelitů zaměřených do určité oblasti. Zatím co GPS systém, který lokálně vyzařuje jako rádiová vysílací stanice, je schopen určit pozici vozidla. LPS systém určí lokalizaci za kratší čas s porovnáním s GPS. Lokalizace každého vozidla používaného LPS je vyslána do lokální řídicí jednotky, kde řídicí jednotka sdílí obdržené informace s ostatními řídicími jednotkami. Analýza dat je vykonána použitím MapReduce k určení dopravního proudu v regionu a kontrole světelné signalizace. Toto pomůže odhadnout stupeň manévrovatelnosti v regionu na základě informací ze zasíťovaných silnic a z dalších sdílených parametrů (Lakshminarasimhan, 2016, s. 5, 6).

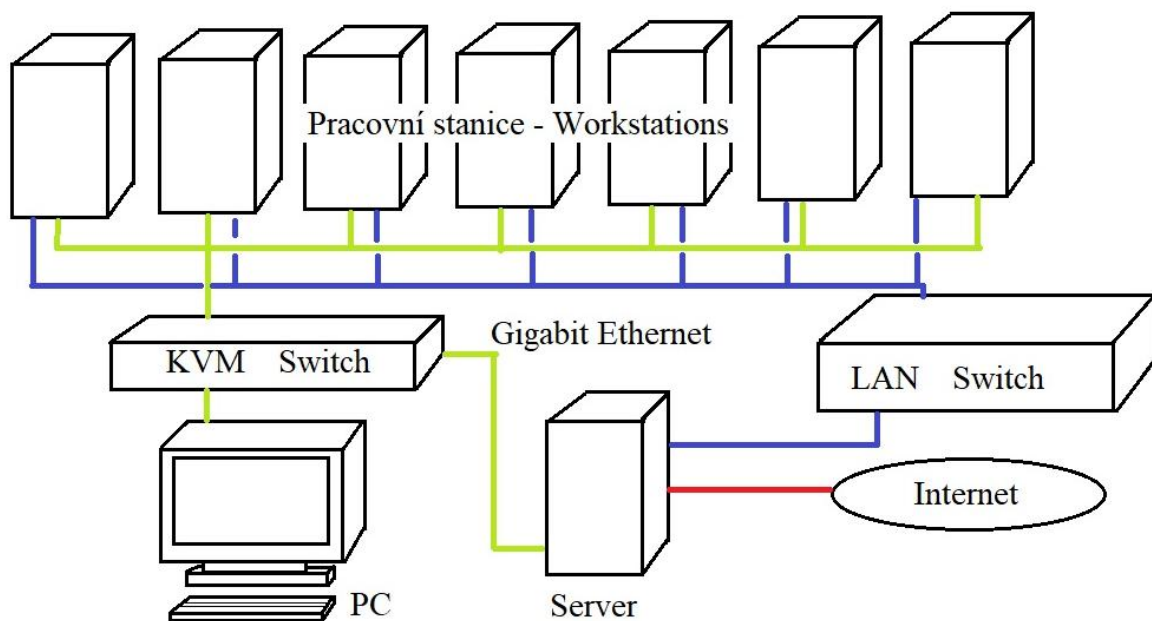
MapReduce je výpočetní vrstva v rámci technologie Hadoop. Úlohy MapReduce přistupují k datům, která jsou distribuována na webu nebo v datových centrech, rozdělují je do více replikovaných dílů a jejich zpracování pošlou na jednotlivé uzly, servery (Burian, 2014, s. 90).

Každý nedostatek ve zpracování dat v tradičním dopravním řízení může být překonán s pomocí Big Data. Dopravní řídicí systém se zavedenými Big Data může spravovat obrovské množství komplexních a rozdílných dat. Big Data vyřešily tři otázky: ukládání dat, analýzu dat a správu dat. Nástroj Hadoop byl vyvinut pro schopnost ovládat masivní množství dat. Data jsou uložena v různých uzlech, obrovská data jsou rozdělena do malých úloh, co řádek to úloha. Ke každému řádku se vygeneruje klíč a ve druhém kroku se řádky se stejným klíčem sumarizují do konečného výsledku. V navrhovaném systému jsou lokální řídicí jednotky v pracovních stanicích (workstations), tyto pracovní stanice přijímají signál od vozidel. Přijatá data jsou analyzována použitím Big Data implementovaných v Hadoop (Lakshminarasimhan, 2016, s. 6).

Big Data mohou zlepšit bezpečnost v dopravě. Schopnost zpracování dat v reálném čase může odhadnout vznik dopravních nehod pro svoji schopnost předvídat z výskytu dopravních kongescí. Použitím detekčního systému rádiových vln, systému dohledových kamer a systému detekce na pohyb, je možné vybudovat bezpečnostní model ke zlepšení bezpečnosti silničního provozu (Lakshminarasimhan, 2016, s. 7).

Následující obrázek 11 zobrazuje architekturu vrstev analýzy dat navrhovaného systému, který se skládá z lokální řídicích jednotek umístěných v pracovních stanicích (workstation). Tyto pracovní stanice přijímají průběžně signály od vozidel související s konkrétním místem

dosahu pracovní stanice. Přijatá data jsou analyzována Big Daty implementovaných v Hadoop. Tento nástroj používá technologie za účelem zpracování dat, nejprve jsou příchozí data prvně „zmapována“ užitím mapovací funkce a následně jsou data rozdělena do různých řádků a zkráceny o informace, které jsou připomenuty v dalším zpracování dat. Zredukováná data jsou distribuována napříč různými pracovními stanicemi podle lokace. Výsledek zpracování dat se okamžitě odráží odpovídajícím způsobem na systému řízení světlených křižovatek (Lakshminarasimhan, 2016, s. 7).



Obrázek 11 - Architektura vrstev analýzy dat (Lakshminarasimhan, 2016, s. 7)

Efektivnost provozu na silnici lze určit z průměrné rychlosti různých vozidel pohybujících se na silnici. Průměrná rychlost je rychlost každého vozidla, která je měřena v oblasti a nikoliv jednom bodě. Průměrná rychlost může být vypočítána použitím následující rovnice:

$$V_{\text{průměrná}} = \frac{n \cdot s}{\sum_{i=1}^n (t_{\text{end}} - t_{\text{start}})} \quad (18)$$

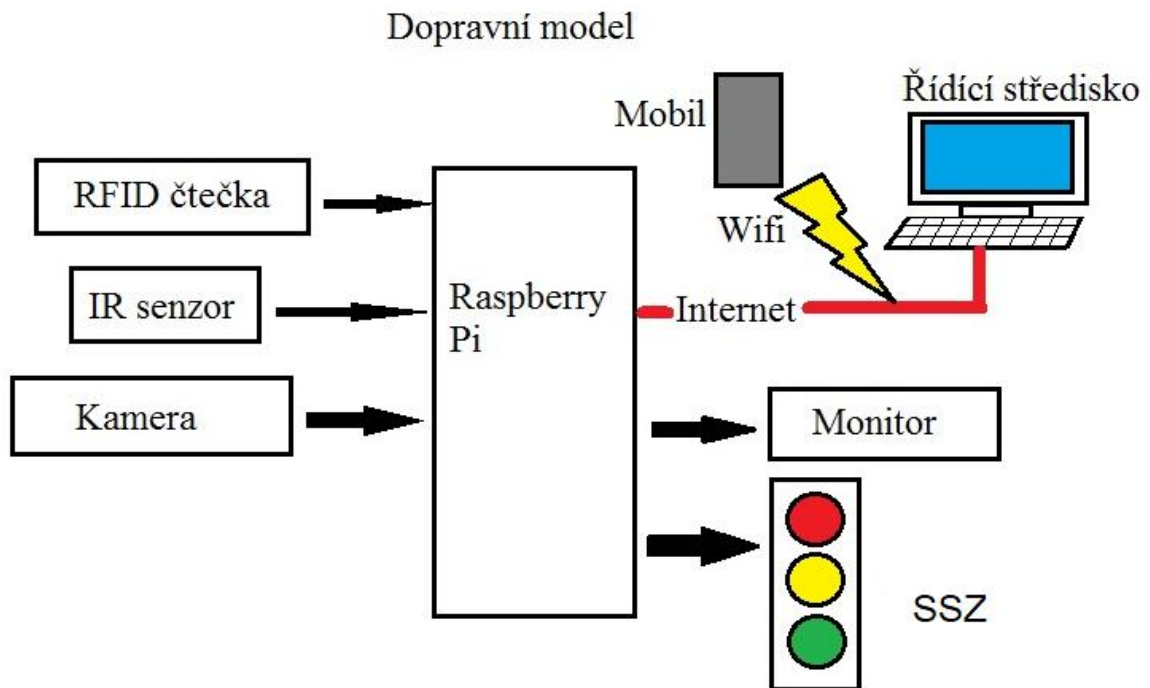
kde: s – je vzdálenost mezi dvěma body na silnici, mezi nimiž je průměrná rychlost počítána, n – počet vozidel projíždějících po silnici v měřené oblasti za časový úsek, t_{start} – čas, kdy vozidlo vjelo do měřené oblasti, ve které se začíná měřit průměrná rychlost, t_{end} – čas, kdy vozidlo opouští měřený úsek, ve kterém končí měření průměrné rychlosti (Lakshminarasimhan, 2016, s. 8).

Jeden aspekt by měl být brán v úvahu. Pokud vozidlo vjede do měřeného úseku v jeho prostřední části, musí být vyřazeno z výpočtu, jinak by to vedlo k nepřesnosti výpočtu průměrné rychlosti (Lakshminarasimhan, 2016, s. 9).

3.2.3 Inteligentní řízení dopravy založené na IoT

Tento návrh inteligentního řízení dopravy založeného na IoT pochází z Technického institutu v Bengaluru v Indii. Ve vzrůstající dopravě jsou kongesce hlavní problém a prodlužují dobu cestování. Návrh byl vyvinut použitím bezdrátové technologie s PIC mikrokontroléru, IR senzoru a XBee. IR senzor byl použit na vyhodnocení dopravní intenzity a časování světelných signálů. XBee poskytuje zelenou vlnu pro vozidla IZS. Tento model je navržen pro automatický mód obsluhy. Algoritmus byl navržen tak, aby více vozidel projelo na signál. Vozidla IZS jako jsou ambulance, hasičské vozy a jiné by měly mít prioritu průjezdu světelnou křižovatkou. Hlavní priorita je pro vozidla IZS a druhořadá priorita je pro běžná vozidla. Priorita dokonce záleží na hustotě dopravy na silnici vedoucí ke křižovatce. Silnice s vyšším počtem vozidel by měla mít nejvyšší prioritu. Ze současné situace účinné řešení problému není ještě dokonáno. Proto byl navržen tento prototyp za účelem poskytnutí účinného řešení (Vijentha a Nataraj, 2017, s. 707).

Navrhovaný systém má automatický a manuální mód. V automatickém módu záleží na výstupu ze senzorů k rozhodování o řízení křižovatky. V manuálním módu máme kontrolu nad řízením křižovatky a řízení je prováděno autorizovanou osobou v řídicím středisku. K identifikaci vozidel IZS a odcizených vozidlech je použita technologie RFID. Kamera monitoruje dopravu v prostoru křižovatky, na kamerové monitorování dohlíží autorizovaná osoba v řídicím středisku, která rozhoduje o převzetí řízení křižovatky v manuálním módu. Vše k řízení křižovatek je vedeno v systému Raspberry Pi. Ve Velké Británii byl vyvinut počítač Raspberry Pi, má socket Broadcom SOC a grafickou jednotku GPU. GPU běží na 700 Hz – 1,2 GHz, RAM je 256 MB a 1 GB paměti, pro rozhraní kamery má CSI, USB kabel napájí systém Raspberry Pi, pro připojení monitoru má HDMI port a také má video a audio jack a 4 USB sloty. Navrhovaný systém je znázorněn na obrázku 12.



Obrázek 12 - Dopravní model Raspberry Pi (Vijentha a Nataraj, 2017, s. 708)

RFID je technologie, která data převede bez komponentů externího připojení. RFID má čtečku a čip. Unikátní číslo je přiděleno pro každý čip. RFID má 2 čipy, aktivní a pasivní. V našem navrhovaném systému používáme pasivní čipy, pasivní čip nemá zdroj energie. Když pasivní čip se přiblíží k dosahu čtečky, vzájemnou induktancí se čip nabije ze čtečky, která je připojena ke zdroji energie. Z paměti pasivního čipu se unikátní číslo přeneso do čtečky. Čip pouze ukládá identifikační číslo, navíc nemá kapacitu paměti (Vijentha a Nataraj, 2017, s. 708).

IR senzor používá infračervené paprsky neviditelné pro lidské oči. IR senzor vysílá a přijímá. Infračervené paprsky jsou vysílány k předmětu, pokud je předmět přítomen, paprsky se odrazí a odraz paprsků je zachycen IR přijímačem. Tímto způsobem můžeme identifikovat, jak daleko je předmět. Provozní napětí je 5 Voltů (Vijentha a Nataraj, 2017, s. 708).

Kamera snímá prostor křižovatky ve vysokém rozlišení, natáčí videa a pořizuje snímky. Kamera je připojena k Raspberry Pi portem CSI. Zjištění počtu vozidel v jízdním pruhu bude aplikováno IR senzory v určitých vzdálenostech. První IR senzor se umístí po x metrech od křižovatky, druhý IR senzor se umístí ve vzdálenosti $x + 5$ metrů a třetí IR senzor se umístí ve vzdálenosti $x + 10$ metrů od křižovatky. Když je doprava příliš zatížená a všechny tři senzory identifikují vozidla, znamená to, že doprava je přetížená a signalizace „volno“ je rozšířena na 60 vteřin. Pokud jsou aktivní IR senzory první a druhý, znamená to, že doprava

je středně zatížená a signalizace „volno“ je po dobu 45 vteřin. Pokud je aktivní jen první IR senzor, znamená to, že doprava je mírná a signalizace „volno“ je zkrácena na 30 vteřin. Vozidla IZS budou mít na palubě RFID karty a číslo karty bude uloženo v řídicím středisku. RFID čtečka je umístěna u posledního třetího IR senzoru, přečte RFID kartu, číslo z karty je porovnáno s číslem v řídicím středisku a po autorizaci čísla je v křižovatce nastavena zelená signalizace pro projetí vozidla IZS. Autorizovaná osoba sleduje provoz na křižovatce skrze kamerový systém a je oprávněna přepnout řízení křižovatky do manuálního módu (Vijentha a Nataraj, 2017, s. 709).

3.2.4 Řízení křižovatek podle na Kernerových tří fází teorie dopravy

Podle několika studií mohou světelné křižovatky za polovinu dopravních zácp a také za polovinu znečištění, špatně řízené křižovatky mohou v tomto případě až ztrojnásobit spotřebu paliva, především CO₂ emise a jiné znečišťující emise, když doprava je přeplněná a příliš špatná. V našem řešení se pokusíme aplikovat Kernerovy tři fáze dopravní teorie k realizaci synchronizovaného systému založeného na inteligentním přepravním systému, který poskytne automatické řízení světelných křižovatek a k tomu komunikaci založenou na konceptu IoT pro různé řadiče SSZ schopných spolupracovat mezi sebou. Ačkoliv role informační a komunikační technologie (ICT) není plně definována, je nervovým systémem každého inteligentního města, koordinuje mezi různými komponenty a fyzickou vrstvou (Anass et al., 2016, s. 40).

ICT je základem, kdy inteligentní služby mohou spolupracovat účelně a optimálně. Prvním účelem tvoření IoT a vývoje jejich mechanismů je udělat zařízení více autonomní a nezávislé než, aby byly pod přímou kontrolou člověka a dovolit později sledování a dálkové ovládání těchto zařízení podle jejich pole působnosti. Se senzory je možno získávat informace a data z fyzického světa. Díky IP, mohou být data ze senzorů přístupná kdekoli na světě v reálném čase a to dává příležitost vytvořit chytrá „smart“ zařízení (Anass et al., 2016, s. 40).

Nyní se zaměříme na síť VANET (Vehicular Ad Hoc Networks) jako v oboru mobilních sítí. Tento typ sítě je charakterizován vysokou mobilitou, komplexností sítě spočívající v rozdílech mezi rychlostmi vozidel a permanentní změny v síťové topologii. Prvním typem komunikace je V2V, vozidlo komunikuje s vozidlem nebo s vozidly. Druhým typem komunikace je V2I, vozidlo komunikuje s infrastrukturou, komunikace je založena mezi zabudovaným vybavením infrastruktury a vozidlem v bezdrátovém dosahu infrastrukturního zařízení. Tato forma komunikace nabízí zlepšení bezpečnosti na silnicích, dopravní účinnosti a zlepšení životního prostředí.

Mezi hlavními cíli konceptu dynamického řízení jsou:

- dynamický algoritmus pro řízení světelné signalizace,
- představení navrhované technologie k zajištění hladkého toku dopravy,
- použití VANET převzatý z metropole Casablanca v Maroku.

V důsledku rostoucího automobilizmu a vzrůstajícího počtu obyvatel, dopravní zácpy mají ekonomický, sociální a environmentální důsledky. K tomu se přidá snížení rychlosti dopravního provozu, dopravní zácpy jsou hlavním zdrojem znečištěného ovzduší a zvýšené spotřeby paliva a přeplněné dopravy ve městech s vypouštějícími emisemi, vede ke skleníkovému efektu. Doba jízdy se prodlužuje a spotřeba paliva roste. Studie ukazují, že zácpa může na jednom místě vyprodukovat CO₂ emise 850 tun za rok. Každým rokem doprava roste exponenciálně s rozvojem městských částí v rozvojových zemích (Anass et al., 2016, s. 41).

Teorie tří fází v dopravě je alternativní teorie, dopravní model vyvinutý Kernelem v roce 1996 a 2002. Tento model odlišuje tři fáze dopravy, na rozdíl od klasických teorií založených na základním diagramu dvou fází – volného toku a kongesce. Fáze je definovaná jako stav v čase a v prostoru. Kernerova teorie rozděluje kongesce na dvě různé odlišné fáze, synchronizovaný tok a pohyblivá kongesce (wide moving jam).

Kernerova teorie navrhuje tři fáze:

- fluid regime (**F**) – režim volného toku,
- synchronizovaný režim (**S**),
- široce pohyblivou kongescí (**J**), (wide moving jam).

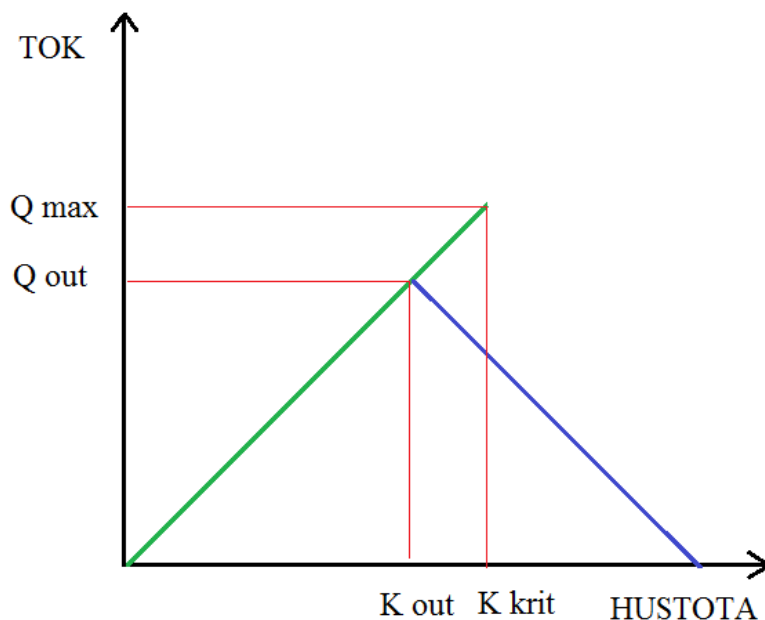
Fluid regime (F), pozitivní korelace se objeví empiricky mezi tokem q (počet vozidel za časový úsek - intenzita) a hustotou (počet vozidel na jednotku prostoru). Tento vztah dává horní limit a odpovídá kritické hustotě K_{krit} (Anass et al., 2016, s. 42).

V dopravní zácpě je rychlost vozidla menší než minimální rychlost V_{min} . Hodnota sklonu minimální rychlosti:

$$V_{min} = \frac{q_{max}}{K_{krit}} \quad (19)$$

v režimu volného toku rozděluje empirická data do dvou oblastí: nalevo na data volného toku a vpravo na data odpovídající dopravní zácpě (Anass et al., 2016, s. 42).

Na obrázku 13 je hodnotu sklonu minimální rychlosti (modrá barva na obrázku) rozdělující data na grafu toku-hustoty na dvě oblasti, režim volného toku nalevo a vpravo režim kongesce.



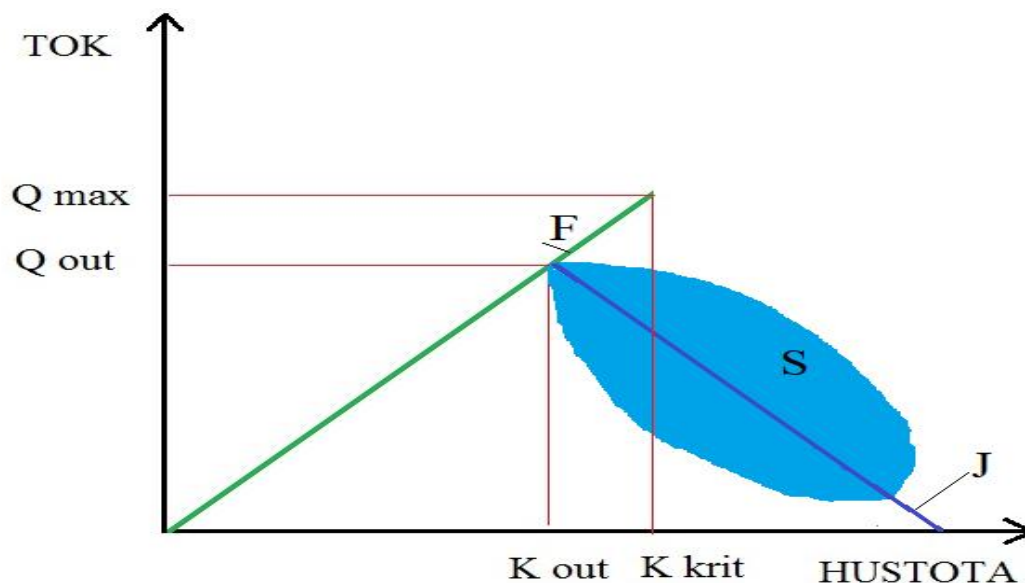
Obrázek 13 - Schéma pozorování toku v závislosti na hustotě (Anass et al. 2016, s. 42)

Široce pohyblivá kongesce (J), kongesce je široká, když průměrná rychlost pohybu V_g po směru jízdy je udržována a rychlost vozidel uprostřed dopravní zácpy je nulová.

Průměrná rychlost vozidla je mnohem nižší, než je běžná rychlost v systému. Po směru jízdy vozidla zrychlují a přesouvají se do volné jízdy (do režimu volného toku), naopak v opačném směru do počátku kongesce nově přijíždějící vozidla přecházejí z volné jízdy do dopravní zácpy a snižují rychlost, až téměř zastavují (Anass et al., 2016, s. 42).

Synchronizovaný režim (S) na rozdíl od široce pohyblivé kongesce se průběžně pohybuje bez zastavování, vozidla jezdí jinou rychlostí v jízdnicích pruzích, jako by to byla mnohoproudá silnice v jednu směru (Anass et al., 2016, s. 42).

Na obrázku 14 je znázorněn vztah mezi tokem a hustotou v dopravě, pokud doprava houstne, snižuje se hodnota toku až na hraniční mez, kde je definována dopravní kongesce. Oblast S vyznačuje synchronizovanou kongesci, kde vozidla popojíždějí v jízdnicích pruzích a bodem J se vyznačuje široce pohyblivá kongesce, kde vozidla zastavují a rozjíždějí se a opět zastavují, doprava je přetížena s velkou hustotou vozidel. Písmeno F (Free Flow) vyznačuje volný pohyb vozidel až na rozhraní k počátkům kongescí.



Obrázek 14 - Tři fáze ve schématu toku a hustoty (Anass et al., 2016, s. 42)

V Kernerově metodě, stav silničního provozu je vypočítán ze dvou parametrů, z hustoty a toku, tyto dva parametry tvoří hranici mezi volným průjezdem a kongescí. V navrženém modelu jsou senzory nainstalovány na krajích dvou protínajících se silnic a měří oba parametry, tato data jsou vysílána do ovladače SSZ, ovladače jsou umístěny v blízkosti křižovatek. Ovladač počítá data a určí stav na obou silnicích. Pokud je dopravní zácpa na silnici, nastaví zelenou signalizaci a na druhou nastaví červenou signalizaci. V tomto případě je nezbytné rozlišovat mezi kongescí synchronizovanou a široce pohyblivou kongescí podle Kernerovy teorie. Cílem je vyvarovat se možnosti vzniku široce pohyblivé kongesce (Anass et al., 2016, s. 43).

Podle hydrodynamické analogie je průměrná rychlost vozidla v proudu definována jako podíl intenzity k hustotě:

$$V_{\text{průměr}} = \frac{q}{k} \quad (20)$$

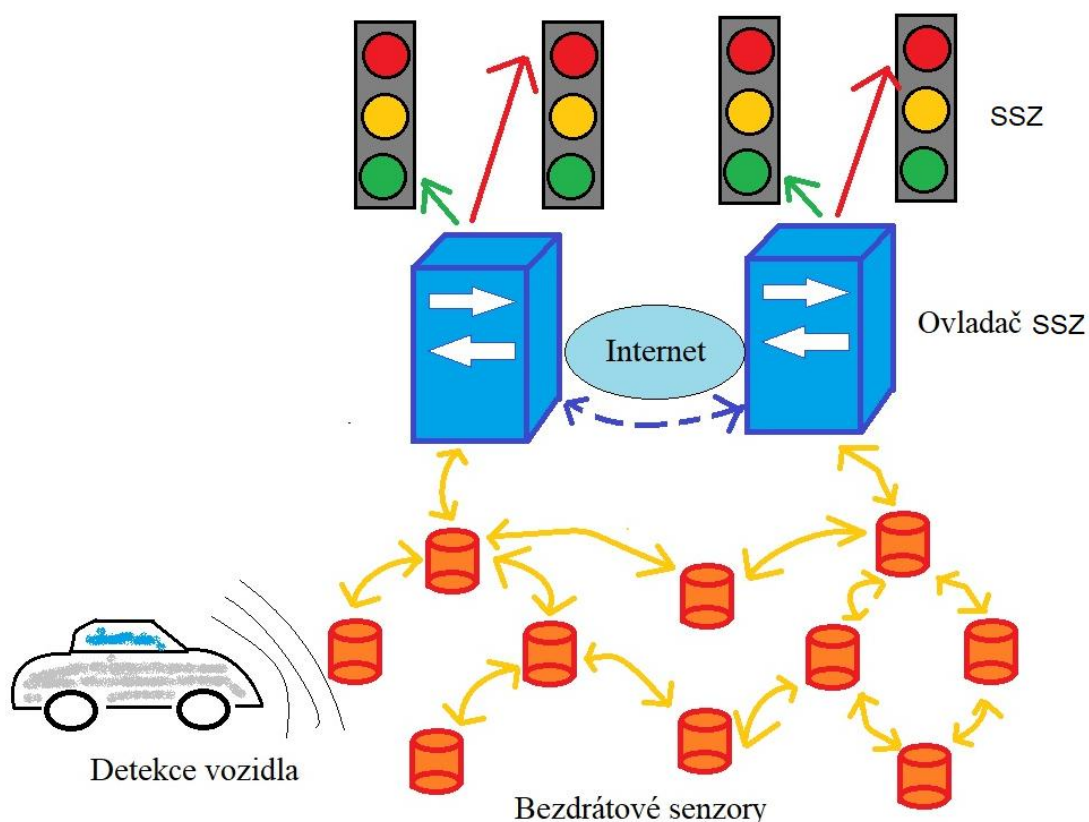
kde k je hustota, a q je průtok. Pro průtok 2000 vozidel za hodinu a pro hustotu 50 vozidel na kilometr, průměrná rychlost dopravního proudu je $2000/50 = 40$ km/h. Pokud hustota roste, průměrná rychlost klesá a naopak, když hustota klesá, průměrná rychlost roste. Průměrná rychlost je monotónně klesající funkce hustoty. Pak musíme určit práh kritické hustoty, k určení zda doprava je průjezdná či je v kongesci. Pokud je naměřená hustota menší než určená hustota kritická, je doprava průjezdná. Následující nerovnice ukazují průjezdnost a kongesci v závislosti na hustotě v porovnání s kritickou hustotou:

$$K < K_{krit} \quad \text{průjezdná doprava,} \quad (21)$$

$$K > K_{krit} \quad \text{kongesce.} \quad (22)$$

Pokud je naměřená hustota větší než určená kritická hustota, doprava je v kongesci (Anass et al., 2016, s. 43).

Na obrázku 15 je znázorněno schéma architektury IoT pro řízení křižovatek. Kolem silnice jsou senzory, které sbírají data od vozidel a data přepošlou do ovladače. Mezi vozidly a senzory probíhá komunikace na úrovni V2I, vozidlo komunikuje s infrastrukturou. Ovladač je součástí každé světelné křižovatky a ovládá světelnou signalizaci. Ovladače jsou mezi sebou propojeny přes internet a mezi sebou komunikují, předávají si informace o zatížení silnic a vyhodnocují dopravní stav, za jakých podmínek provedou synchronizaci mezi sebou a tím odbaví nejzatíženější jízdní pruh mezi křižovatkami.



Obrázek 15 - Architektura IoT pro řízení křižovatek (Anass et al., 2016, s. 43)

Tento návrh zobrazuje komunikaci mezi vozidly a infrastrukturou k řízení světelných křižovatek, tento postup by se dal pojmenovat jako komunikace vozidel s internetem věcí, ve zkratce V2IoT. Návrh se zaměřuje na internet věcí ke zlepšení konceptu inteligentního

dopravního systému ITS založeného na VANET komunikaci. Cílem je nabídnout dynamický algoritmus na řízení světelných křižovatek, který je založen na výpočtu hustoty dopravního proudu podle Kernerovy třífázové dopravní teorie. V tomto pohledu návrh poskytuje efektivnější řízení dopravy, lepší mobilitu, snížení výfukových plynů, kratší dobu cestování než standardní současné řízení křižovatek (Anass et al., 2016, s. 47).

3.3 Internet věcí a zlepšení životního prostředí v dopravě

Součástí kapitoly jsou i návrhy na zlepšení životního prostředí s podporou internetu věcí, kdy křižovatky jsou řízeny podle senzorů na emisní plyny. Dopravní proud, který je více zatížen emisemi, má následně delší signalizaci pro opuštění křižovatky.

3.3.1 Řízení světelných křižovatek s podporou IoT sníží CO₂ emise

Internet věcí (IoT) nabízí vzájemně připojená zařízení, která jsou připojena k internetu takovým způsobem, že zařízení mohou mezi sebou komunikovat. Taková infrastruktura se nazývá internet věcí. Zařízení, která mezi sebou mohou komunikovat, jsou mikroprocesory, mikrokontroléry, senzory, aktory a jiné. Rostoucí počet vozidel přispívá ke globálnímu oteplování. V prostoru křižovatek čekají vozidla delší dobu na signál „volno“ a vypouštějí více oxidu uhlíků, to má vliv na ozónovou vrstvu a na lidské bytí a tak dále. Aby vozidla v prostoru křižovatky nečekala dlouho na červeném signálu a řízení křižovatky bylo dynamické na základě hustoty provozu, budou vozidla spočtena pomocí ETC technologie. Na změření výfukových plynů je použit mq7 senzor, který ukazuje množství CO₂ plynů v jednotkách ppm a je připojen k internetu věcí (Telang a Terdal, 2016, s. 713).

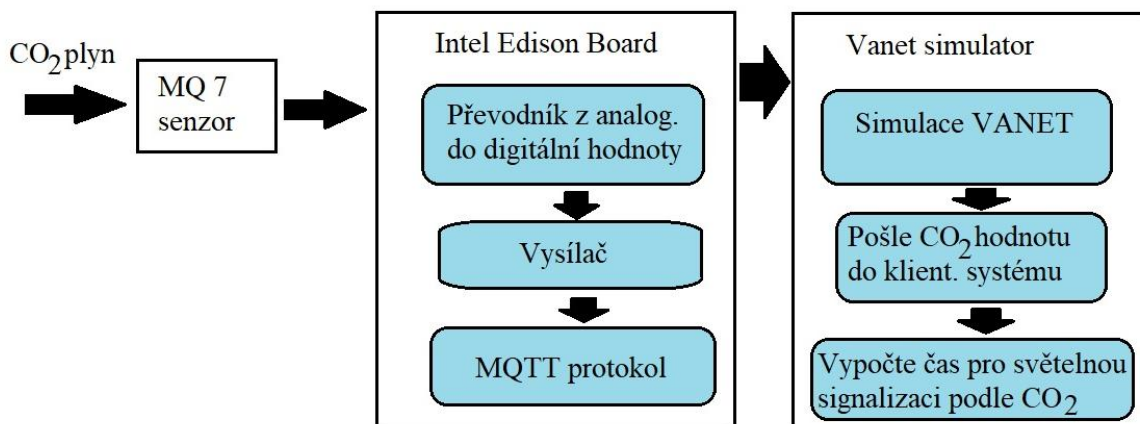
Pro řízení křižovatky na základě projetých vozidel křižovatkou je počet vozidel sledován technologií ETC (Electronic Toll Collection) systémem na automatické sbírání mýtného skrze optické skenování nebo rádiovou frekvenci, kde ETC karta je vložena do vozidla a používá palubní jednotku OBU (On Board Unit) a silniční jednotku RSU (Road Side Unit), jak je použito u mýtných bran. Tímto způsobem probíhá komunikace mezi vozidlem a infrastrukturou a získávají se data v reálném čase o situaci dopravního proudu v křižovatce a toto může být vykonáno technologií DSRC. Technologie DSRC je zdrojově otevřený protokol pro bezdrátové komunikace, podobně ve stejném ohledu jako Wifi. Zatímco Wifi používá bezdrátovou lokální síť. Technologie DSRC je zamýšlena pro vysokou bezpečnost, vysoce rychlou bezdrátovou komunikaci mezi vozidly a infrastrukturou (Telang a Terdal, 2016, s. 714).

Inteligentní dopravní monitorovací systém může zahrnovat internet věcí, cílem je zaměřením se na vozidla, která vypouštějí CO₂. To může být vykonáno třemi kroky. Za prvé, vložením unikátního EPC kódu do vozidel, které můžeme identifikovat pomocí RFID elektromagnetických vln, které pracují za jakéhokoliv počasí. Za druhé, vozidla jsou lokalizována GPS technologií. Za třetí, GPRS poskytuje vysokorychlostní komunikaci k mobilnímu uživateli a vysílá data za pohybu. Data sečtených vozidel se vysílají ze senzorů do systému, který používá genetický algoritmus. Na základě těchto informací je vypočtena délka signálu „volno“. Výpočet délky signálu je řízen dopravním proudem (Telang a Terdal, 2016, s. 714).

Inteligentní dopravní systém s IoT se skládá ze třech částí, systém senzorů, monitorovací systém a zobrazovací systém. Sensorový systém se skládá z GPS, NFC – Near Field System, teploměry, měřiče vlhkosti vzduchu a jiné, které jsou připojeny k internetu a skrze GSM najdou lokaci. Monitorovací systém vypíše přehled informací z databáze senzorů a poskytne dopravní události řidičům autobusů. Zobrazovací systém zobrazí informace o trasách a autobusech (Telang a Terdal, 2016, s. 714).

Senzor je základní zařízení, které převádí fyzické parametry do elektrického signálu. Fyzické parametry jsou teplota, vlhkost vzduchu, rychlost vzduchu, intenzita světla a jiné. Senzor Mq7 změří CO₂, CO, metan a jiné plyny z vozidel. Senzor čte pouze analogové hodnoty, proto je potřeba A/D konvertor, který převede analogovou hodnotu na digitální hodnotu. Komunikační modul MQTT protokol, který umožňuje zařízením (strojům) komunikovat mezi sebou. Je to publisher – subscriber protokol (Telang a Terdal, 2016, s. 715).

Obrázek 16 zobrazuje hardwarová zařízení. Časování světelných signálů se mění na základě hodnot emisí CO₂. Senzor MQ7 změří hodnoty CO₂, naměřené hodnoty se z analogových hodnot převedou do digitálních hodnot v převodníku. Data se odešlou MQTT protokolem do simulátoru VANET, kde se vypočte časování délek signalizace pro jízdní směry.



Obrázek 16 - Diagram návrhu řešení řízení světelných křižovatek podle emisí CO₂
(Telang a Terdal, 2016, s. 715)

Tento návrh přináší řízení světelné křižovatky, zredukování emisí městské dopravy a zredukování kongescí a činí dopravní proud plynulejší. Toho je dosaženo použitím IoT technologií, která pomáhá s řízením dopravy v reálném čase a také ve stejnou dobu se snížením znečištění výfukovými plyny a zkrácením čekacích dob (Telang a Terdal, 2016, s. 717).

3.3.2 Dohled nad emisemi s podporou IoT a řízením světelných křižovatek

Systém je navrhnout pod konceptem internetu věcí, ve kterém RFID hraje stěžejní roli. RFID je páteří internetu věcí, skládá se z drobného silikonového čipu a antény, ve které je čtečka na skenování a odesílání dat do databáze. Tímto je možné sledovat jakýkoliv předmět s unikátní identifikací a na tomto klíčovém aspektu můžeme vybudovat systém na sledování vozidel (Kinnal et al., 2015, s. 227, 228).

Systém pracuje hlavně na RFID, který se skládá ze tří hlavních částí, z čipu RFID ve vozidle, čtečky RFID a z back-end systému, který sbírá vstupy od uživatelů a z jiných systémů pro zajištění požadovaného výstupu. Komunikace začne, když čtečka RFID načte data z RFID čipu ve vozidle, data pak projdou back-end systémem přes bezdrátovou technologii. Bezdrátová telekomunikační technologie nejčastěji známá jako internet, je klíčovým faktorem této studie. GPRS nebo 3G technologie mohou být použity k doručování dat mezi systémy. 3G technologie je široce rozšířena ve městech pro komunikaci a je podobná jako GPRS technologie. RFID čipy ve vozidle sbírají data o emisích z výfuku, dva lambda senzory jsou umístěny ve výfukovém potrubí, jeden před katalyzátorem a druhý za katalyzátorem, kde měří plyny. Lambda senzory spotřebují napětí do 1 V. RFID čip uchovává pouze digitální

data a pro převod analogových dat ze senzorů na digitální data je potřeba převodník AD, následně digitální data čip může odeslat k RFID čtečce. Čtečka RFID je hlavní věcí informačního systému. RFID čtečka se skládá ze tří hlavních modulů, RFID modulu, 3G modulu a modulu datového rozhraní. RFID modul sbírá data z čipu, 3G modul vysílá data do back-end systému. Modul datového rozhraní nahradí 3G modul, když nefunguje 3D síť. Čtečka RFID potřebuje napětí 6 V a SD kartu k uložení IP adresy a jiných konfiguračních parametrů. Frekvence RFID modulu je 2,4 GHz, to je identické s mikrovlnným pásmem. Monitorovací rozsah z 50 až do 150 metrů. 3G karta je nezbytná pro přístup do 3G sítě. Každá RFID čtečka má přidělenou unikátní identifikaci pro praktické monitorování a vysílání dat do back-end systému (Kinnal et al., 2015, s. 228, 229).

Back-end systém je srdcem informačního systému. Back-end systém je v této studii rozdělen na dva servery. Server A je pro kontrolu a notificační centrum, server B je pro webhosting vlastníků ke kontrole statusu jejich vozidel. Systém je navržen tak, aby byl ekonomický a účinný. Toho je dosaženo tak, že čtečky snímají čipy z vozidel jen tehdy, když vozidla mají červenou signalizaci, pokud začne zelená signalizace, snímání čipů se zastaví. Není nutné snímat každé auto, je to plýtvání času a zredukuje se počet přenesených dat do serveru. Tento systém je mnohem spolehlivější a praktičtější. Řízení provozu na světelné křižovatce je řešeno dle zatížení silnic, vyšší prioritu má zatíženější silnice (Kinnal et al., 2015, s. 229, 230).

3.4 Přehled o internetu věcí a přístupová řešení

V této součásti kapitoly jsou uvedeny telekomunikační technologie, cloudové služby a interoperabilita IoT.

3.4.1. Představení a význam IoT

Internet věcí je důležitým tématem v průmyslu, politice a strojírenství a stal se hlavní zprávou technicky specializovaného tisku. Tato technologie přináší široké spektrum síťových produktů, systémů a senzorů, které přinášejí výhodu pokroku ve výpočetní technice, elektronické miniaturizaci a nabízí nové možnosti síťového spojení. Široká škála zařízení IoT slibuje přeměnu mnoha hledisek způsobu života. IoT systémy jako síť vozidel, inteligentní dopravní systém ITS a senzory zabudované v silnicích a mostech přinesou blíže myšlenku

„smart“ měst, které pomůže zmírnit kongesce a spotřebu energie. IoT technologie nabízí možnost podávat informace po celém řetězci výroby s pomocí senzorů (Isoc, 2015, s. 4).

Někteří vidí v IoT jako revoluci v propojeném světě pokroku, účinnosti, příležitosti, s potenciálem pro průmysl a globální ekonomii. Jiní varují, že IoT představuje temný svět sledování, porušení soukromí a bezpečí (Isoc, 2015, s. 5).

Proč je internet věcí tak nově populární téma? IoT je schopný propojit několik věcí levně a snadně:

- Připojení – nízkonákladové, vysoký přenos dat, síťové připojení, všechno činí propojitelné.
- Široké přizpůsobení IP – IP se stal dominantní globální standard pro sítě, poskytuje dobře definovanou a široce uplatněnou platformu softwaru a náradí, které může být zahrnuto do širokého záběru zařízení snadně a levně.
- Výpočetní ekonomie – řízena průmyslovými investicemi do výzkumu, vývoje a výroby.
- Miniaturizace – výroba výpočetní techniky a komunikační technologie, která se zahrne do malých předmětů.
- Výhoda v analýze dat – nové algoritmy a zvýšení výpočetního výkonu, uchování dat, cloudové služby schopné agregace, korelace a analýze velkého množství dat.
- Vzrůst cloudové výpočetní techniky pro ukládání, zpracovávání a řízení dat.

Z této perspektivy IoT nahromadil spousty výpočetních a síťových trendů, které byly vyvíjeny po mnoho desetiletí (Isoc, 2015, s. 8).

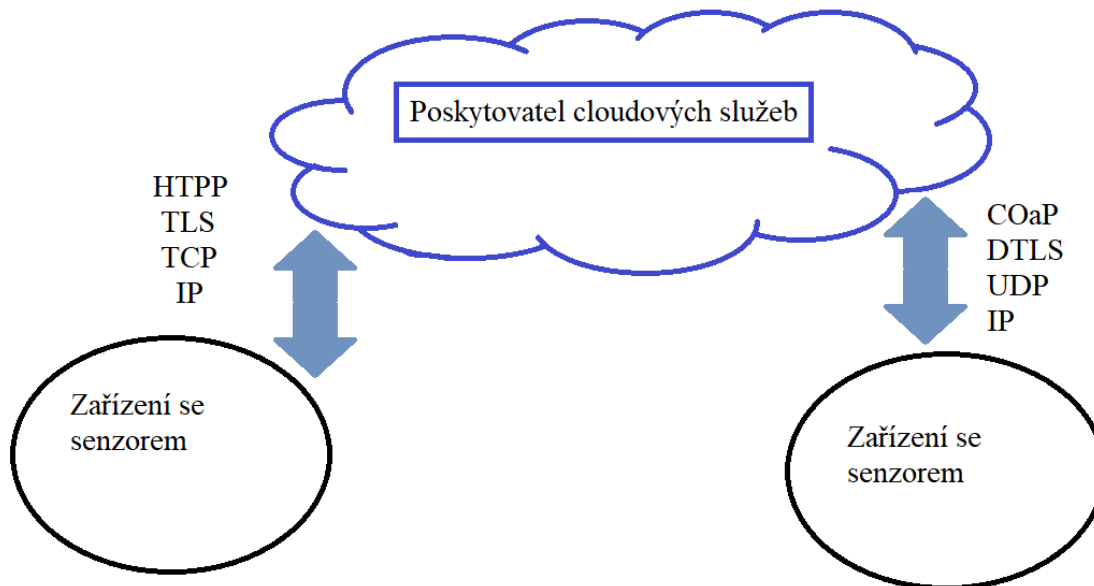
3.4.2 IoT komunikační model

Z uživatelské perspektivy je užitečné vědět jak IoT zařízení spojit, aby komunikovala v technických komunikačních modelech.

Komunikace zařízení – zařízení představuje dvě a více zařízení přímo propojených mezi sebou, tyto zařízení komunikují mezi sebou mnoha typy sítí, včetně IP sítě nebo internet. Často používají protokoly jako Bluetooth, ZigBee, Z-Wave k přímé komunikaci (Isoc, 2015, s. 13).

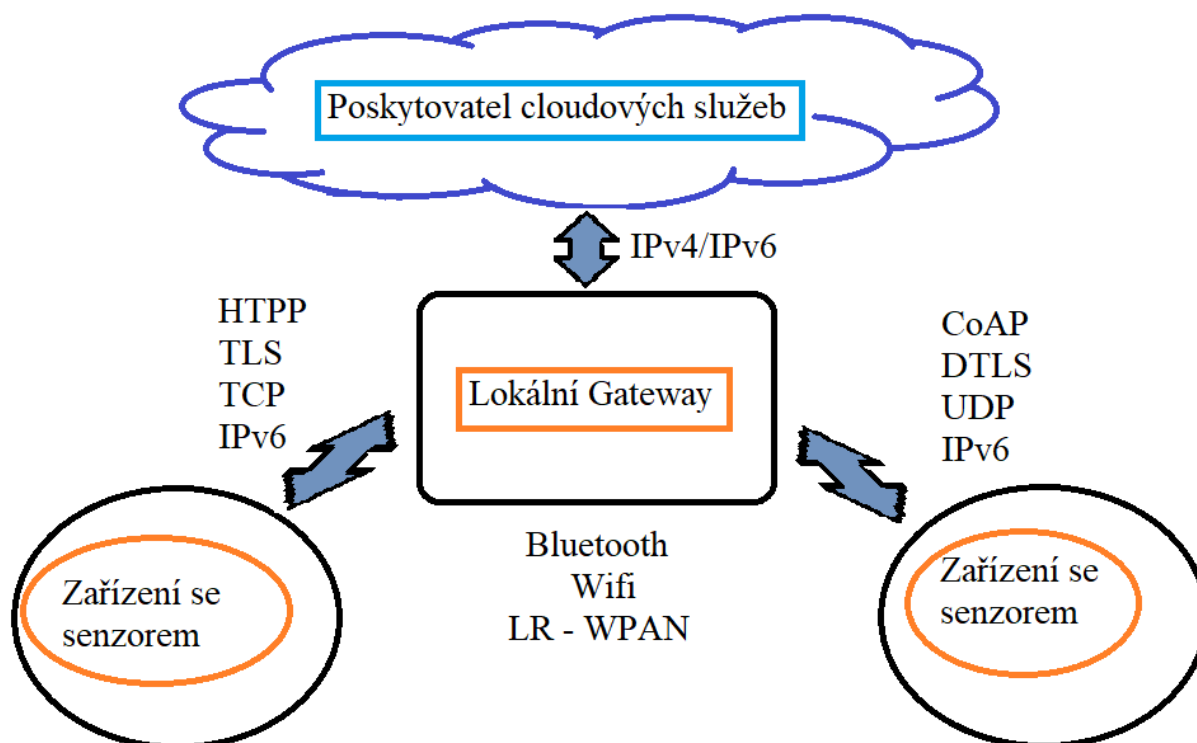
Komunikace zařízení – cloud představuje komunikační model, kde zařízení IoT je přímo spojeno s internetovou cloudovou službou k výměně dat. Tento postup dává výhodu

v existujících komunikačních mechanismech jako tradiční Ethernet nebo Wifi připojení k založení připojení mezi zařízením a IP sítí, které nakonec spojuje cloudovou službu. Komunikace zařízení s cloudovou službou je vyobrazena na obrázku 17.



Obrázek 17 - Komunikační model zařízení – cloud (Isoc, 2015, s. 14).

Model komunikace zařízení – gateway, více typický je model zařízení – aplikace – vrstva gateway (ALG). IoT zařízení je připojeno skrze ALG službu jako vedení k dosažení cloudové služby. Je zde aplikační software pracující na místním gateway zařízení, který činí prostředníka mezi zařízeními a cloudovou službou a poskytuje zabezpečení a jiné funkcionality. Tento komunikační model je vyobrazen na obrázku 18.



Obrázek 18 - Komunikační model zařízení – brána gateway (Isoc, 2015, s. 15).

Model back-end data – sdílení, tento model nabízí komunikační architekturu, která umožňuje uživatelům exportovat a analyzovat z cloudových služeb v kombinaci s daty z jiných zdrojů. Tento postup je rozšíření komunikačního modelu zařízení – cloudová služba. Back-end architektura dovoluje sbírat data z jednoho zařízení IoT a datový proud agregovat a analyzovat (Isoc, 2015, s. 16).

Z uvedených případů komunikačních modelů je model zařízení – brána gateway základem spojení pro svoje vlastnosti překonat omezení v připojení IoT zařízení (Isoc 2015, s. 18).

3.4.3 Interoperabilita IoT

V tradičním internetu je interoperabilita nejzákladnější hodnota, prvním požadavkem připojení k internetu je, zda systém komunikuje stejným jazykem protokolů a kódování. Interoperabilita je základním kamenem internetu, interoperabilita mezi IoT zařízeními a systémy se stává v různých stupních a různých úrovních s komunikačními protokoly mezi zařízeními. Mezi technickými aspekty má interoperabilita podstatný vliv na potenciální ekonomický dopad na IoT. Dobře funkční a dobře stanovená interoperabilita zařízení může povzbudit inovace a může poskytnout zdatnost pro výrobce IoT zařízení, zvýšením celé

hodnoty trhu. Navíc zavedení existujících standardů a vývoj nových standardů může nezbytně pomoci ke vstupu více zařízení do sítě, podpořit nové obchodní modely a sestavit ekonomická měřítká (Isoc, 2015, s. 29, 30).

3.4.4 Telekomunikační systémy

Přístupová komunikační řešení představují jednu z klíčových součástí dopravně-telematických subsystému. Jsou aplikovány služby buňkových mobilních sítí druhé generace GSM (Global System for Mobile communications), jako jsou DTMF (Dual-Tone Multi-Frequency), CSD (Circuit Switched Data), HSCSD (High Speed CSD), SMS (Short Message Service), USSD (Unstructured Supplementary Service Data), UUS (User to User Signaling), 2,5. generace GSM nabízí paketové služby GPRS (General Packet Radio Service) a EDGE (Enhanced Data rates for Gsm Evolution) a UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) (Zelinka a Svítek, 2009, s. 121).

Telekomunikace 3. generace LTE (Long Term Evolution). LTE navazuje na GSM/WCDMA řešení se snahou o zjednodušení a zlevnění provozu a implementace ve srovnání s předchozími evolučními stupni. LTE aplikuje plochou (flat) architekturu SAE. Tato architektura byla navržena s cílem optimalizace mobility s LTE (Zelinka a Svítek, 2009, s. 130).

Wi-Fi – IEEE 802.11 je vybavení, které dovoluje počítačům a jiným zařízením se připojit k internetu nebo komunikovat mezi sebou bezdrátově v rámci určitého prostoru (Zelinka a Svítek, 2009).

BlueTooth – IEEE 802.15.1 je standard na propojování na krátkou vzdálenost dvou či více zařízení. BlueTooth užívá neregulované pásmo 2,4 GHz (Zelinka a Svítek, 2009, s. 144).

ZigBee – IEEE 802.15.4 byl vyvinut na komunikaci mezi řídicí jednotkou a mezi jednotlivými senzory, detektory a výkonnými prvky, tedy aktory. Pracuje v otevřeném pásmě 2,4 GHz a subpásmech (868-928 MHz). Důležitým kritériem ZigBee je podpora sítě vzdálených detektorů, především nízká spotřeba, možnost vytváření dynamických sítí jednotlivých aktivních prvků a příznivý poměr cena/výkon. ZigBee má velký potenciál rovněž i u dopravně-telematických systémů (Zelinka a Svítek, 2009, s. 147, 148).

Z-Wave je síť, která byla navržena tak, aby vyhovovala sedmivrstvému síťovému modelu ISO. Základní konstrukce je navržena na osvědčených koncepcích počítačových sítí, které jsou odolné, výkonné a většina systémových návrhářů jim rozumí. Data v síti Z-Wave jsou

posílána v paketech podobných formátů Ethernet. Tato síť je založena na spojení, podobně jako Ethernet, který velmi odolným způsobem zjišťuje, aby se pakety doručily, tam kam mají (Norris, 2015, s. 127, 128).

IP (Internet Protocol) – je zodpovědný za vlastní přenos paketů ve své hierarchické struktuře, která je směrována dynamicky od směrovače ke směrovači. IP protokol je nespolehlivý protokol, nespojový protokol, používá virtuální pakety (IP datagramy). Používá se verze IP v4 a IP v6, s nárůstem zařízení IoT se počítá s IP v6 se 128 bitovými adresami na rozdíl od 32 bitového IP v4. Přenášená data nejsou chráněná proti odposlechu, nejsou šifrována ani kódována. Pokud nějaká aplikace potřebuje zabezpečení, musí si ji zajistit sama. Zabezpečení je nutné řešit na aplikační úrovni zejména ověřováním oprávnění, kódováním, tunelováním, oddělením pomocí bezpečnostních bran (Zelinka a Svítek, 2009, s. 86 - 92).

Internet je chápán jako privátní zákaznická IP síť, většinou je řešen jako soustava privátních fyzicky oddělených místních sítí LAN (Local Area Network), propojena nástroji pro tvorbu rozlehlých sítí WAN (Wide Area Network) nebo metropolitních sítí MAN (Metropolitan Area Network) [Zelinka a Svítek, 2009, s. 114].

3.5 Závěr kapitoly telekomunikační sítě s podporou internetu věcí

Kapitola je teoretickou částí a pojednává o internetu věcí, jaký je pojem a jak definovat internet věcí. Nadále je tady uvedena architektura internetu věcí, historický vývoj a schopnosti IoT. Dále se kapitola zabývá ukládáním dat a architekturou spojení infrastruktur internetu. V druhé části kapitoly jsou uvedeny návrhy a modely z technických univerzit o propojení světelných křižovatek přes IoT skrze Big Data a počítač Raspberry Pi, též dynamické řízení světelných křižovatek podle Kernerových tří fází teorie dopravy, které jsou v kapitole rozepsány.

Ve třetí části kapitoly je popsáno řízení světelných křižovatek s podporou IoT ke snížení emisí. Čtvrtá část kapitoly popisuje přístupová řešení přes cloudové služby a telekomunikační systémy, jakými jsou IP a ZigBee.

Tato kapitola seznamuje čtenáře o internetu věcí a jeho možnosti realizace, je také návodem k vypracování modelu síťového propojení křižovatek, ve kterém jsou křižovatky schopny si předávat informace o dopravních proudech a s těmito informacemi pracovat k požadovanému účelu.

4 Model křižovatky s optimálně nastavenou signalizací dle hustoty provozu

4.1 Model křižovatky a hustota provozu

Tato kapitola se zabývá rozborem dopravního proudu a optimalizací řízení světelných křižovatek pomocí teorie hromadné obsluhy a Markovovým rozhodovacím procesem.

4.1.1 Deterministický, makroskopický model

Nejdříve je potřeba si vymezit směr postupu zpracování práce, co má být předmětem nastavení signalizace podle hustoty provozu. Hlavním směrem řešení nastavení signalizace na světelné křižovatce je průjezd vozidel křižovatkou bez dlouhého čekání, tedy najít takové řešení, aby každý prvek měl minimální dobu čekání ve frontě. Na počátku se nabízí řešení otázky, co je potřeba znát k řešení dopravní situace, která se mění nahodile a nepředvídatelně, kdy blízká budoucnost nezávisí na minulosti. Model křižovatky se zaměřil na optimálně nastavenou signalizaci podle hustoty provozu a definice přídavného jména optimální podle slovníku znamená nejlepší nebo nejvýhodnější, tedy cílem je najít nejvýhodnější řešení nastavení signalizace křižovatky.

V první kapitole je na začátku uveden bodový proces, ve kterém sledujeme chod určitého jevu. V případě průjezdu náhodného vozidla křižovatkou se jedná o stochastický proces s počtem událostí $N(t)$ v časovém intervalu $\langle 0, t \rangle$. Proces je zapsán posloupností intervalů (τ) , a jestliže jsou intervaly spojité náhodné veličiny, můžeme definovat hustotu pravděpodobnosti:

$$A_k(t) = \int_0^t a_k(u) du \quad (23)$$

Stavově diskrétní stochastický proces se spojitým časem vyjadřuje počet vozidel čekajících ve frontě na obslužné jednotce. Základním diskrétní stochastický proces je Poissonův proces, který je ovlivněn náhodnými vlivy, udává počet výskytů během časového intervalu a splňuje náhodnou veličinu $X(t)$ s nezávislými přírůstky, tedy časové intervaly jsou vzájemně disjunktní. Průjezdy motorových vozidel křižovatkou mohou tvořit bodový proces s nezávislými přírůstky, ale tento proces zpravidla není regenerativní.

Deterministický, makroskopický model dopravního proudu určuje vztahy mezi veličinami, času, rychlosti, intenzity a hustoty. Kromě zjištění průměrné rychlosti na určitém úseku

komunikace, je pro hodnocení provozních podmínek znát míru změn rychlosti na určitém úseku, zjištění stálosti dopravního proudu. Akcelerace a zpomalení vozidla v průběhu jízdy je náhodná v čase a odpovídá normálnímu rozdělení. Stálost pohybu vozidla lze popsat hodnotou, která náhodné akcelerace rozptyluje kolem střední hodnoty, to znamená najít směrodatné odchylky akcelerace – akcelerační šum. Při velkých dopravních zatíženích doprovázených velkým podílem stání akcelerační šum nedostatečně reaguje na zhoršování provozních podmínek. Tento stav lépe charakterizuje rychlostní gradient (VG):

$$VG = \frac{\sigma}{vp} \quad (24)$$

kde vp je průměrná cestovní rychlost, σ je rozptyl (Lachnit, 2005, s. 7).

Rozborem charakteristik dopravního proudu na určité dráze L v pravidelných časových úsecích T , tedy rozborem časově-prostorové charakteristiky plochy L krát T , získáme vnější pohled na dopravní proud. Vypočítají se časově-prostorové veličiny:

- **intenzita** procesu I je průměrný počet událostí za časovou jednotku,
- **hustota** procesu H je průměrný počet událostí na prostorovou jednotku,
- **rychlost** v , je změna polohy tělesa v čase,

(Lachnit, 2005, s. 8).

Teorie dopravního proudu používá matematické a statistické myšlenky. Makroskopická charakteristika nazývaná **hustota** dovoluje nám mít ponětí, jak je silnice v určitém úseku zaplněná. Typicky vyjadřuje počet vozidel na kilometr nebo míli. Koncept hustoty ignoruje složení dopravy a délku vozidel, pouze nabízí abstraktní množství, a to počet vozidel. Obecně hustota může být definována jako celkový čas, ve kterém vozidla pobývají v měřeném úseku děleno délkou měřeného úseku (Maerivoet a De Moor, 2008, s. 2, 5).

Pro dopravu ve více jízdních pruzích je formulováno sčítání hustoty v úseku měřením v diskrétním čase následovně:

$$H = \frac{1}{T_{mp}K} \sum_{t=1}^{T_{mp}} \sum_{l=1}^L N_l(t) \quad (25)$$

kde H je hustota, K je délka měřeného úseku, T_{mp} je naměřená časová perioda na úseku K , $N_l(t)$ označuje počet vozidel přítomných v jízdním pruhu l a v čase t (Maerivoet a De Moor 2008, s. 6).

Zatímco hustota je typická prostorová veličina, **intenzita** je vyjádřena jako dočasná míra, typicky vyjadřuje hodnotu za hodinu, jako je počet vozidel za hodinu. Intenzita vyjadřuje

počet vozidel, která projela za periodu času. Obecně je intenzita součet vzdáleností projetych všemi vozidly v měřeném úseku vyděleno délkou úseku.

Pro dopravu ve více jízdnicích pruzích je formulováno sčítání intenzity v úseku měřením v diskretním čase následovně:

$$I = \frac{1}{T_{mp} K} \sum_{t=1}^{T_{mp}} \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^{N_i(t)} v_{i,l}(t) \quad (26)$$

kde $v_{i,l}(t)$ označuje rychlost i -tého vozidla v l -tém jízdnicím pruhu v čase t , I je intenzita, T_{mp} je naměřená časová perioda na úseku K (Maerivoet a De Moor, 2008, s. 6, 7).

Konečnou makroskopickou veličinou je **rychlost**. Obecně je rychlost vyjádřena jako součet vzdáleností projetymi všemi vozidly v měřeném úseku, děleno součtem časů vynaložených na projetí měřeného úseku. Úseková rychlost je založena na aritmetickém průměru a cestovní rychlost je založena na harmonickém průměru (Maerivoet a De Moor, 2008, s. 9).

Vzhledem k dopravnímu proudu uvažujeme o rozdílných typech operačních charakteristik, nazývanými režimy, jakými jsou volný tok dopravy, kapacita dopravního proudu, kongesce, rozjíždějící a zastavující proud (stop-and-go) a dopravní zácpa. Tyto režimy jsou společně uznávány z pohledu na dopravní proud a jsou protichůdné s Kernerovou třífázovou dopravní teorií, která zahrnuje režim jako je synchronizovaný dopravní proud (Maerivoet a De Moor, 2008, s. 16).

S mírnou hustotou provozu vozidla mohou jezdit podle přání a nejsou omezována druhými vozidly, tento režim je **volný tok dopravy** (free flow traffic). Tento režim jízdy vozidel je bez zpoždění, řidiči mohou měnit jízdnicí pruhu a předjíždět pomalejší vozidla. Hustota je mírná a platí podle vztahu:

$$H = \frac{N}{K} = \frac{N}{\sum_{i=1}^N h_{si}} = \frac{1}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_{si}} = \frac{1}{h_s} \quad (27)$$

kde H je hustota, N je počet vozidel, K je délka úseku, h_s^{-1} je reciproční průměr prostoru silnice. Drobné rušení a časoprostorové odchylky nemají zásadní vliv na dopravní proud, a proto je dopravní proud stabilní (Maerivoet a De Moor, 2008, s. 6, 16).

Pokud hustota dopravy roste, jedoucí vozidla se k sobě přibližují. Počet vozidel z pohledu pozorovatele roste, v jistém okamžiku proud dosáhne maximální hodnoty a maximální hodnota se nazývá **kapacita dopravního proudu**, značena q_{max} . Například maximální kapacita na tří pruhové dálnici pro rychlost 120 km/h je maximum 7.000 vozidel. Výpočet kapacity je skličující úkol, podstatnou věcí je, že neexistují přesné definice pro koncept

kapacity a postupuje se podle publikace, manuálu s metodologiemi pro zjištění kapacity na dálnicích (Maerivoet a De Moor, 2008, s. 16).

Podle režimu kapacity dopravního proudu se dá předpokládat, že řidiči mají přizpůsobit řídicí styl malému prostoru a časovému intervalu pod velkou rychlostí. Jakmile více vozidel přijede, hustota se zvyšuje a následuje více rušících vlivů na pozvolnou jízdu vozidla. Například řidič vozidla s malým prostorem kolem sebe pro jízdu a krátkým časovým intervalu, bude muset více brzdit, aby se vyhnul kolizi s vozidly před ním. Toto může vést k místní řetězové reakci, která naruší tok dopravního proudu a spustí zbrzdění dopravního proudu. Výsledkem je nasycený stav dopravy, nazvaný **kongesce**. Nejvyšší hustota, při které nastává zpomalování proudu, se nazývá kritická hustota (H_{krit}). Pro typickou silnici je hodnota 25 vozidel na jeden kilometr v jízdním pruhu. Z tohoto můžeme odvodit rychlost pro jízdní pruh jako:

$$v = \frac{q_{max}}{H_{krit}} = 2.000 \div 25 = 85 \text{ km/h} \quad (28)$$

(Maerivoet a De Moor, 2008, s. 17).

Vyšší hodnoty hustoty ukazují většinou zhoršení dopravních podmínek. Kongesce může přerůst následně v zastavující a rozjíždějí kolonu vozidel (**stop-and-go**), tento režim vyžaduje rozjíždění a zastavování kolony. Když se dopravní proud nehýbe, vzdálenost mezi vozidly je minimální a všechna vozidla stojí v řadě od nárazníku k nárazníku, jedná se o **dopravní zácpu** (jammed traffic). Existuje maximální hustota, ve které dopravní proud vypadá jako zaparkovaná vozidla. Hodnota pro typickou silnici je 140 vozidel na kilometr na jeden jízdní pruh (Maerivoet a De Moor, 2008, s. 17).

Z celé řady ovlivňujících faktorů dopravního proudu má v městském provozu největší vliv řízení světelnou signalizací. Řízený provoz porcuje dopravní proud do oddělených skupin vozidel, kolon.

Vozidla v koloně se vzájemně ovlivňují rychlostí, řidič se snaží přizpůsobit rychlost jízdy rychlosti jízdy vozidla před ním. Systém je stabilní tak dlouho, dokud se přenášení rychlostí od vozidla k vozidlu stačí utlumit. Nestabilita nastává při vysoké hustotě provozu. Zvýšení hustoty má za následek snížení rychlosti a naopak.

Mezi parametry dopravního proudu jsou jisté souvislosti. Pokles jednoho je spojen se vzrůstem druhého, ale i pokles jednoho odpovídá poklesu druhého. Dopravní proud se pohybuje stacionárně, to znamená, že statistické hodnoty hustoty, intenzity a rychlosti jsou nezávislé na čase.

Existuje makroskopická relace mezi intenzitou, hustotou a rychlostí. Rovnice kontinuity platí pro stacionární proud, použije-li se okamžitá střední rychlost v_m .

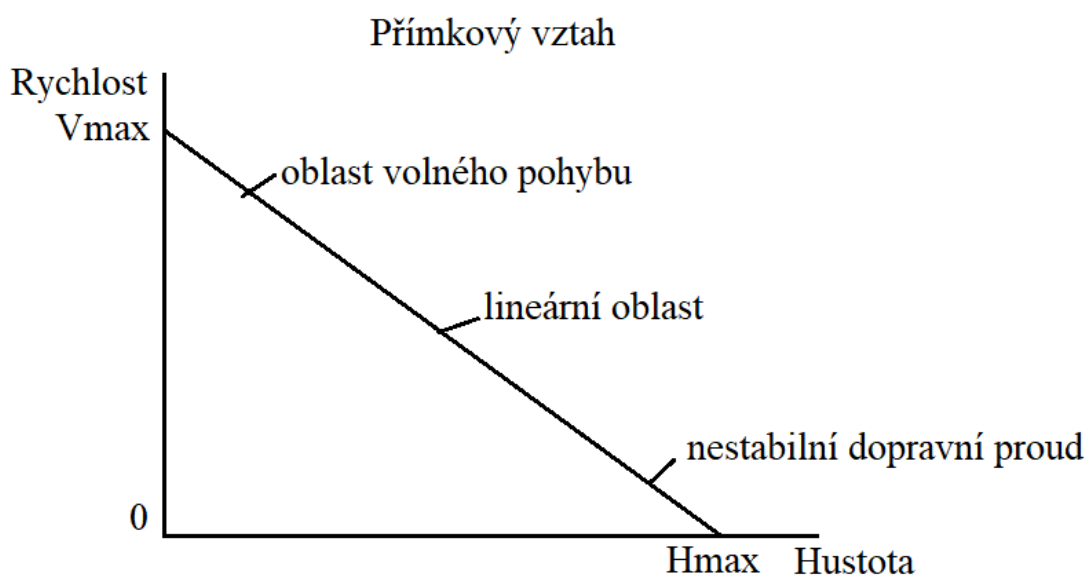
$$I = H \times v_m \quad (29)$$

(Maerivoet a De Moor, 2008, s. 10).

Při hustotě blízké nule, může řidič vozidla volit vlastní rychlost až po maximální dovolenou rychlost. Se vzrůstající hustotou rychlost klesá a maximální hustoty se dosáhne, když rychlost vozidel je nula, hustota stoupá až po H_{max} . Vzájemná souvislost všech tří parametrů dopravního proudu, jak vyjadřuje rovnice kontinuity, je patrná z axonometrického pohledu na prostorovou plochu v souřadnicovém systému intenzity, hustoty, rychlosti. Z tohoto byl odvozen Greenshielský přímkový vztah:

$$v_m = v_{max} * \left(1 - \frac{H}{H_{max}}\right) \quad (30)$$

Na obrázku 19 je znázorněn přímkový vztah hustoty, rychlosti a intenzity.

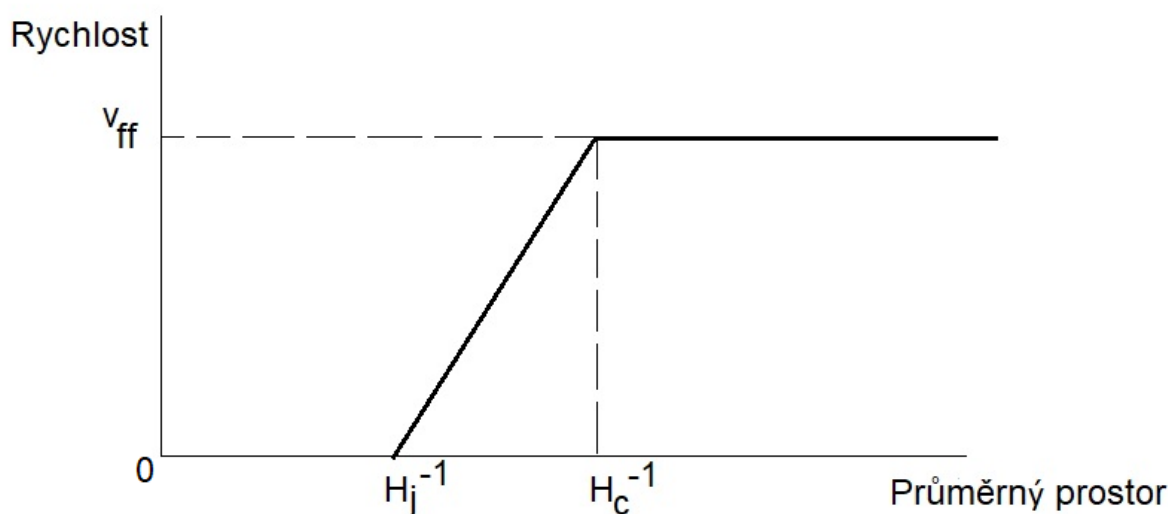


Obrázek 19 - Přímkový vztah hustoty a rychlosti (Maerivoet a De Moor, 2008, s. 18).

Ačkoliv Greenshielský přímkový vztah mezi hustotou a rychlostí je elegantní a jednoduchý, nicméně by měl být brán s jistou rezervou. Se složením dopravy se křivka mění den ode dne a dokonce i v rámci dne, například v rušných hodinách (Maerivoet a De Moor, 2008, s. 18).

Hustota v přímkovém vztahu je od nuly do maxima, v H_{\max} je dopravní zácpa. Rychlost je od nuly do maximální rychlosti, v_{\max} je volný dopravní proud. Když hustota roste, rychlost monotónně klesá. Existuje malá hustota provozu, při které rychlost zůstává nedotčena a odpovídá více nebo méně volnému dopravnímu proudu. Intenzita může být odvozena od přímkového vztahu hustoty a rychlosti (Maerivoet a De Moor, 2008, s. 19).

Hustota je inverzní funkcí průměrného prostoru h_s . Z toho můžeme odvodit fundamentální diagram nahrazením hustoty průměrným prostorem. Výsledek invertovaného přímkového vztahu je zobrazen na obrázku 20.



Obrázek 20 - Fundamentální diagram založený na rychlosti a inverzní hustotě
(Maerivoet a De Moor, 2008, s. 19)

Funkce tohoto typu fundamentálního diagramu může být shrnuta do následujících bodů:

- funkce nezačíná v počátku, ale v H_j^{-1} , odpovídající průměrnému prostoru v dopravní zácpě, všechna vozidla stojí v koloně od nárazníku k nárazníku,
- tak jak se prostor mezi vozidly zvětšuje (inverzní hustota roste), zvyšuje se rychlost vozidel,
- jak se rychlost zvyšuje s rostoucím prostorem mezi vozidly, dosáhne inverzní hustota maximální povolené rychlosti v_{ff} , provoz je v režimu volného toku (free flow). V tomto bodě je inverzní hustota kritická, označena H_c^{-1} ,
- od kritické inverzní hustoty začíná být rychlost konstantní, ačkoliv se prostor mezi vozidly zvyšuje.

Tato funkce může být porozuměna intuitivně, při velkém prostoru mezi vozidly, není řidič ovlivněn vozidlem jedoucím před ním. Když se řidič přiblíží ke koloně vozidel, jeho rychlost

začne klesat. Toto zpomalování bude pokračovat s narůstající hustotou provozu (Maerivoet a De Moor, 2008, s. 19).

Pravděpodobně nejpoužívanější formou fundamentálního diagramu je intenzita versus hustota.

Ze vztahu hustota – intenzita dosadí z rovnice kontinuity $v_m = \frac{I}{H}$ do odvozeného přímkového vztahu:

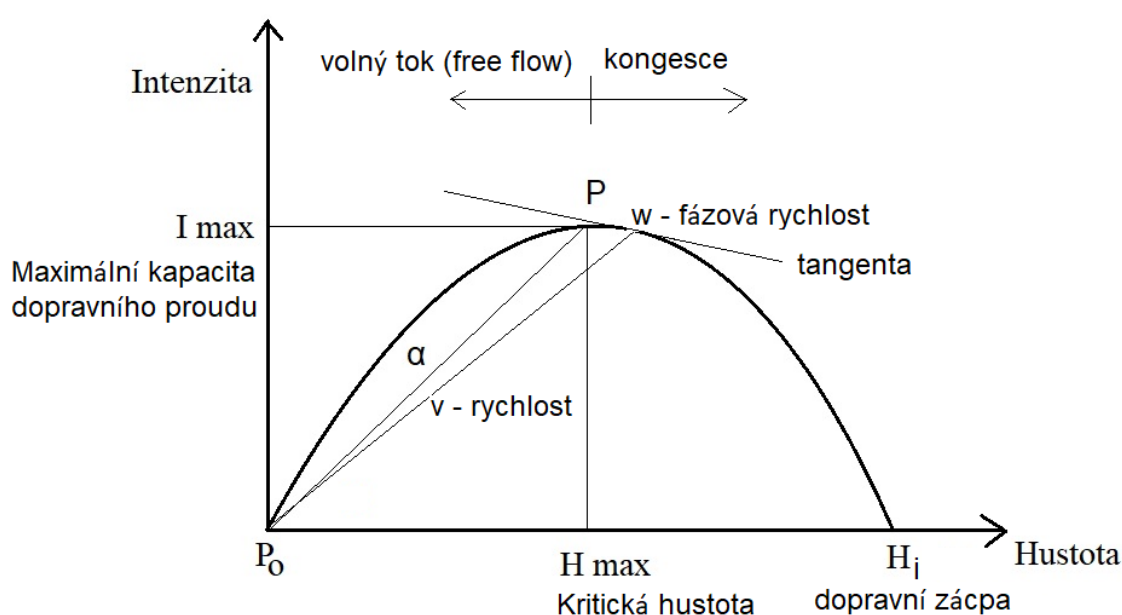
$$V_m = v_{max} * \left(1 - \frac{H}{H_{max}}\right) \text{ a dostaneme: } \frac{I}{H} = v_{max} * \left(1 - \frac{H}{H_{max}}\right) \quad (31)$$

Rovnici paraboly:

$$I = v_{max} * \left(H - \frac{H^2}{H_{max}}\right) \quad (32)$$

(Lachnit, 2005, s. 27).

Grafické vyjádření mezi hustotou a intenzitou je označováno jako fundamentální diagram, zobrazen na obrázku 21. Jakýkoliv bod na křivce je definován jako **rychlost** a je to sklon od počátku P_0 k jakémukoliv bodu na křivce. Sklon vektoru odpovídá okamžité rychlosti dopravního proudu $\tan \alpha = \frac{I}{H} = v_m$. Bod P označuje nejvyšší intenzitu a nejvyšší rychlost. Na obrázku je znázorněn fundamentální diagram. Část křivky mezi body P_0 a P tvoří stabilní dopravní proud, od bodu P až po nejvyšší hustotu tvoří nestabilní dopravní proud, tedy oblast kongescí (Maerivoet a De Moor, 2008, s. 19).



Obrázek 21 - Fundamentální diagram hustoty a intenzity (Maerivoet a De Moor, 2008, s. 19)

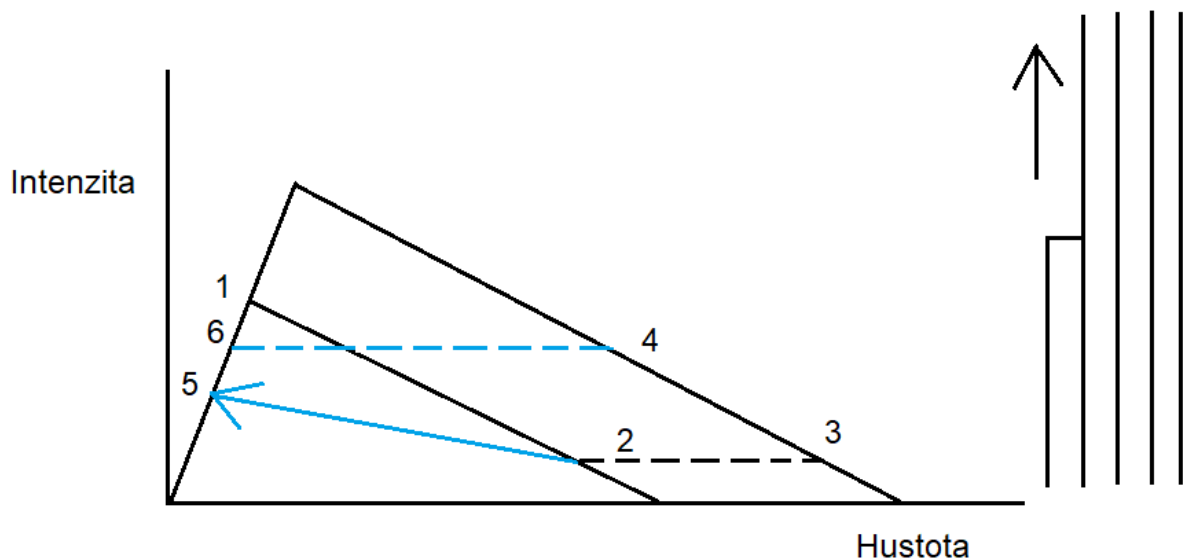
Funkce tohoto fundamentálního diagramu jsou:

- pro středně nízké hustoty, pod kritickou hustotou se hustota zvyšuje více či méně lineárně, jedná se o oblast volného toku dopravního proudu (free flow) v diagramu,
- blízko kritické hustoty, intenzita dosáhne maxima, nazývaná maximální kapacita dopravního proudu,
- v režimu kongesce, pro hustoty vyšší než kritický bod hustoty, se intenzita začíná snižovat s rostoucí hustotou do bodu H_j do dopravní zácpy, jedná se o oblast kongesce diagramu,
- rychlost v je na kterémkoliv bodě na křivce, je to sklon α od bodu na křivce k počátku.

Tvar fundamentálního diagramu může nabývat více možností. Obecně fundamentální diagram může být konkávní, konvexní, s inflexními body, různé tvary diagramu mohou být navrženy, obecně není dán žádný konsensus mezi dopravními inženýry, jaký má být správný tvar diagramu (Maerivoet a De Moor, 2008, s. 19, 20).

Pokud hustota provozu roste, kapacita silnice klesá. Během kongescí je kapacita silnice nedostatečná pro dopravní poptávku a kongesce nastávají. Maximální kapacitou rozumíme množství vozidel, která může silnice obsahovat. Kapacita během provozu dopravního proudu kolísá. Hypotéza o poklesu kapacity byla potvrzena v roce 1991. Výsledky empirických pozorování potvrzují, že rozsah poklesu kapacity může nabývat širokého rozmezí na změně dopravních podmínek. Pokles kapacity koreluje s místní dopravní situací a rychlost vozidel v kongesci se zdá, že koreluje dobře s hodnotou průtoku fronty vozidel (Hoogendoorn, 2014, s. 3,4).

Na příkladu dopravní kongesce rozlišujeme zúžení dopravních pruhů ze čtyř na tři a vznik kolony na širé tři pruhové dálnici. Kongesce jsou dvě: běžná, stálá kongesce a kongesce se zastavující a rozjíždějící vlnou „stop-and-go wave“. Výstup z kongesce se zastavující a rozjíždějící vlnou je pomalejší, než z běžně jedoucí kongesce. Na obrázku je zobrazena kongesce na příkladu zúžení pruhů. Pokud vlna zastavujících a rozjíždějících se vozidel projede zúžením, jejich stav ze stavu 2 se transformuje do stavu 5. U běžné kongesce se za projetím zúženého pruhu, stav ze stavu 4 transformuje do stavu 6, uvedené zobrazuje obrázek 22 (Hoogendoorn, 2014, s. 7).



Obrázek 22 - Fundamentální diagram intenzity a hustoty při snížení počtu jízdních pruhů
(Hoogendoorn, 2014, s. 6)

Pro optimalizaci řízení světelné křižovatky se vrátíme k rovnici kontinuity, kde $I = H \times v_m$, tato rovnice je často zobrazena v lineární formě (Greenshiledský přímkový vztah):

$$v = v_{ff} \left(1 - \frac{H}{H_{max}}\right) \quad (33)$$

kde v_{ff} je maximální rychlost ve volném toku při nulové hustotě, H_{max} je maximální hustota, ve které se pohyb dopravního proudu zastaví (Stoilova et al. 2013, s. 25).

Nahrazením rychlosti v , ($v = \frac{I}{H}$) za intenzitu I , ($I = v \cdot H$) získáme kvadratický vztah mezi intenzitou a hustotou:

$$I = v_{ff} H - H^2 \frac{v_{ff}}{H_{max}} \quad (34)$$

(Stoilova et al., 2013, s. 25).

Z předešlé rovnice může být hustota H vyjádřena jako změna počtu vozidel x na měřeném úseku o délce L , ($H = \frac{x}{L}$). Pak je kvadratická relace je dosažena ve vztahu intenzity, délky úseku, počtu vozidel x , maximální hustoty a rychlosti:

$$I = x \frac{v_{ff}}{L} - x^2 \frac{v_{ff}}{L^2 H_{max}} \quad (35)$$

(Stoilova et al., 2013, s. 25).

Nyní jsme získaly intenzitu dopravy v závislosti na délce úseku před křižovatkou, kolik vozidel se vejde do prostoru před křižovatkou a má projet křižovatkou. Tento vztah může být použit, jako cílová funkce na řízení dopravního problému, ve kterém maximální proud vozidel na řízeném úseku silnice, má projet křižovatkou.

Následně přichází systém světelných signalizací, kde hodnota „g“ je doba trvání zelené signalizace. Počet vozidel, která mají projet křižovatkou, se rovná rovnici odpovídající změně vozidel na silnici v čase, počet vozidel je vynucen systémem:

$$\mathbf{x(k+1)} = \mathbf{x(k)} + \mathbf{x_{vstup}} - \mathbf{x_{výstup}} \quad (36)$$

kde $x_{vstup} = S_i g_i c_i$, $x_{výstup} = S_o g_o c_o$, g je doba trvání zelené signalizace pro vstup a výstup, c je cyklus SSZ, s je kapacita silnice (koeficient), x(k) je počet vozidel. V tomto systému musí být g a c spočteno (Stoilova et al., 2013, s. 25).

Formální model, který představuje dynamické čekání vozidel před SSZ, je dán vztahem:

$$\mathbf{X(k+1)} = \mathbf{X(k)} + \mathbf{q_{vstup}(k)} - \mathbf{q_{výstup}} \quad (37)$$

kde $x_i(k)$ je počet vozidel, která čekají, q_{vstup} a $q_{výstup}$ je počet vozidel na vstupu do křižovatky a počet vozidel na výstupu z křižovatky, k je perioda, cyklus (Stoilova et al., 2013, s. 27).

Řízení izolované světelné křižovatky můžeme řešit optimalizační úlohou, abychom našli relativní dobu zelené signalizace v závislosti na počtu vozidel.

Na obrázku 23 je zobrazena izolovaná křižovatka, v její pravé části je nejvyšší počet vozidel před křižovatkou. Výsledným řešením je načasování světelné signalizace, pro průjezd nejvyššího počtu vozidel. Tedy nejvyšší intenzity, největšího počtu vozidel za jednotku času.

Následně užitím úvahy o rovnici kontinuity, intenzita je vyjádřena:

$$\mathbf{I} = \mathbf{v} * \mathbf{H} = \mathbf{v_{ff} H} - \mathbf{H^2 \frac{v_{ff}}{H_{max}}} \quad (38)$$

(Stoilova et al., 2013, s. 28).

Hustota H zahrnuje počet vozidel x na silnici o délce L. Hustota je: $H = \frac{x}{L}$.

Výsledně intenzita je:

$$\mathbf{I} = \mathbf{x \frac{v_{ff}}{L} - x^2 \frac{v_{ff}}{L^2 H_{max}}} \quad (39)$$

(Stoilova et al., 2013, s. 28).

Potom optimalizační problém pro maximalizaci intenzity je rovnice:

$$\max_c \{I(x(c))\} = \max_c \left\{ \frac{v_{ff}}{L} x(c) - x^2(c) \frac{v_{ff}}{L^2 H_{max}} \right\} \quad (40)$$

Problémem řešení je čas cyklu c (Stoilova et al., 2013, s. 29).

Účelová funkce je: $\max_c = \{H(c) = I(x(c)) - c^T hc\}$.

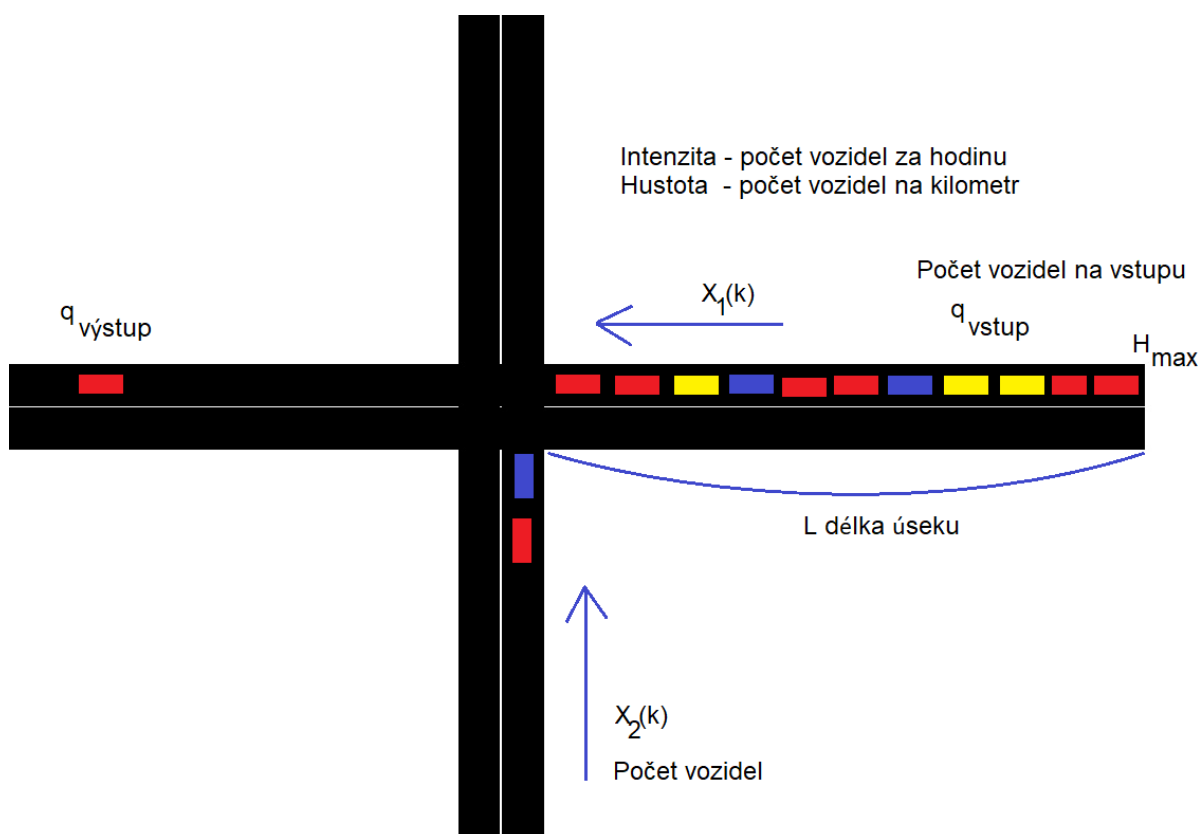
Optimalizační úloha má rovnici:

$$\max_c = \left\{ x(c) - \frac{1}{H_{max}L} x^2(c) - c^2 \right\} \quad (41)$$

$$x = x_{10} + u s c,$$

$$c \leq 0,$$

kde u je doba zelené signalizace, s je kapacita silnice (počet vozidel), x_{10} je počet vozidel před křižovatkou, L je délka úseku, c je cyklus signalizací (Stoilova et al., 2013, s. 29).



Obrázek 23 - Čtyřramenná izolovaná křižovatka, zobrazena pro časování signálu "volno", rameno na pravé straně je zatíženo vozily až na maximální hustotu (Zdroj: Autor)

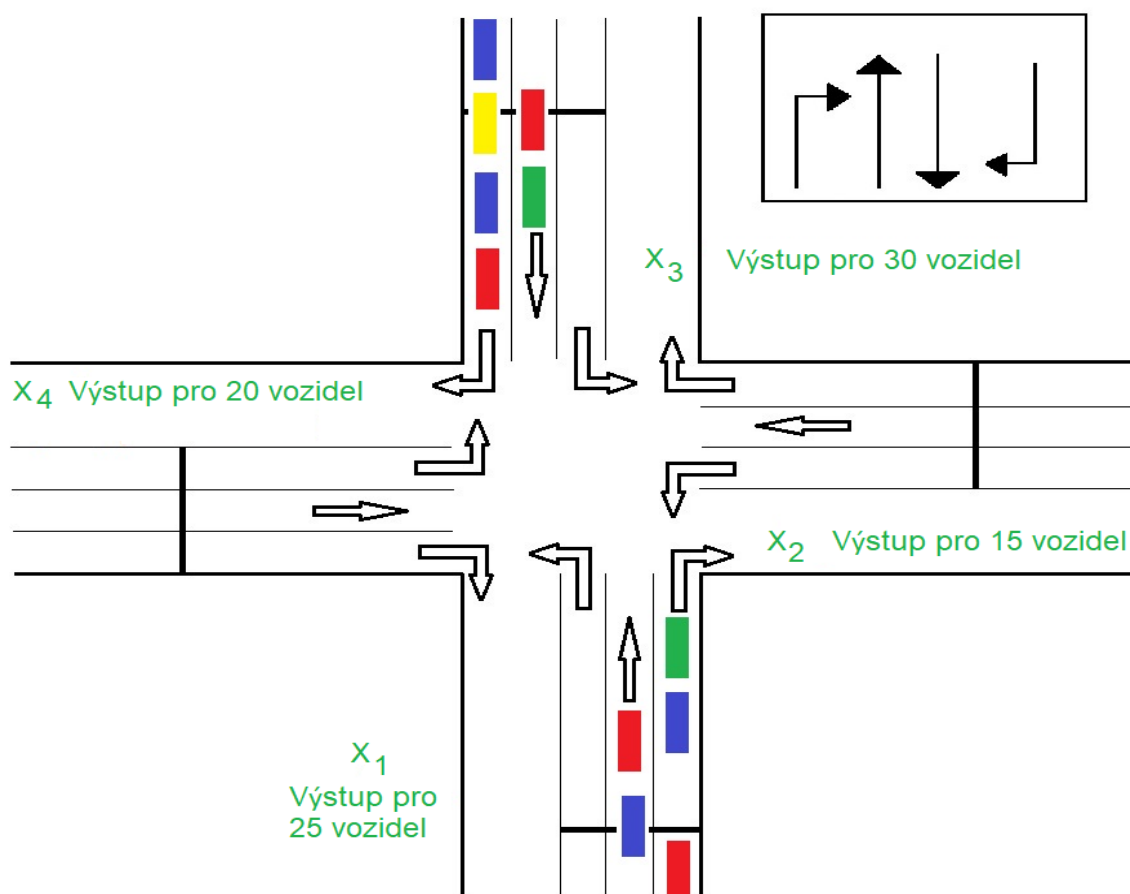
V následující kapitole je řešen provoz světelné signalizace podle optimalizační úlohy.

4. 2 Optimalizační úlohy pro dopravní proud v křižovatce

Druhá praktická část kapitoly se zabývá optimalizací řízení křižovatek dle různých parametrů.

4.2.1 Optimalizace řízení křižovatky podle kapacity na výstupu z křižovatky

První úloha je založena na modelu jedné izolované křižovatky, která má v tomto modelu nastavenou časovou signalizaci pro světelný signál „volno“ v rozmezí 5 až 120 vteřin. Křižovatka je čtyřramenná a rozdělena na jízdní pruhy. Nastavení signalizace je nastaveno na základě velikosti kapacity silnice za křižovatkou. To znamená, že vstupní požadavky jsou regulovány podle kapacity sítě za křižovatkou, pokud je více vstupních požadavků, než výstupních či obslužených, řadí se požadavky do fronty. Průjezd za křižovatkou je omezen kapacitou vozidel, jižní strana X_1 má omezení jen pro 25 vozidel. Východní strana X_2 má omezení jen pro 15 vozidel a severní strana X_3 má omezení pro 30 vozidel a poslední západní strana X_4 má omezení pro 20 vozidel. Tato úloha je zobrazena na obrázku 24, vozidla projíždí křižovatkou tak, aby si navzájem nepřekážela podle schématu v pravém horním rohu obrázku.



Obrázek 24 - Křižovatka s omezenou kapacitou průjezdů vozidel (Zdroj: Autor)

Účelem modelu je maximalizovat počet vozidel s omezeními na výstupech z křižovatky. $\text{Max}_x = \{X_1, X_2, X_3, X_4\} = \{25, 15, 30, 20\}$. Výsledkem je $\text{max}_x = \{X_3=30\}$. Nyní přiřadíme čas průjezdu vozidla křižovatkou, pokud čas na projetí a opuštění křižovatky vyžaduje dobu 4 vteřiny. Výsledkem maximálního projetí 30 vozidel na zaplnění kapacity X_3 , vyžaduje $30 \times 4 = 120$ vteřin, tedy maximální povolený čas pro signalizaci „volno“. S porovnáním minimální kapacity $\text{min}_x = \{X_1, X_2, X_3, X_4\}$. Je $\text{min}_x = \{X_2=15\}$, na zaplnění kapacity X_2 , maximálním množstvím vozidel, čas pro signalizaci „volno“ vyžaduje $15 \times 4 = 60$ vteřin. Časové rozmezí v tomto případě je 60 až 120 vteřin, pokud by nebyl pruh rozdělen na odbočovací jízdní pruhy, byla by světelná signalizace minimalizována na 60 vteřin a projelo by jen 15 vozidel z jednoho pruhu pro dva směry, na místo 30 vozidel v rozdělených směrových jízdních pruzích.

4.2.2 Aplikace teorie hromadné obsluhy na řízení světelné křižovatky

Dalším postupem řešení úlohy je aplikace teorie hromadné obsluhy pro dynamické stochastické modely.

Aplikace teorie hromadné obsluhy umožňuje sestavovat, jak i dynamické modely zaměřené na analýzu různých přechodových jevů, tak i deskriptivní modely a optimalizační modely, a to v případě, když jsou splněny podmínky stabilizace požadovaného systému (Lukáš, 2012, s. 138).

Aby bylo možno systém analyzovat v rámci teorie hromadné obsluhy. Obvyklé předpoklady jsou:

- poptávka, v našem případě požadavek na projetí křižovatkou, a rozdělení poptávky je popsáno Poissonovým procesem poptávky,
- objemy dodávek, v našem případě vozidla vstupující do křižovatky, jsou diskrétní a rozdělení dodávek je popsáno Poissonovým procesem dodávek,
- proces vytváření, doplňování a čerpání zboží ze skladu má charakter Makrovoova procesu (stavový prostor obsahuje maximálně spočetně stavů, čas probíhá spojitě a přechody stavů jsou dány podmíněnými pravděpodobnostmi přechodu nezahrnující minulost). V našem případě doplňování jsou myšlena přijíždějící vozidla na křižovatkou a čerpáním zboží je myšlena kapacita cesty (Lukáš, 2012, s. 138, 139).

Fronta před křižovatkou roste, když nelze požadavky na čerpání kapacity dopravního proudu uspokojit, protože volná kapacita silnice je vyčerpaná. Volná kapacita cesty se zaplňuje větší intenzitou, než je intenzita odčerpání zaplněné kapacity dopravního proudu. Frontu tvoří

zaplněná kapacita silnice, hustota vozidel dosáhla kritické hodnoty a fronta roste, pokud je intenzita na odčerpání kritické hustoty menší, nežli intenzita příjezdějících vozidel.

Nyní předpokládáme, že λ udává intenzitu příjezdějících vozidel, průměrný počet vozidel příjezdějících ke křižovatce za jednotku času. Veličina μ udává intenzitu na uvolnění zaplněné kapacity dopravního proudu, udává průměrný počet vozidel uvolněných na zatížené kapacitě dopravního proudu za jednotku času.

System hromadné obsluhy představuje v našem případě křižovatku, která se nalézá ve stabilizovaném stavu, když intenzita fungování křižovatky je vyjádřena podílem intenzity příjezdějících vozidel a intenzitou vozidel, která následně uvolnila kapacitu dopravního proudu:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} < 1 \quad (42)$$

kde ρ je intenzita provozu křižovatky (Lukáš, 2012, s. 139).

Z hlediska fungování křižovatky bývá důležitá průměrná kapacita dopravního proudu, která je v tomto případě vyjádřena průměrným počtem požadavků v systému hromadné obsluhy, neboli stavem elementárních jevů E_n . V případě křižovatky je počet vozidel v dopravním proudu náhodná veličina, která může nabývat hodnot 0, 1, 2 ..., až Z. Takže stav elementárních jevů $E(Z)$ je roven:

$$E(Z) = \frac{\rho}{1-\rho} = \frac{\lambda}{\mu-\lambda} \quad (43)$$

(Lukáš, 2012, s. 140).

Další důležitou charakteristikou je rozptyl vozidel v kapacitě dopravního proudu, rozptyl σ^2 je vyjádřen:

$$\sigma^2 = \sum_{n=0}^{\infty} (n - E(Z))^2 p_n = \frac{\rho}{(1-\rho)^2} = \frac{\lambda\mu}{(\mu-\lambda)^2} = E(Z)(1-\rho)^{-1} \quad (44)$$

kde p_n je pravděpodobnost, že v dopravním proudu je právě n vozidel, $p_n = (1-\rho)\rho^n$, $n=1,2,\dots$ (Lukáš, 2012, s. 140).

Optimální obsluha křižovatky je za předpokladu, když intenzita μ uvolňování zatížení kapacity dopravního proudu je během celé uvažované doby konstantní, lze stanovit optimální intenzitu λ doplňování vozidly, čekajících před křižovatkou, kde: $\lambda_{\text{optimum}} = \mu_{\text{optimum}}$ (Lukáš, 2012, s. 141).

Exponenciální model jednoduché obsluhy M/M/1 je nejjednodušší případ:

- s jedním obslužným zařízením, $m = 1$,
- jedná se o otevřený systém, tedy zdroj požadavků je neomezený,
- velikost fronty není omezena,
- všechny požadavky ve frontě trpělivě čekají na obsluhu, i když nedostačuje kapacita obslužného zařízení,
- požadavky postupují do obsluhy v pořadí FIFO, tak jak přišly do systému hromadné obsluhy,

(Lukáš, 2009, s. 90).

Intenzity vstupu i obsluhy požadavků jsou konstantní, což znamená že λ i μ udávají průměrné intenzity, neboli průměrné počty požadavků jednak vstupujících a jednak obslužených za jednotku času (Lukáš, 2009, s. 90).

Důležité jsou i časové charakteristiky systému hromadné obsluhy, **celková doba** strávená požadavkem v systému hromadné obsluhy $E(N)$ a doba **strávená** čekání požadavku **ve frontě** $E(N_f)$. Jsou známy Littleovy vzorce:

$$E(N) = \lambda^* E(T) \quad (45)$$

$$E(N_f) = \lambda^* E(T_f) \quad (46)$$

kde λ^* je průměrná intenzita vstupu, $E(T)$ je průměrná celková doba požadavku SHO, $E(T_f)$ je průměrná doba požadavku ve frontě (Lukáš, 2009, s. 88).

Pro následující model platí $\lambda^* = \lambda$. Dále platí pro průměrnou celkovou dobu strávenou požadavkem v SHO:

$$E(T) = \frac{1}{\mu - \lambda} \quad (47)$$

(Lukáš, 2009, s. 92).

Průměrná doba čekáním požadavku ve frontě je dána vztahem:

$$E(T_f) = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)} \quad (48)$$

(Lukáš, 2009, s. 93).

Mezi $E(T)$ a $E(T_f)$ platí vztah:

$$E(T_f) = E(T) - \frac{1}{\mu} \quad (49)$$

který vlastně říká, že dobu strávenou požadavkem ve frontě získáme odečtením doby trvání obsluhy od celkové doby požadavku v SHO (Lukáš, 2009, s. 93).

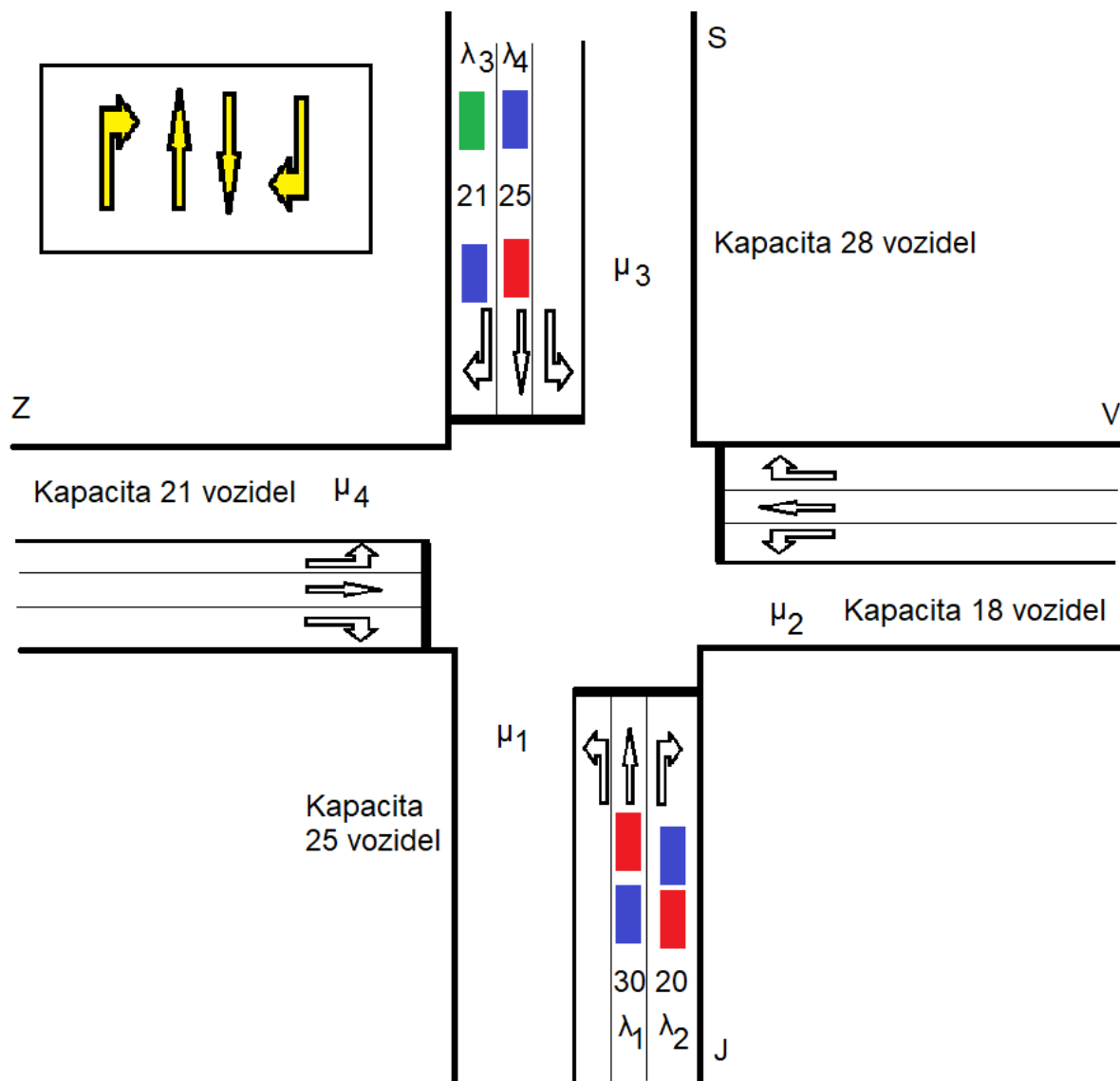
V následujícím modelu je zobrazena izolovaná křižovatka, která je obsluhou typu M/M/1, tedy jedna obslužná křižovatka s exponenciálním rozdělením, příjezdy vozidel jsou pod exponenciálním rozdělením, platí systém FIFO a neomezený počet míst ve frontě. Doba mezi vstupy dvou po sobě přijíždějících vozidel má exponenciální rozdělení s parametrem λ , tedy s intenzitou λ vstupu jednotek, v tomto případě počtem přijíždějících vozidel do křižovatky. Na modelu je čtyřramenná křižovatka, ramena jsou orientovaná podle světových stran východ V, sever S, západ Z, jih J. Délka signalizace „volno“ je ovlivněna kapacitou dopravního proudu za křižovatkou, tedy podle stanovené kapacity silnice, počtu vozidel za jednotku času. Intenzitou μ , zaplněním volné kapacity dopravního proudu, je řízena světelná signalizace. Kapacita dopravního proudu je odvozena od rychlosti v městském provozu, když platí podmínka městského provozu maximální rychlosti 50 km/h, jedná se o rychlost 13,88 m/s. Ke zjištění kapacity dopravního proudu je uplatněna časová podmínka rozestupu mezi vozidly za sebou 2 vteřiny, v podmínkách městského provozu se jedná o vzdálenost téměř 28 m, tedy dvojnásobek 13,88 m. V tomto režimu se jedná o volný tok proudu (free flow). Pokud by se počet vozidel zvýšil a snížila by se vzdálenost mezi vozidly a tím i rychlost dopravního proudu, jednalo by se o režim kongesce. Pokud by se počet vozidel nadále zvýšil na tolik, že by mezi vozidly byla vzdálenost krátká, tedy prostor na jedno vozidlo by byl přibližně 7 metrů, jednalo by se o kongesci popojíždějící „stop-and-go“ či již o nehybnou dopravní zácpu. Příjezd vozidel ze všech směrů je vyjádřen Poissonovým rozdělením, jedná se tedy o počet sledovaných jevů (počet vozidel) za jednotku času, plochy či objemu. V tomto případě je počet přijíždějících vozidel vyjádřen intenzitou λ na každém jízdním pruhu v křižovatce.

Na modelu křižovatky jsou dány kapacity dopravních proudů, pro jižní rameno J je kapacita dopravního proudu o intenzitě μ_1 25 vozidel za minutu na 700 metrovém úseku. Východní rameno V snese kapacitu o intenzitě μ_2 18 vozidel za minutu na 500 metrovém úseku. Severní rameno S snese kapacitu dopravního proudu v režimu volného toku (free flow) o intenzitě μ_3 28 vozidel za minutu na 800 metrovém úseku. Západní rameno Z snese kapacitu dopravního proudu o intenzitě μ_4 21 vozidel za minutu v režimu volného toku (free flow) na 600 metrovém úseku. Režim řízení křižovatek je rozdělen na fáze, jsou čtyři fáze průjezdu křižovatkou v bezkolizním stavu, jeden cyklus má čtyři fáze.

V první fázi projedou současně vozidla rovněž ze severu a z jihu, ze severu odbočují vozidla vpravo na západ a současně z jihu odbočují vozidla vpravo na východ.

Každý směr jízdy má svůj jízdní pruh. Intenzity příjezdů vozidel jsou dány pro každý jízdní pruh, ve kterém se vozidla řadí před křižovatkou. V jižním ramenu jsou intenzity příjezdu vozidel λ_1 30 vozidel za minutu pro rovný směr, intenzita λ_2 20 vozidel za minutu pro odbočení vpravo. V severním ramenu jsou intenzity příjezdu vozidel λ_3 21 vozidel za minutu pro odbočení vpravo a intenzita λ_4 25 vozidel za minutu pro přímý směr.

Model první fáze průjezdu křižovatkou je vyobrazen na obrázku 25.



Obrázek 25 - Model čtyřramenné křižovatky s intenzitami na vstupu a na výstupu v první fázi průjezdu křižovatkou (Zdroj: Autor)

Důležitou podmínkou je počátek stavu v čase t_0 , kde v systému je 0 vozidel a čas běží od nuly a následně vozidla přijíždějí ze všech čtyř směrů podle intenzit.

V počátečním stavu v čase t_0 v 0 vteřině v jižním a severním ramenu je v přímém směru srovnání intenzit vstupu a výstupu $\lambda_1 = 30$, $\mu_3 = 28$, zde je nerovnost $\lambda_1 > \mu_3$. Vozidla neprojedou všechna křižovatkou a zbylá vozidla budou ve frontě, neboť se nevejdou do kapacity výstupního dopravního proudu ve volném toku. Pokud doba trvání průjezdu křižovatkou vyžaduje 4 vteřiny, je pro tento přímý směr z jihu na sever potřeba pro 28 vozidel doba trvání signalizace „volno“ doba 28 krát 4 je 112 vteřin, což je v intervalu $\langle 5, 120 \rangle$ pro signalizaci „volno“. Ale pokud kapacita dopravního proudu na výstupu snese intenzitu 28 vozidel za minutu, tak za 2 minuty snese intenzitu 56 vozidel. Vzhledem k tomu, že signalizace „volno“ může trvat až 2 minuty, tak při době trvání průjezdu vozidla 4 vteřiny se do 120 vteřin vejde 30 vozidel. Maximální doba signálu „volno“ pro intenzitu ve volném toku z jihu na sever je pak 120 vteřin a projede 30 vozidel. Během signalizace „volno“ během 2 minut přibude do fronty o intenzitě λ_1 60 nově přijíždějících vozidel, z nichž 30 projede křižovatkou v této první fázi. Maximální doba signalizace je 120 vteřin pro λ_1 .

Současně pojedou vozidla z jihu vpravo na východ, kde požadavky intenzity na vstupu jsou $\lambda_2 = 20$ a intenzity na výstupu jsou $\mu_2 = 18$, zde je nerovnost $\lambda_2 > \mu_2$, zbylá přijíždějící vozidla se nevejdou do kapacity na opuštění křižovatky a budou stát ve frontě. Doba trvání světelné signalizace „volno“ je 18 krát 4 rovna 72 vteřin. Vzhledem k tomu, že během dvou minut μ_2 snese intenzitu 36 vozidel za 2 minuty a vyžaduje-li projetí křižovatky 4 vteřiny, projede křižovatkou 30 vozidel. Během 2 minut signalizace „volno“ přijede do jízdního pruhu λ_2 40 vozidel, z nichž 30 projede během první fáze tohoto cyklu. Maximální doba signalizace je 120 vteřin pro λ_2 .

V opačném směru současně pojedou vozidla ze severu v přímém směru na jih, kde intenzita na vstupu do křižovatky je $\lambda_4 = 25$ a intenzita pro výstup je $\mu_1 = 25$, zde je rovnost intenzit $\lambda_4 = \mu_1$. Všechna vozidla projedou ze severu na jih křižovatkou. Doba trvání signalizace „volno“ je 25 krát 4 rovno 100 vteřin. Pokud je intenzita na výstupu $\mu_1 = 25$, tak během 2 minut snese intenzitu 50 vozidel. Opět během maximální doby signalizace „volno“ při době trvání průjezdu jednoho vozidla křižovatkou 4 vteřiny, projede z jízdního pruhu λ_4 30 vozidel během 2 minut. Během signalizace „volno“ přijede 50 vozidel během 2 minut a 30 z nich projede křižovatkou v první fázi tohoto cyklu. Maximální doba signalizace je 120 vteřin pro λ_4 .

Posledním současným průjezdem vozidel je směr ze severu vpravo na západ. Porovnáním intenzity na vstupu $\lambda_3 = 21$ a intenzity pro výstup je $\mu_4 = 21$, zde je rovnost intenzit $\lambda_3 = \mu_4$. Všechna vozidla v počátečním stavu projedou ze severu na západ. Doba trvání signalizace „volno“ je 21 krát 4 rovno 84 vteřin. Vzhledem k tomu, že během dvou minut snese kapacita dopravního proudu μ_4 na výstupu 42 vozidel a během maximální délky signalizace 120 vteřin při době průjezdu křižovatkou 4 vteřiny, projede křižovatkou 30 vozidel z jízdního pruhu λ_3 .

Během 2 minut trvání první fáze přijde 42 vozidel a 30 z nich projede křižovatkou, ostatní čekají ve frontě před křižovatkou. Maximální doba signalizace je 120 vteřin pro λ_3 .

Maximální doba signalizací „volno“ pro jízdní pruhy je $\max_{\lambda_i} \{ \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4 \} = \max_{\lambda_i} \{ 120, 120, 120, 120 \}$, výsledkem je $\max_{\lambda_i} \{ 120 \}$. Doba první fáze projetí křižovatky je 120 vteřin.

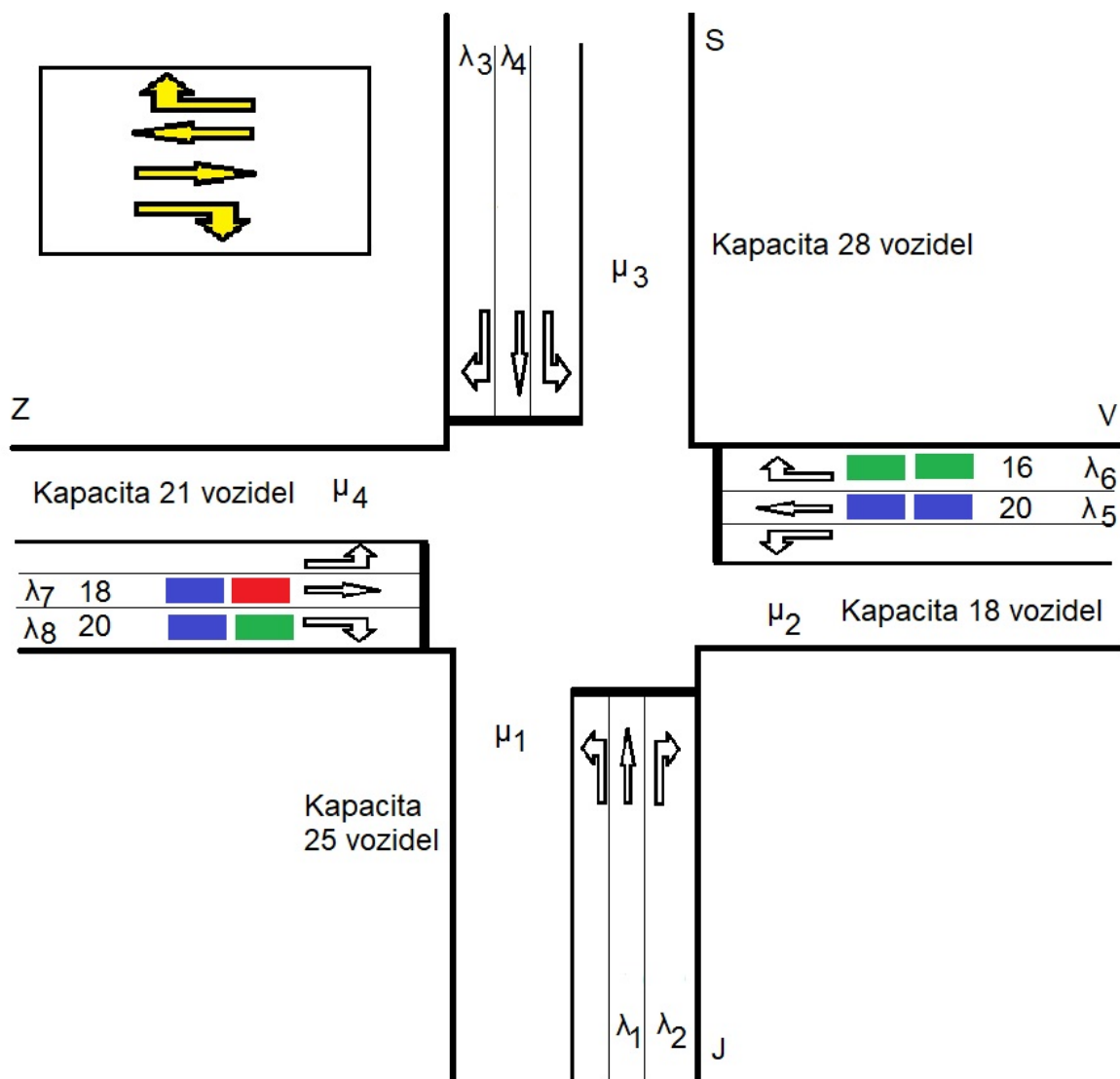
Druhá fáze projetí křižovatky je v přímém směru z východu na západ a současně ze západu na východ. Z východního směru se odbočuje vpravo na sever a současně ze západního směru se odbočuje vpravo na jih. Druhá fáze začíná od času t_0 v 122 vteřině, kdy 120 vteřin trvala první fáze a 2 vteřiny byl signál žluté barvy „pozor“.

Ve východním ramenu pro přímý směr na západ je intenzita příjezdících vozidel λ_5 20 vozidel za minutu, intenzita příjezdících vozidel pro odbočení vpravo na sever λ_6 je 16 vozidel za minutu. V západním ramenu je intenzita příjezdících vozidel λ_7 18 vozidel za minutu pro přímý směr na východ a pro odbočení vpravo na jih je intenzita λ_8 20 vozidel za minutu.

Porovnáním intenzit v přímém směru pro východní rameno na západ je $\lambda_5 = 20$ a intenzita pro výstup je $\mu_4 = 21$, zde platí $\lambda_5 < \mu_4$, vozidla projedou všechna, kromě toho, že během první fáze o délce 120 vteřin plus 2 vteřiny na žluté světlo při změně fází, přijelo do jízdního pruhu λ_5 během 122 vteřin s intenzitou 20 vozidel za minutu 40 vozidel, neboť časový rozestup mezi vozidly jsou 3 vteřiny. Doba trvání pro světelnou signalizaci volno je pro maximální kapacitu ve volném toku (free flow) o intenzitě μ_4 21 vozidel za minutu a nyní je ve frontě 40 vozidel. Vzhledem k tomu, že intenzita výstupu μ_4 vyžaduje 21 vozidel za minutu a za 2 minuty 42 vozidel a od počátku druhé fáze je ve frontě 40 vozidel, projede křižovatkou během druhé fáze o délce 120 vteřin při době trvání projetí křižovatkou 4 vteřiny 30 vozidel. Ve frontě zůstanou zbylá a nově příjezdějící vozidla. Maximální doba signalizace je 120 vteřin pro λ_5 .

V případě odbočení z východního ramene na sever, je intenzita λ_6 příjezdících vozidel 16 za minutu, intenzita na výstupu je μ_3 28 vozidel za minutu. Porovnání intenzit na vstupu a výstupu platí $\lambda_6 < \mu_3$. Nyní na počátku druhé fáze je po 122 vteřinách v jízdním pruhu 32 vozidel od počátečního času t_0 . Doba trvání na zaplnění kapacity dopravního proudu o intenzitě μ_3 o 28 vozidlech za minutu je po dobu trvání 2 minut 56 vozidel. Během druhé fáze při maximální době zelené signalizace 120 vteřin projede křižovatkou 30 vozidel, když projetí křižovatky vyžaduje 4 vteřiny. Zbylá vozidla budou stát ve frontě před křižovatkou. Maximální doba signalizace je 120 vteřin pro λ_6 .

Na obrázku 26 je vyznačena druhá fáze na modelu čtyřramenné křižovatky.



Obrázek 26 - Model čtyřramenné křižovatky s intenzitami na vstupu a na výstupu v druhé fázi průjezdu křižovatkou (Zdroj: Autor)

Porovnání intenzit na vstupu a výstupu v přímém směru ze západu na východ je dáno $\lambda_7 = 18$ a $\mu_2 = 18$, zde platí rovnost intenzit $\lambda_7 = \mu_2$. Tento stav druhé fáze začíná ve 122 vteřině. Během 122 vteřin do jízdního pruhu λ_7 přijelo 36 vozidel. Kapacita pro výstup z křižovatky o intenzitě μ_2 18 vozidel za minutu je během 2 minut 36 vozidel. Maximální doba signalizace „volno“ o 120 vteřinách propustí při době trvání 4 vteřiny na projetí křižovatkou 30 vozidel. Zbýlá vozidla se řadí v jízdním pruhu do fronty před křižovatkou. Maximální doba signalizace je 120 vteřin pro λ_7 .

Posledním průjezdem ve druhé fázi je směr odbočení vpravo ze západu na jih, porovnáním intenzit na vstupu $\lambda_8 = 20$ a výstupu $\mu_1 = 25$, platí $\lambda_8 < \mu_1$. Opět od počátku času t_0 do 122 vteřiny do jízdního pruhu λ_8 přijelo 40 vozidel. Kapacita dopravního proudu v režimu volného toku (free flow) na výstupu má intenzitu 25 vozidel za minutu a během maximálního trvání signalizace „volno“ 120 vteřin, je kapacita 50 vozidel na 2 minuty. Během těchto 120 vteřin projede z jízdního pruhu ve směru ze západu na jih 30 vozidel, když projetí jednoho vozidla křižovatkou vyžaduje 4 vteřiny. Zbýlá vozidla se řadí do fronty před křižovatkou. Maximální doba signalizace je 120 vteřin pro λ_8 .

Maximální doba signalizací „volno“ pro jízdní pruhy je $\max_{\lambda_{II}} \{ \lambda_5, \lambda_6, \lambda_7, \lambda_8 \} = \max_{\lambda_{II}} \{ 120, 120, 120, 120 \}$, výsledkem je $\max_{\lambda_{II}} \{ 120 \}$. Doba druhé fáze na projetí křižovatkou je 120 vteřin.

Třetí fáze projetí křižovatkou je vzájemné odbočení ze severního ramene do východního a z jižního ramene do západního. Třetí fáze začíná součtem dvou předchozích fází, které jsou časově shodně, začátek třetí fáze je v 244 vteřině od počátku v času t_0 .

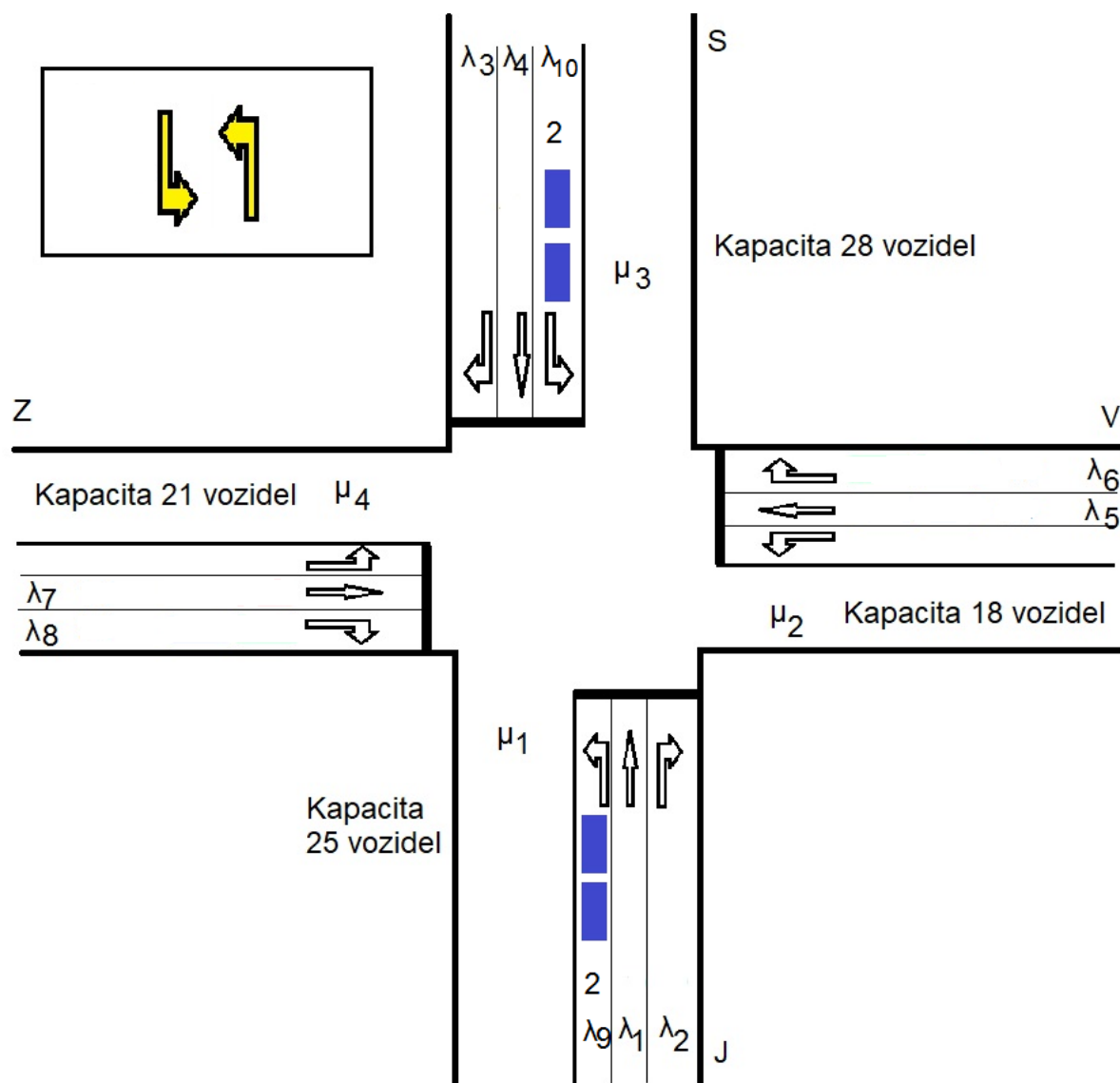
V jižním směru při odbočení doleva je intenzita přijíždějících vozidel λ_9 2 vozidla za minutu a kapacita dopravního proudu v režimu volného toku (free flow) pro upuštění křižovatkou má intenzitu μ_4 21 vozidel za minutu. V severním směru pro odbočení vozidel vlevo na východ je λ_{10} 2 vozidla za minutu a kapacita dopravního proudu v režimu volného toku (free flow) pro upuštění křižovatkou má intenzitu μ_2 18 vozidel za minutu.

Porovnáním intenzit v jižním ramenu na vstupu $\lambda_9 = 2$ a na výstupu $\mu_4 = 21$, platí $\lambda_9 < \mu_4$. Od počátku t_0 uplynulo 244 vteřin a do jízdního pruhu pro odbočení přijelo 8 vozidel. Doba trvání projetí křižovatkou pro jedno vozidlo jsou 4 vteřiny, 8 vozidel projede křižovatkou za 32 vteřin. Interval příjezdu vozidla je 30 vteřin, další vozidlo přijede v Poissonově rozložení za 26 vteřin, toto vozidlo není detekováno a doba signalizace „volno“ bude 32 vteřin. Intenzita je nízká, že všechny vstupní požadavky jsou vyřízeny během jedné fáze. Maximální doba signalizace je 32 vteřin pro λ_9 .

Porovnáním intenzit na severním ramenu na vstupu pro odbočení vlevo do východního ramene je dána intenzita na vstupu $\lambda_{10} = 2$ a intenzita na výstupu $\mu_2 = 18$, platí $\lambda_{10} < \mu_2$. Od počátku t_0 do jízdního pruhu přijelo 8 vozidel a odbočují vlevo. Na projetí křižovatkou je doba 4 vteřin na jedno vozidlo, 8 vozidel projede křižovatkou za 32 vteřin. Maximální doba signalizace je 32 vteřin pro λ_{10} .

Maximální doba signalizací „volno“ pro jízdní pruhy je $\max_{\lambda_{III}} \{ \lambda_9, \lambda_{10} \} = \max_{\lambda_{III}} \{ 32, 32 \}$, výsledkem je $\max_{\lambda_{III}} \{ 32 \}$. Doba třetí fáze na projetí křižovatkou je 32 vteřin.

Obrázek 27 zobrazuje stav třetí fáze projetí křižovatkou čtyřramenné křižovatky.



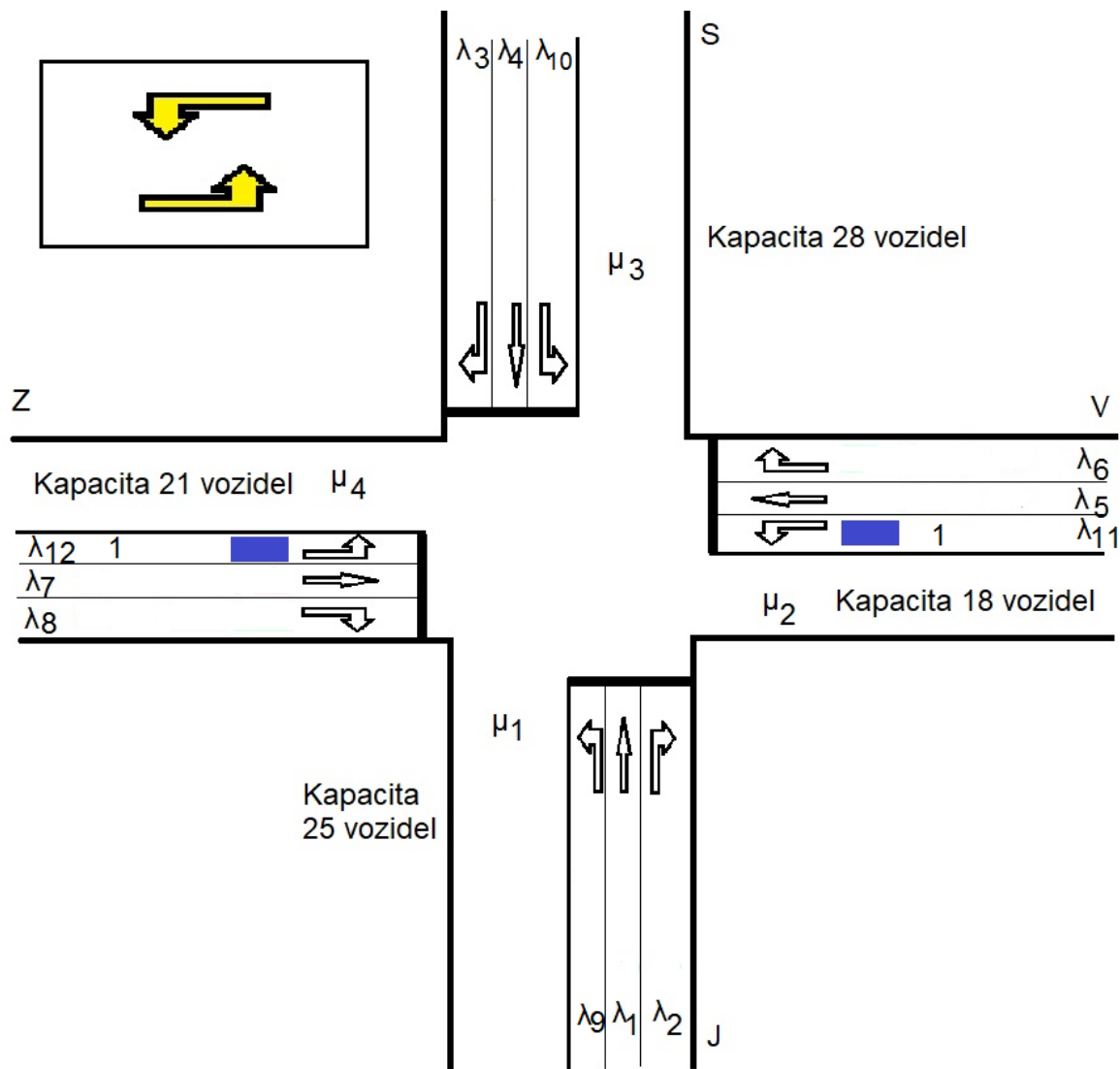
Obrázek 27 - Model čtyřramenné křižovatky s intenzitami na vstupu a na výstupu v třetí fázi průjezdu křižovatkou (Zdroj: Autor)

Čtvrtá fáze na modelu křižovatky je odbočení vlevo ze západního ramene do severního ramene a současně odbočení vlevo z východního do jižního ramene. Čtvrtá fáze začíná součtem dob trvání předchozích tří fází od času t_0 , tedy počátek čtvrté fáze je v čase 278 vteřin.

Ve východním směru při odbočení doleva je intenzita přijíždějících vozidel λ_{11} 1 vozidlo za minutu a kapacita dopravního proudu v režimu volného toku (free flow) pro upuštění

křižovatky má intenzitu μ_1 25 vozidel za minutu. V západním směru pro odbočení vozidel vlevo na sever je intenzita λ_{12} 1 vozidlo za minutu a kapacita dopravního proudu v režimu volného toku (free flow) pro upuštění křižovatky má intenzitu μ_3 28 vozidel za minutu.

Na obrázku 28 je zobrazen stav průjezdu křižovatkou ve čtvrté fázi.



Obrázek 28 - Model čtyřramenné křižovatky s intenzitami na vstupu a na výstupu ve čtvrté fázi průjezdu křižovatkou (Zdroj: Autor)

Porovnáním intenzit ve východním ramenu na vstupu $\lambda_{11} = 1$ a na výstupu $\mu_1 = 25$, platí $\lambda_{11} < \mu_1$. Od počátku t_0 uplynulo 278 vteřin a do jízdního pruhu pro odbočení přijely 4 vozidla. Doba trvání projetí křižovatkou pro jedno vozidlo jsou 4 vteřiny, 4 vozidla projedou křižovatkou za 16 vteřin. Interval příjezdu vozidla je 60 vteřin, další vozidlo přijede

v Poissonově rozložení za 38 vteřin, toto vozidlo není detekováno a doba signalizace „volno“ bude 16 vteřin. Intenzita je nízká, že všechny vstupní požadavky jsou vyřízeny během jedné fáze. Maximální doba signalizace je 16 vteřin pro λ_{11} .

Porovnáním intenzit na západním ramenu na vstupu pro odbočení vlevo do severního ramene je dána intenzita na vstupu $\lambda_{12} = 1$ a intenzita na výstupu $\mu_3 = 28$, platí $\lambda_{12} < \mu_3$. Od počátku t_0 do jízdního pruhu přijely 4 vozidla a odbočují vlevo. Na projetí křižovatkou je doba 4 vteřin na jedno vozidlo, 4 vozidla projedou křižovatkou za 16 vteřin, hodnota je v intervalu $\langle 5, 120 \rangle$. Maximální doba signalizace je 16 vteřin pro λ_{12} .

Maximální doba signalizací „volno“ pro jízdní pruhy je $\max_{\lambda_{IV}} \{\lambda_{11}, \lambda_{12}\} = \max_{\lambda_{IV}} \{16, 16\}$, výsledkem je $\max_{\lambda_{IV}} \{16\}$. Doba čtvrté fáze na projetí křižovatkou je 16 vteřin. Poslední signalizací je žluté světlo „pozor“ po dobu 2 vteřin.

Doba čtyřfázového cyklu je součtem čtyř fází: $t_{\text{cyklu}} = 120+2+120+2+32+2+16+2 = 296$ vteřin, to jsou 4 minuty a 56 vteřin.

Vzhledem k omezení kapacit na výstupu pro zachování maximální kapacity dopravního proudu v režimu volného toku (free flow), dochází k rozrůstání fronty na jižním ramenu.

Tabulka 4 zobrazuje stručný přehled o intenzitách na vstupu a na výstupu a o stavu na konci prvního cyklu čtyřfázového řízení provozu čtyřramenné křižovatkou.

Ačkoliv je výsledek v souladu s M/M/1, velikost fronty není omezena a vstupující požadavky čekají ochotně na obsluhu. Již během prvního cyklu, který byl přizpůsoben podle intenzity dopravního proudu na výstupu, aby se za křižovatkou netvořily kolony. Začaly se hromadit požadavky před obslužným zařízením. A během necelých 5 minut vznikla v jízdním pruhu λ_1 fronta 118 vozidel, která zablokuje úsek přes 700 metrů. Pokud je intenzita vstupu λ_1 30 vozidel za minutu a jen 30 vozidel projede během 2 minut křižovatkou, je potřeba přidat jízdní pruh, aby celá intenzita λ_1 během 2 minut projela křižovatkou, to je 60 vozidel. Pokud prodeje nyní 60 vozidel v první fázi, čas z 296 vteřin minus 122 vteřin zbývá 174 vteřin a za tuto dobu přijede ke křižovatce 87 nových vozidel, a propustnost na jeden cyklus je po úpravě 60 vozidel. Tedy zdvojnásobení jízdních pruhů nestačí, vzhledem k velké intenzitě je potřeba zpětinásobit jízdní pruh pro intenzitu λ_1 a i intenzitu výstupu, aby ve druhém cyklu projelo 150 vozidel během 2 minut. Během těchto 2 minut signalizace „volno“ přijede do jízdních pruhů 60 vozidel a celkem v intervalu 2 minut je $60 + 87$ vozidel, tedy 147 vozidel. Po zpětinásobení jízdních pruhů pro jeden směr při velké intenzitě 30 vozidel za minutu, to je 1800 vozidel za hodinu, vyhovuje intenzita vstupu s intenzitou výstupu.

Druhou nejvyšší intenzitou na vstupu je λ_4 s 25 vozidly za minutu, kde se vytvořila fronta 93 vozidel během jednoho cyklu. Pokud se zdvojnásobí jízdní pruh pro λ_4 a i intenzita výstupu, bude moci během první fáze odjet všech 50 vozidel během 2 minut. Po dobu zbylých 174 vteřin přijede 72 vozidel. Stále se tvoří fronta a je potřeba zpětinásobit jízdní pruh pro intenzitu λ_4 , aby ve druhém cyklu projelo 150 vozidel během 2 minut. Z prvního cyklu je v jízdních pruzích 72 vozidel a během 2 minut signalizace volno přijede nových 50 vozidel a celkem je tedy 122 vozidel a zbývá ještě rezerva do kapacity 150 vozidel, žádné vozidlo nezůstane stát ve frontě a i nově přijíždějící vozidla projedou v dalším cyklu, aniž by čekaly na další cyklus.

Tabulka 4 - Přehled o vstupních a výstupních intenzitách v modelovaném příkladu (Zdroj: Autor)

Intenzity λ	Intenzity λ [voz/min]	Intenzity μ	Intenzity μ [voz/min]	Délka fáze [s]	Počet všech vozidel	Počet vozidel ve frontě	Počet vozidel za křižovatkou
Λ_1	30	μ_1	25	122	148	118	30
Λ_2	20				98	68	30
Λ_3	21				103	73	30
Λ_4	25	123	93		30		
Λ_5	20	μ_2	18	122	98	68	30
Λ_6	16				78	48	30
Λ_7	18	μ_3	28		88	58	30
Λ_8	20				98	68	30
Λ_9	2			34	9	1	8
Λ_{10}	2	9	1		8		
Λ_{11}	1	μ_4	21	18	4	0	4
Λ_{12}	1				4	0	4
Součet	176		92	296	860	596	264

Nyní srovnáme intenzitu λ_8 20 vozidel za minutu, která je ve druhé fázi. Během doby trvání první fáze přijelo do jízdního pruhu 40 vozidel. Pokud čtyřnásobíme jízdní pruhy pro λ_8 , bude moci projet křižovatkou během 2 minut až 120 vozidel. Během signalizace „volno“ přijelo během 2 minut 40 nových vozidel, které mohou ihned projet. Nezbude žádné vozidlo ve frontě, do konce cyklu zbývá 52 vteřin a do začátku druhé fáze v druhém cyklu zbývá 122 vteřin a za 174 vteřin přijede do fronty 58 vozidel a opět 40 vozidel přijíždějících během 2 minut světelné signalizace.

Nyní srovnáme intenzitu λ_6 16 vozidel za minut z druhé fáze. Během doby trvání první fáze přijelo 32 vozidel a během 2 minut světelné signalizace přijelo 32 nových vozidel, tedy je zde

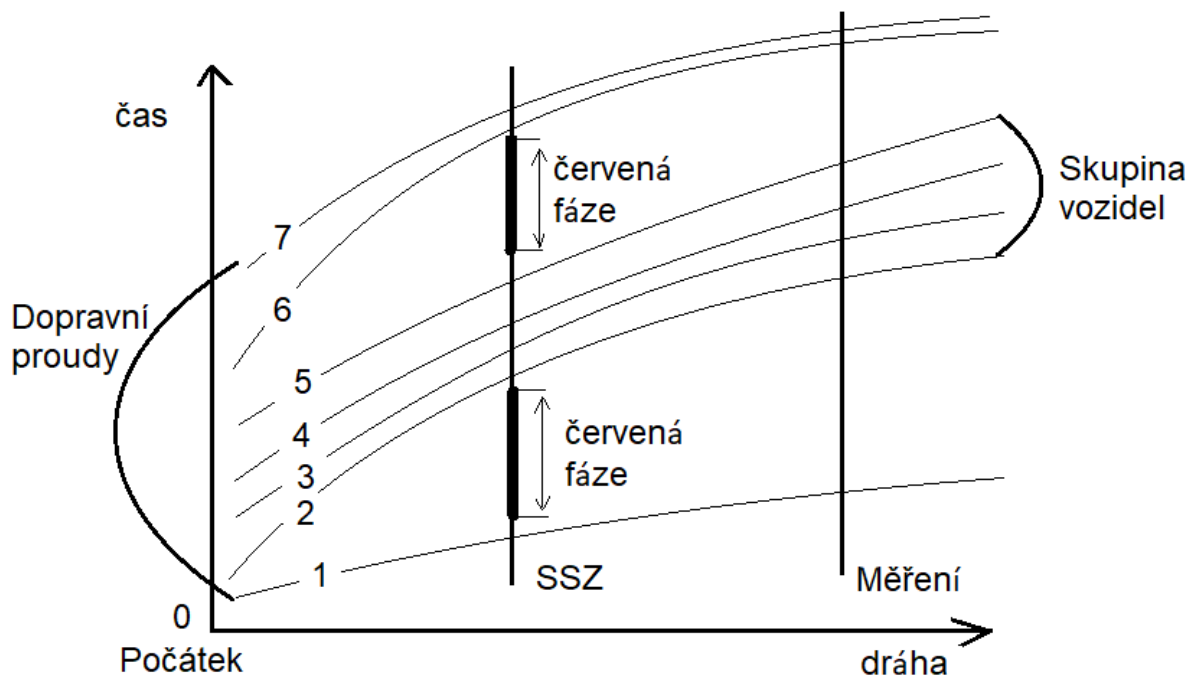
celkem 64 vozidel, pokud ztrojnásobíme jízdní pruhy pro λ_6 , bude moci projet současně křižovatkou během 2 minut světelné signalizace „volno“ až 90 vozidel. Žádné vozidlo nebude ve frontě a do opětovné nové druhé fáze v druhém cyklu zbývá 174 vteřin a za tu dobu přijede 46 vozidel a k tomu 32 vozidel během signalizace „volno“, to je 78 vozidel a stále žádné vozidlo nezůstane ve frontě.

Podle velkých intenzit bude křižovatka mít až 5 jízdních pruhů pro jeden směr, aby intenzita provozu křižovatky dosáhla $\rho = \frac{\lambda}{\mu} < 1$. Na uvedeném modelu součet všech intenzit λ je 176 vozidel za minutu, to činí 2,93 vozidla na vteřinu a křižovatka obsloužila během jednoho cyklu o délce 296 vteřin 264 vozidel, tedy intenzita obsluhy je 0,89 vozidel za vteřinu. Rovnice $\rho = \frac{2,93}{0,89} = 3,29$, křižovatka není ve stabilizovaném stavu, intenzita provozu křižovatky musí být $\rho < 1$, proto dojde ke znásobení jízdních pruhů na vstupu pro intenzity λ . Po pětinasobení jízdních pruhů pro obslužení vstupní intenzity λ_1 projede křižovatkou během 2 minut na signál „volno“ za jeden cyklus 150 vozidel, v převodu na cyklus 296 vteřin je to projetí 0,5 vozidla za vteřinu křižovatkou, intenzita λ_1 je 30 vozidel za minutu a přepočtu 0,5 vozidla za vteřinu. Výsledkem je intenzita provozu křižovatky $\rho = \frac{0,5}{0,5} = 1$. Nyní se blížíme ke stabilitě křižovatky. Stabilita křižovatky by byla zajištěna za předpokladu, kdyby během zelené fáze odbavila až 180 vozidel, což činí intenzitu odbavení 0,6 vozidla za vteřinu během jednoho cyklu čtyřfázové řízení křižovatky a výsledná intenzita křižovatky by byla $\rho = \frac{0,5}{0,6} = 0,83 < 1$. Nyní je intenzita provozu křižovatky ve stabilním stavu.

Na uvedeném modelu rozptyl intenzit je dán vzorcem: $\sigma^2 = \frac{\lambda\mu}{(\mu-\lambda)^2} = \frac{2,93*0,89}{(0,89-2,93)^2} = \frac{2,6077}{4,1616} = 0,62$.

Optimální obsluhu křižovatky získáme nalezením vztahu, když intenzita μ se rovná intenzitě λ na stupu, pak platí: $\lambda_{\text{optimum}} = \mu_{\text{optimum}}$.

Z prostorově časové analýzy světelná křižovatka rozděluje dopravní proud do skupin vozidel, na obrázku 29 je zobrazen jízdní proud, který je rozdělen světelnou křižovatkou. Červená fáze zastaví vozidla a vozidla se nashromáždí do fronty, na zelenou fázi jedou vozidla společně ve skupině a vytvoří kolonu vozidel. Vozidla se v koloně vzájemně ovlivňují a mohou se zpomalovat.

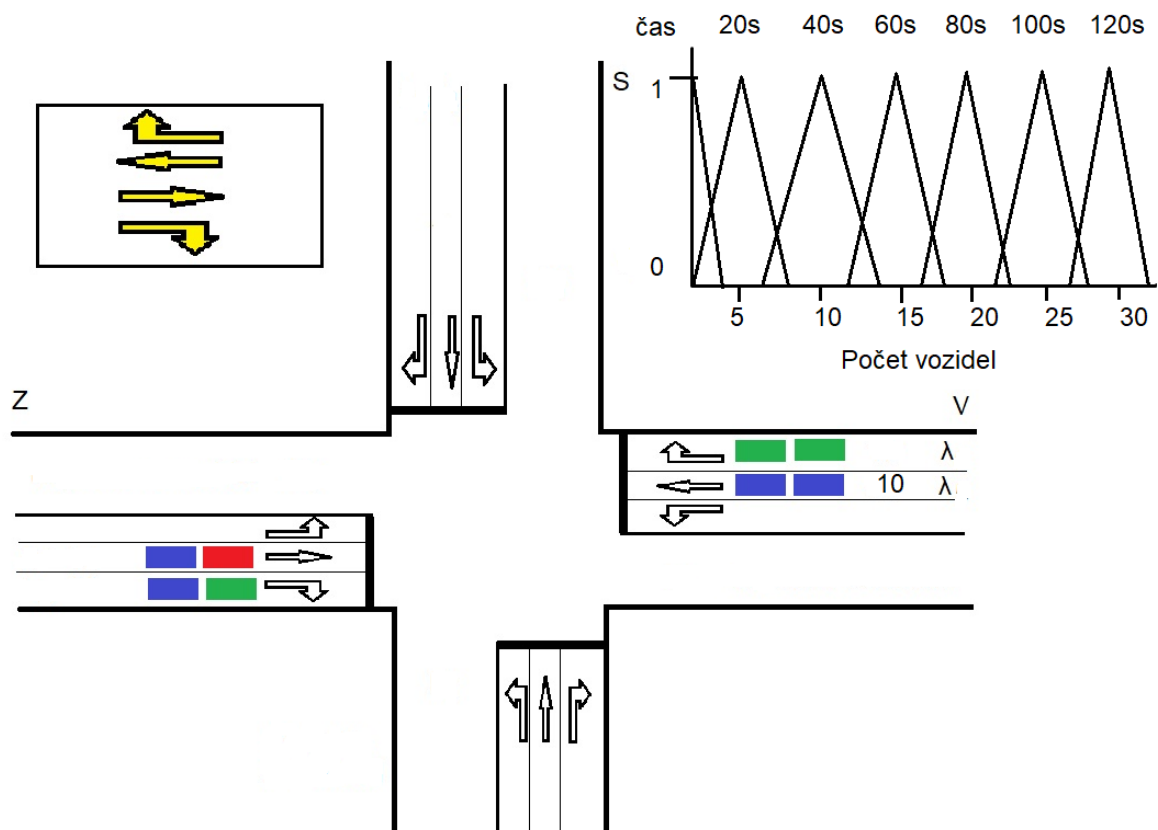


Obrázek 29 - Dělení dopravního proudu do skupin vozidel (Lachnit, 2005, s. 12)

4.2.3 Optimalizace řízení světelné křižovatky s fuzzy řadičem

Další optimalizací je řešení provozu čtyřramenné křižovatky podle fuzzy řadiče.

Na obrázku 30 je vyobrazena situace s fuzzy řadičem, který reguluje dopravu podle počtu vozidel v jízdním pruhu, pokud je v jízdním pruhu 10 vozidel, délka zelené světelné signalizace bude 40 vteřin. Pokud bude v jízdním pruhu příliš vozidel 27 a více, délka světelné signalizace bude maximálně 120 vteřin. Na obrázku 30 je vyznačen na druhou fázi průjezdu křižovatkou, kde v přímém směru z východního směru na západní je detekováno 10 vozidel a fuzzy řadič přiřadí délku zelené 40 vteřin. Dále během této 40 vteřinové doby při intenzitě λ (5 vozidel za minutu, tj. 1 vozidlo za 12 vteřin) přijedou 3 vozidla a fuzzy řadič prodlouží interval o 12 vteřin na 52 vteřin. V prodlouženém čase o 12 vteřin přijede jedno vozidlo a interval se prodlouží o 4 vteřiny na 56 vteřin, tedy má projet 14 vozidel. Dle celkové řazení doby signalizace je detekováno 14 vozidel a fuzzy řadič přiřadí tuto hodnotu do středně dlouhé doby zeleného signálu 60 vteřin, čímž stihne projet 15 vozidel. Až budou světelné signály pro jízdní pruhy ukončeny, nastane třetí fáze průjezdu křižovatkou, kde opět jsou signály nastaveny podle počtu vozidel. Na obrázku 30 vpravo nahoře jsou intervaly pro zelenou signalizaci podle počtu vozidel, nahoře vlevo jsou zobrazeny jízdní směry pro druhou fázi.



Obrázek 30 - Čtyřramenná křižovatka řízena fuzzy řadičem (Zdroj: Autor)

Tabulka 5 zobrazuje periody zelené signalizace na SSZ podle počtu vozidel v jízdním pruhu a slovní proměnné podle počtu vozidel.

Tabulka 5 - Hodnoty pro fuzzy řadič (Zdroj: Autor)

Počet vozidel [x]	5	10	15	20	25	30
Slovní hodnota proměnné x	velmi málo	málo	středně	hodně	velmi hodně	příliš
Perioda [s]	20	40	60	80	100	120

4.2.4 Řízení světelné křižovatky podle Markovova rozhodovacího procesu

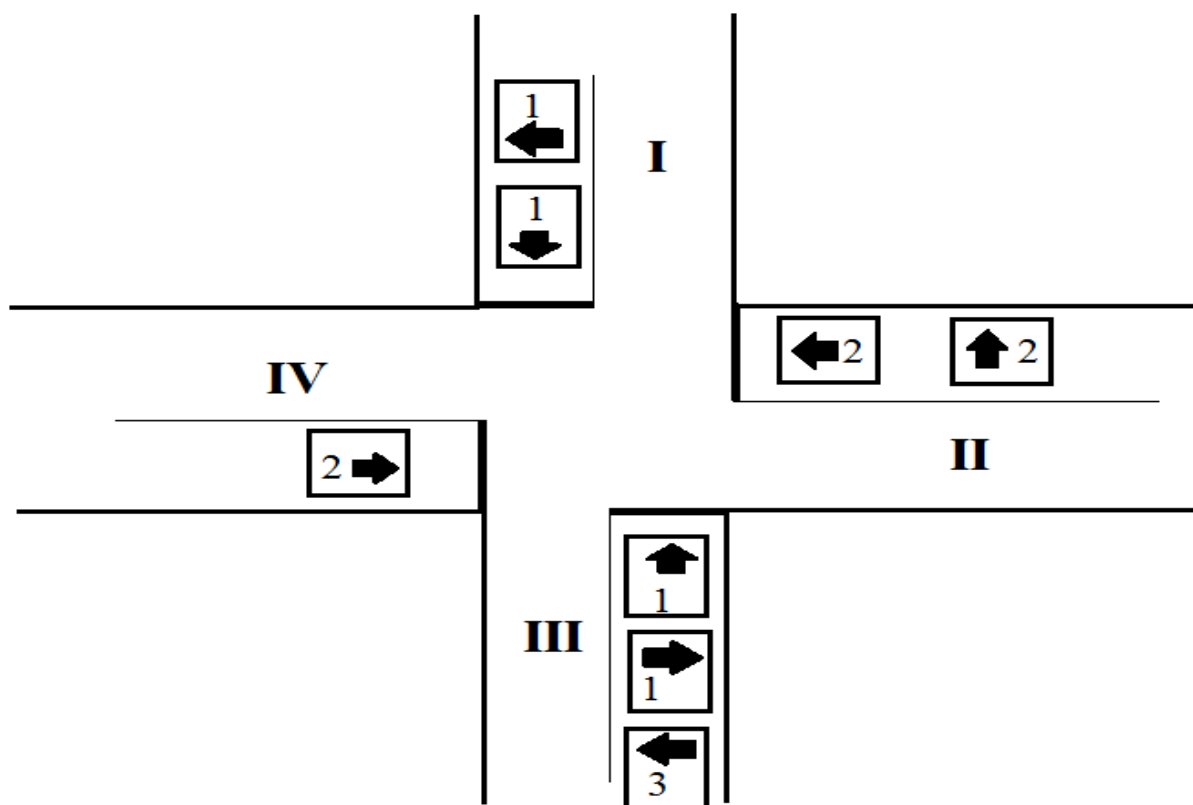
Dalším řešením provozu světelné křižovatky je podle **Markovova rozhodovacího procesu**.

Problém řízení světelné křižovatky může být formulován jako **Markovův rozhodovací proces** pro stochastický dynamický systém s kritériem průměrných nákladů. Stav systému se vyvíjí v nejistotě a pořadí rozhodování musí být vykonáno. Na základě dopravní situace v reálném čase, podle počtu vozidel čekajících v řadách, musí být rozhodnuto, který dopravní proud má přednost v jízdě a v jak dlouhé periodě. Současný stav určuje nové konfigurace, které konfigurace budou použity v budoucnosti. Řešením Markovového

rozhodovacího problému je postup, který určí stav přechodu k minimalizaci průměrných nákladů (Mak 2007, s. 2).

Hlavní myšlenka dynamického programování je, že optimální rozhodování může být odvozeno podle množství odvozeného od každého stavu v systému. Necht' je uzavřený prostor S , ve kterém se nachází stavy x , tedy $x \in S$. Přejchodová pravděpodobnost je vyjádřena $p(x, a, y)$, kde a vyjadřuje pravděpodobnost, x je současný stav, y je budoucí stav (Mak, 2007, s. 3).

Je dána jednoduchá čtyřramenná křižovatka zobrazena na obrázku 31. Dopravní proudy (I, II, III, IV) jsou označeny podle směru hodin. Vozidla přijela do jízdnic pruhů a hodlají projet křižovatkou, vozidla projedou křižovatkou v mimo kolizních směrech. V první fázi projedou křižovatkou vozidla z proudů I a III. V druhé fázi projedou křižovatkou vozidla z proudů II a IV. Ve třetí fázi projede vozidlo z proudu III do proudu IV. Pořadí fází jsou označena číslicemi na animovaných vozidlech na obrázku 31.



Obrázek 31 - Izolovaná čtyřramenná křižovatka v Markovově rozhodovacím procesu (Zdroj: Autor)

Čas je formulován diskretním časem a rozdělen do slotu. Jeden slot znamená čas potřebný pro projetí křižovatky jedním vozidlem. Pokud jsou v jízdnic pruhu 2 vozidla pro stejnou fázi,

budou obsazeny 2 sloty. Rozložení slotů pro opuštění křižovatky podle fází a počtu detekovaných vozidel je uveden v tabulce 6.

Tabulka 6 - Diagram světelných signálů, barevně oddělených slotů (Mak, 2007, s. 11)

Fáze	1. fáze				2. fáze					3. fáze				
I ↓	zelená	zelená	žlutá	žlutá	červená	červená	červená	červená	červená	červená	červená	červená	červená	červená
II ←	červená	červená	červená	červená	červená	zelená	zelená	žlutá	žlutá	červená	červená	červená	červená	červená
III ↑	zelená	zelená	žlutá	žlutá	červená	červená	červená	červená	červená	červená	zelená	žlutá	žlutá	červená
IV →	červená	červená	červená	červená	červená	zelená	žlutá	žlutá	červená	červená	červená	červená	červená	červená
Sloty	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

Stav systému představují dva vektory, jeden představuje stav dopravy a druhý stav světelné signalizace. Stav dopravy je vyjádřen vektorem $k = (k_1, k_2, k_3, k_4)$, kde k_f je počet vozidel v dopravním proudu. Druhý vektor je stavem SSZ $x = (l, i)$ s $l \in \{1,2\}$ a s kombinací zelené ($i = 0$), nebo první žluté ($i = 1$), druhé žluté ($i = 2$), nebo červené ($i = 3$). Stav SSZ je popsán stavem x , protože když jedni mají zelenou a žlutou, ostatní mají červenou. Proto je vektor označen $(k, x) = ((k_1, k_2, k_3, k_4), (l, i))$, celkem šesti dimenzionální vektor (Mak, 2007, s. 12).

V každém stavu je několik akcí, ze kterých musí být vybráno rozhodnutí. Rozhodnutí závisí na stavu světelné signalizace a také na délce řady vozidel. Z možností pro rozhodnutí je několik situací:

- pokud jsou všechna světla červená, je možno nadále pokračovat červenými světly pro všechny směry, nebo dát zelenou v jedné z kombinací,
- pokud je zelená pro jednu kombinaci, jsou dvě možné rozhodnutí: buď nadále svítit zelenou barvou, nebo změnit signalizaci na první žlutou barvu,
- na konci slotu první žluté barvy je rozhodnutí: pokračovat do druhého žlutého slotu,
- po druhé žluté barvě, je pouze rozhodnutí změnit všechny signalizace na červenou,

(Mak, 2007, s. 12).

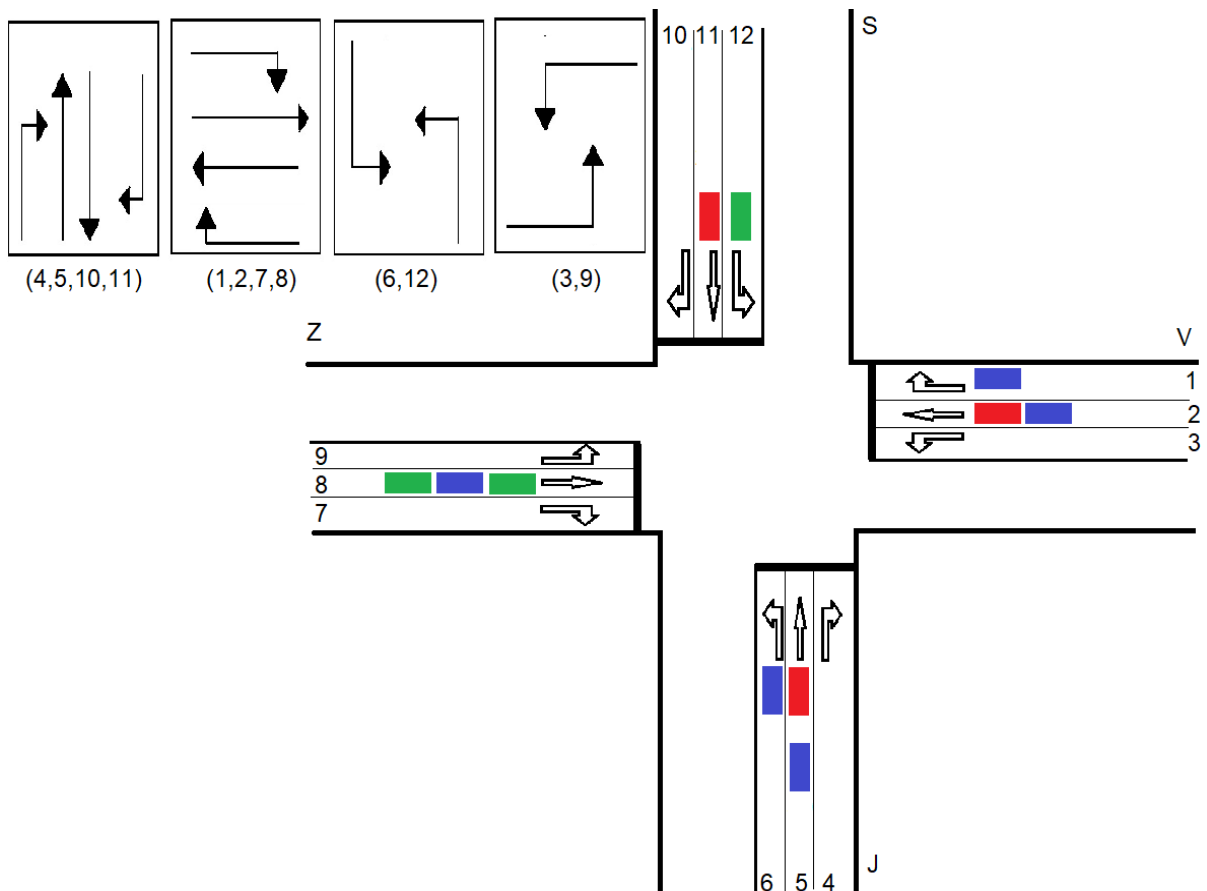
Cílem je minimalizovat celkový průměrný čas čekání na vozidlo. Podle Littleových pravidel toto odpovídá minimalizování průměrného počtu vozidel čekajících v řadách. Proto nákladová funkce je započítána na každé vozidlo v dopravním proudu. Proto nákladová funkce je součtem vozidel v dopravním proudu:

$$C(k) = \sum_{f=1}^4 k_f \quad (50)$$

kde k_f je počet vozidel (Mak, 2007, s. 13, 14).

Markovův rozhodovací proces na minimalizaci nákladové funkce pro řízení světelné křižovatky. Modelem je izolovaná čtyřramenná křižovatka, ve které jsou v čase t (x) detekována vozidla v jízdních pruzích. Křižovatka má 12 jízdních pruhů pro přijíždějící vozidla, v počátečním stavu pro rozhodnutí jsou na křižovatce detekována vozidla v jízdních pruzích. V prvním jízdním pruhu je 1 vozidlo, v druhém jízdním pruhu 2 vozidla, v pátém jízdním pruhu jsou 2 vozidla, v šestém jízdním pruhu je 1 vozidlo, v osmém jízdním pruhu jsou 3 vozidla a v jedenáctém jízdním pruhu je 1 vozidlo, ve dvanáctém jízdním pruhu je 1 vozidlo. Počet vozidel se na křižovatce se shoduje s obrázkem 32. Křižovatka je řízena čtyřfázovým cyklu tak, aby nedošlo ke kolizi vozidel. Jednotlivé fáze obsahují následující jízdní pruhy:

1. fáze (k_4, k_5, k_{10}, k_{11}), počet detekovaných vozidel $(0,2,0,1)$, hodnota nákladu je $C_I(k) \sum k=3$,
2. fáze (k_1, k_2, k_7, k_8), počet detekovaných vozidel $(1,2,0,3)$, hodnota nákladu je $C_{II}(k) \sum k=6$,
3. fáze $(6,12)$, počet detekovaných vozidel $(1,1)$, hodnota nákladu je $C_{III}(k) \sum k=2$,
4. fáze $(3,9)$, počet detekovaných vozidel $(0,0)$, hodnota nákladu je $C_{IV}(k) \sum k=0$.



Obrázek 32 - Model křižovatky pro Markovův rozhodovací proces na minimalizaci nákladové funkce

(Zdroj: Autor)

Nákladová funkce je počet, který odpovídá minimalizování průměrného počtu vozidel čekajících v řadách. Nyní se najde maximum pro jednotlivé fáze a fáze s největším maximem bude počáteční fází. Je zadána maximalizační funkce $\max_{\text{fáze}}$.

$$\text{Max}_{\text{fáze}} = \{C_I(k), C_{II}(k), C_{III}(k), C_{IV}(k)\} = \{3, 6, 2, 0\}, \max_{\text{fáze}} = \{6\}$$

Křižovatka začne druhou fází, dalším maximem je 3 v první fázi a posledním sledem v cyklu je třetí fáze. Čtvrtá fáze není obsazena, bude z cyklu přeskočena.

Pořadí fází v tomto cyklu je druhá, první, třetí.

Čas je formulován diskrétním časem a doba je rozložena do slotů. Rozložení slotů pro opuštění křižovatky podle fází a počtu detekovaných vozidel je uveden v tabulce 7.

Tabulka 7 - Diagram světelných signálů, barevně oddělených slotů (Zdroj: Autor)

Jízdní pruhy	Druhá fáze					První fáze					Třetí fáze				
1	Green	Yellow	Yellow	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange
2	Green	Green	Yellow	Yellow	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange
3	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange
4	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange
5	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Green	Green	Yellow	Yellow	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange
6	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Green	Yellow	Yellow	Orange
7	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange
8	Green	Green	Green	Yellow	Yellow	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange
9	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange
10	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange
11	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Green	Yellow	Yellow	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange
12	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Orange	Green	Yellow	Yellow	Orange
Sloty	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Křižovatkou projelo 11 vozidel, a bylo podle pravidel rozhodování potřeba 15 slotů. Vzhledem k tomu, že podle přednastavených rozhodovacích pravidel jsou po každé zelené signalizaci obsazeny 2 sloty žlutou signalizací, mohou vozidla projet i na žlutou signalizaci a tím se zvyšuje prostor na počet projetých vozidel křižovatkou, tedy na výstupní intenzitu μ . Pokud intenzita provozu křižovatky je $\rho = \frac{\lambda}{\mu} < 1$, potom je křižovatka ve stabilizovaném stavu.

4.3 Závěr kapitoly modelu křižovatky s optimálně nastavenou signalizací

Kapitola přináší informace o dopravním proudu, analýzu dopravního proudu podle zákona kontinuity, ve kterém jsou rozhodující veličiny intenzity, hustoty a rychlosti. Tyto veličiny jsou ve vzájemném stavu a určují přímkový vztah mezi rychlostí a hustotou. Také je uveden fundamentální diagram v závislosti vztahu na intenzitě a hustotě.

Na základě analýzy dopravního proudu je v praktické části optimalizována světelná signalizace podle intenzit na vstupu a intenzit na výstupu s ohledem na dopravní proud v režimu volného toku (free flow). Dalším řešením optimalizace řízení světelné signalizace je použitím fuzzy regulátoru, regulující čas světelné signalizace podle počtu vozidel v jízdnicích pruzích.

Nadále je v kapitole uveden Markovův rozhodovací proces na řízení světelné křižovatky s ohledem na minimalizaci čekací doby vozidel v řadě před křižovatkou. Křižovatka je čtyřfázově rozdělena podle nekolizních průjezdových fází a podle počtu vozidla je vyhodnocena situace. Fáze, která má vyšší zatížení vozidly, má prioritu a je přednostně spuštěna. Pokud fáze není obsazena vozidlem, je přeskočena nebo je jí dán nejmenší časový prostor. Tento rozhodovací proces o minimalizaci časů vychází z Littleových pravidel.

V této kapitole je uvedena optimalizace provozu světelné křižovatky a v následné kapitole je uveden model vzájemně propojených křižovatek s telekomunikační sítí internetu věcí.

5 Model křižovatek vzájemně propojených přes telekomunikační síť Internet of Things, v níž křižovatky výměnou dat mezi sebou komunikují a řídí provoz

5.1 Model křižovatek v síti IoT

Tato kapitola přináší praktickou část diplomové práce, kdy na základě předchozích znalostí zejména o internetu věcí a algoritmů na optimální řízení křižovatek, též i telematiky a síťových připojení, je sestaven model vzájemně propojených křižovatek v síti IoT.

5.1.1 Úvod do architektury sítě IoT

Poté co se v předchozí kapitole navrhl model křižovatky s nastavenou signalizací dle hustoty dopravy, v této kapitole je tento model propojen v síť křižovatek s podporou sítě internetu věcí, ve kterém si křižovatky posílají data. Na základě komunikace o stavech dopravních proudů řídí plynuleji dopravní provoz.

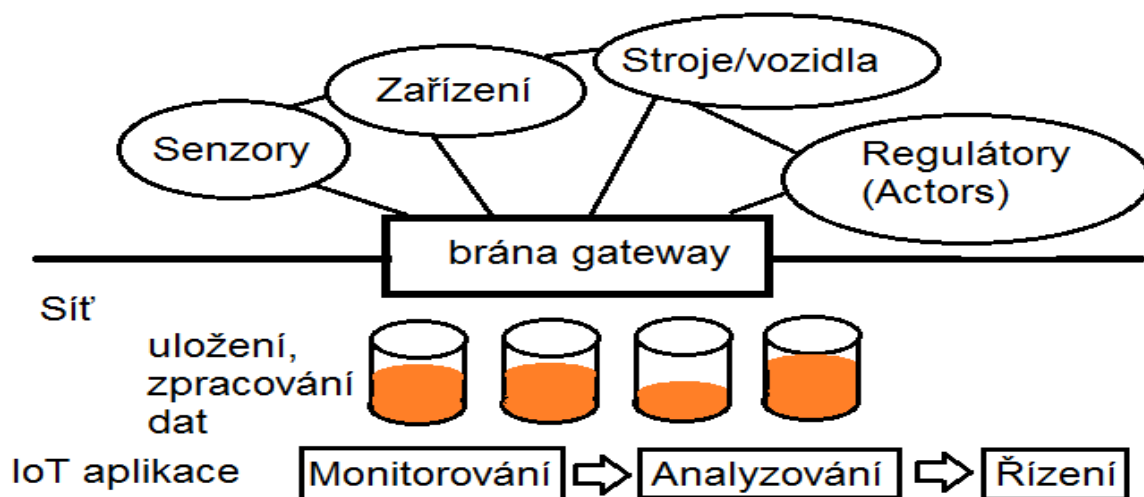
Křižovatky jsou řízeny dle algoritmu na snížení kongescí na křižovatkách a tím i okolnostmi s kongescemi spojenými, jako je snížení emisních plynů a snížení spotřeby paliva a zkrácení cestovních dob.

Model je zjednodušený popis zejména matematický, systému nebo procesu, který pomáhá výpočtů nebo předpovědím.

Dříve než začneme s modelem křižovatky, navrhne si schéma propojení senzorů k síti IoT, která bude páteřním systémem přenosu dat.

Síť IoT představuje propojení zařízení a senzorů do sítě internet. Síť se skládá ze senzorů, které měří fyzické vlastnosti, jako jsou teplota, vlhkost, rychlost a jiné. Zařízení sbírají data ze senzorů stejně jako stroje a vozidla sbírají data ze senzorů, například senzor na opotřebení brzdových destiček ve vozidle. V případě senzorů na řízení křižovatky, senzory snímají vozidla projíždějící a vjíždějící do prostoru křižovatky. Senzory, zařízení, stroje, vozidla a regulátory, například časovače, které zapínají a vypínají stroj, světlo v určitou dobu, vstupují do sítě skrze bránu gateway. V síti jsou data ukládána a zpracovávána. IoT aplikace pomáhají monitorovat, analyzovat a řídit. Monitorování pomáhá porozumět současným

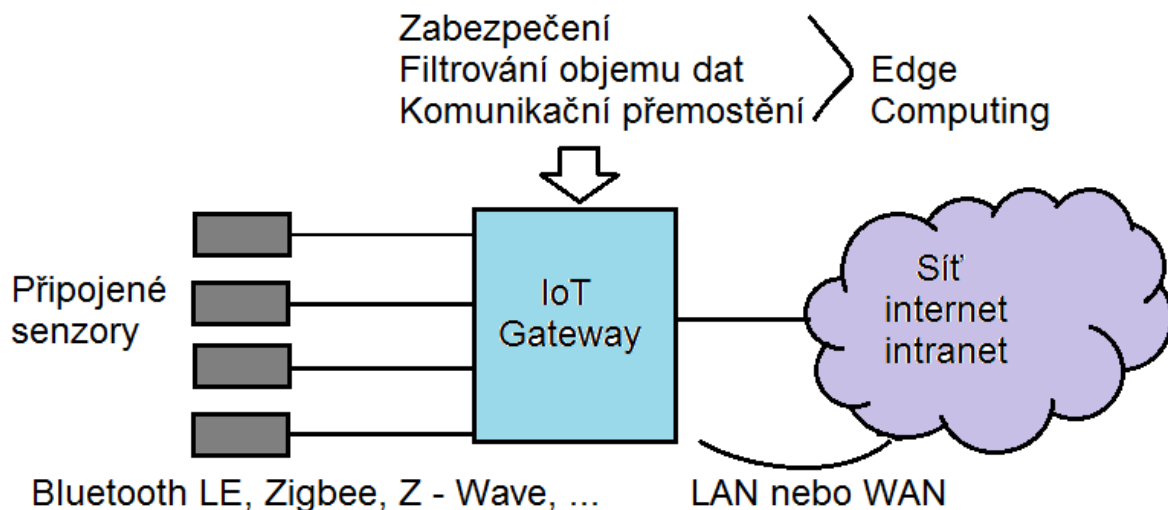
podmínkám senzorů a zařízení. Analyzování dat pomáhá najít vzory a dokonce učinit předpovědi jako ideální čas, kdy má stroj začít zpracovávat další úlohu. Funkce řízení pomáhá reagovat na monitorovaná a analyzovaná data. V této funkci může být nahrazen člověk, systém na předdefinovaných pravidlech rozhoduje a řídí algoritmus bez účasti člověka. Propojení senzorů, zařízení, strojů a regulátorů k síti IoT zobrazuje obrázek 33.



Obrázek 33 - Schematické propojení senzorů a zařízení k síti IoT (Zdroj: Autor)

Brána gateway poskytuje most mezi různými typy komunikačních technologií, různé typy spojení, rozhraní a protokolů. Příkladem je internet gateway, který spojuje domácí síť LAN s poskytovatelem internetu přes globální síť internet WAN s protokoly HDLC, PPP a TCP/IP.

IoT gateway je mostem mezi senzory a regulátory na jedné straně a internetem či intranetem na druhé straně. Komunikační technologie mezi senzory a regulátory je Bluetooth LE, Zigbee, Z – Wave. Druhou stranou komunikace IoT gateway je LAN nebo WAN. IoT gateway poskytuje komunikační přemostění, filtruje objem dat a zahrnuje zabezpečení, toto je známé jako Edge Computing. Uvedené přemostění komunikace skrze IoT gateway je na obrázku 34.



Obrázek 34 - Schematické propojení brány IoT gateway se senzory (Zdroj: Autor)

Zařízení internetu věcí obsahují senzory, procesor, paměť a zdroj energie. Bezdrátová síť senzorů WSN (Wireless Sensor Network) a různé typy zařízení mohou být používány k řízení komplexních situací v reálném čase.

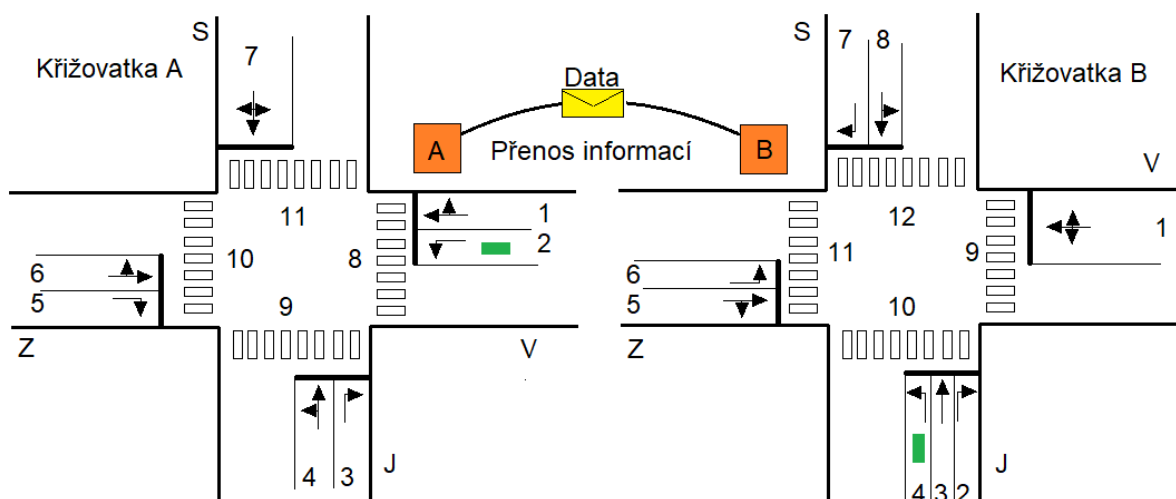
5.1.2 Systém propojení dvou křižovatek a vzájemná synchronizace

V navrhovaném modelu jsou dvě křižovatky vzájemně propojené a posílají si data o dopravních proudech v každém jízdním pruhu. Navrhovaný model je zobrazen na obrázku 35 včetně očíslovaných přechodů a proudů. Křižovatka A má 11 dopravních proudů, přičemž 8 až 11 jsou proudy, přechody pro chodce. Křižovatka B má 12 dopravních proudů, ve kterém jsou zahrnuty přechody pro chodce. Dopravní proudy jsou označeny P_1, P_2, \dots, P_n .

Cílem propojení je najít shodnou světelnou fázi signalizace mezi křižovatkami, aby zrovna jedoucí kolona vozidel přijíždějících z jihu křižovatky B, na obrázku 34 zobrazena kolona jako zelený obdélník, směrem doleva do křižovatky A odbočila vlevo na jih bez časové prodlevy.

Úkolem je v každé křižovatce podle proudů vyhledat nekolizní proudy. Nekolizní jsou ty, když vstoupí požadavky současně, tak nedojede ke kolizi. Nejprve se stanoví nekolizní proudy, k tomu je vhodné sestavit graf bezkoliznosti $G = (V, H)$, vrcholy jsou proudy a pokud jsou hrany mezi vrcholy, jsou bez kolize (Tuzar et al., 1997, s. 201).

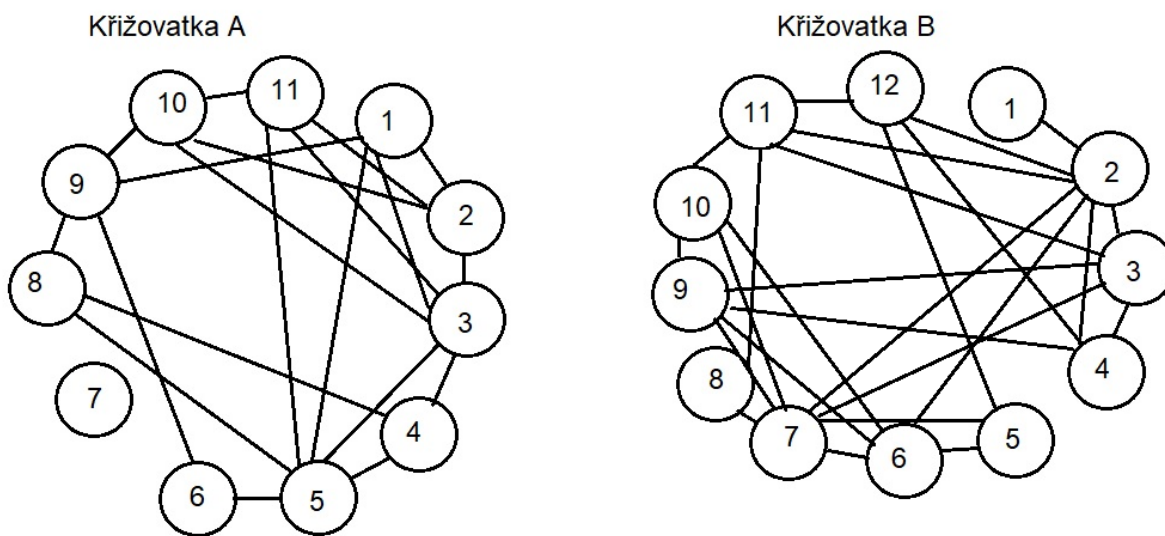
System výměny dat mezi dvěma vzjemn propojenými křižovatkami



Obrázek 35 – System výměny dat mezi dvěma propojenými křižovatkami (Zdroj: Autor)

Graf bezkoliznosti je uveden na obrázku 36 pro obě křižovatky A i B.

Graf bezkoliznosti



Obrázek 36 – Graf bez kolizních fází křižovatek A a B (Zdroj: Autor)

Graf bezkoliznosti pomue vyhledat fzov skupiny. Po vylouen opakující se fázových skupin, zskame soupis fázových skupin, kterými lze řídit křižovatku bez kolize dopravní proudů (Tuzar et al., 1997, s. 203).

Fázové skupiny jsou uvedeny pro křižovatku A, z nich jsou vyjmuty fáze pro chodce bez jízdního pruhu a proudy jsou uvedeny bez písmene p, následující: $F_1 = \{1,2\}$, $F_2 = \{1,5\}$, $F_3 = \{1,9\}$, $F_4 = \{3,4\}$, $F_5 = \{5,6\}$, $F_6 = \{7\}$, $F_7 = \{6,9\}$, $F_8 = \{1,2,3\}$, $F_9 = \{2,3,10\}$, $F_{10} = \{2,3,11\}$, $F_{11} = \{3,5,11\}$, $F_{12} = \{4,5,8\}$.

Fázové skupiny pro křižovatku B jsou následující: $F_1 = \{1,2\}$, $F_2 = \{2,4,12\}$, $F_3 = \{2,11\}$, $F_4 = \{2,6,7\}$, $F_5 = \{2,3,4\}$, $F_6 = \{2,3,7\}$, $F_7 = \{3,11\}$, $F_8 = \{3,7,9\}$, $F_9 = \{4,9,12\}$, $F_{10} = \{5,12\}$, $F_{11} = \{5,6,7\}$, $F_{12} = \{6,9,7,10\}$, $F_{13} = \{7,8\}$, $F_{14} = \{8,11\}$, $F_{15} = \{2,3,11\}$.

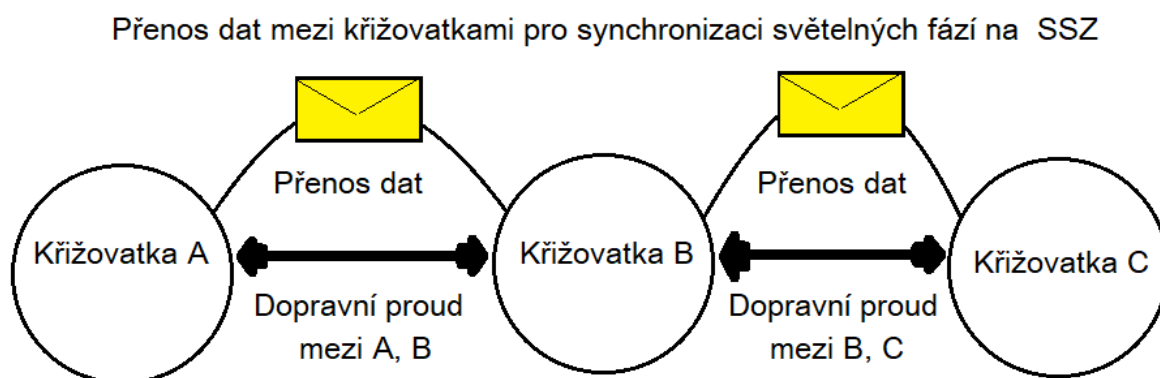
Dalším postupem je synchronizace fází, pokud je dekována kolona vozidel v křižovatce B v jízdním proudu P4, který směřuje do křižovatky A do jízdního proudu P2. Srovnávací mechanismus vybere vhodné fáze k propojení. V tabulce 8 je výběr vhodných fází.

Tabulka 8 – Výběr shodných fází k synchronizaci dvou křižovatek (Zdroj: Autor)

Fáze	Křižovatka A	Křižovatka B	Fáze
F_1	1,2	2,4,12	F_2
F_8	1,2,3	2,3,4	F_5
F_9	2,3,10	4,9,12	F_9
F_{10}	2,3,11		

Výsledkem synchronizace podle tabulky je 12 možností výběru. Vybere se fáze s ohledem na jiné jízdní proudy, pokud je na křižovatce A obsazen jízdní pruh P1 a P3 a na křižovatce B jízdní pruh P3, výběrem je propojení fází $F_8 = \{1,2,3\}$ a $F_5 = \{2,3,4\}$.

Synchronizaci světelných fází mezi křižovatkami lze v propojené síti křižovatek vykonat tak, že dvě sousedící křižovatky si vyměňují data o dopravních proudech, které na sebe navazují. Synchronizace mezi křižovatkami je zobrazena na obrázku 37.

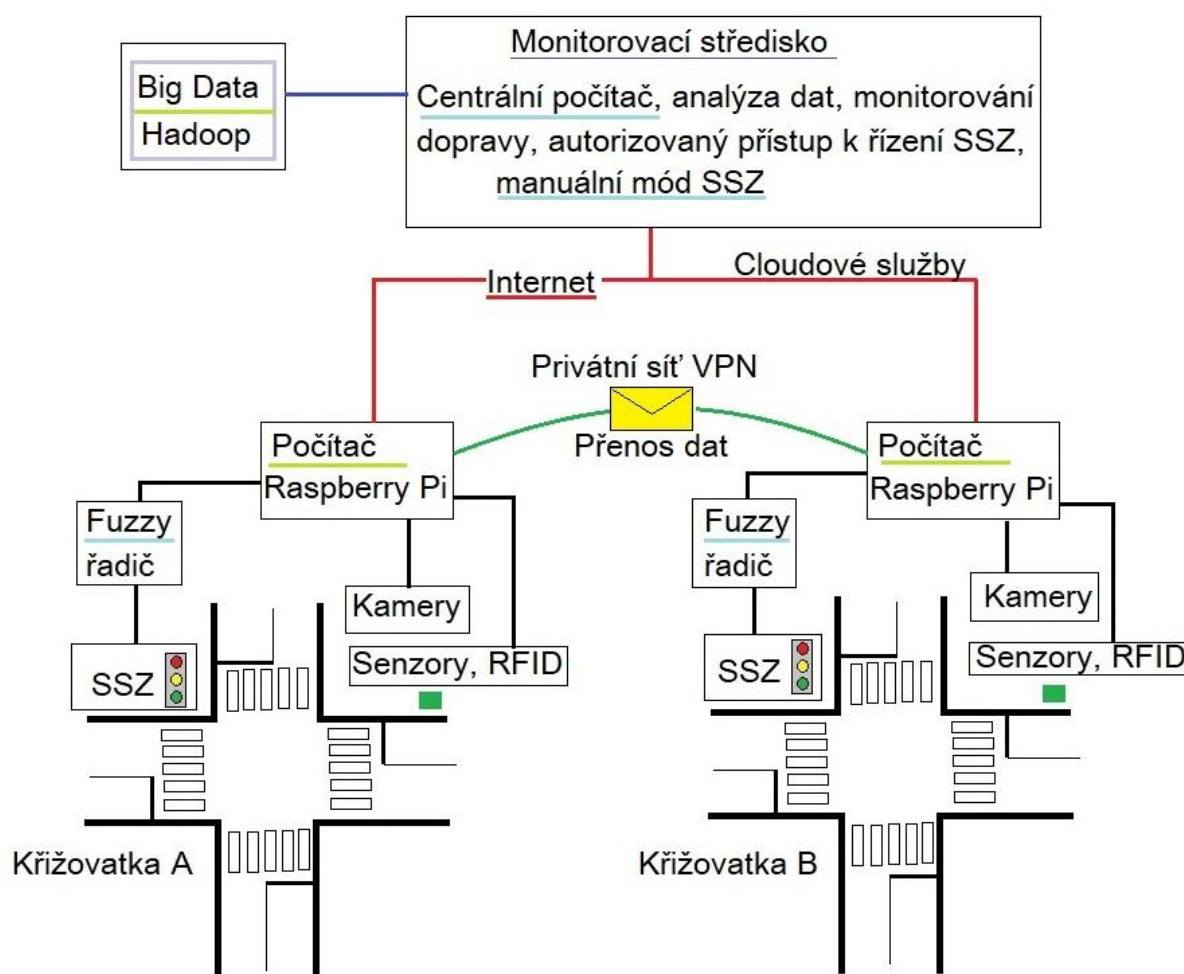


Obrázek 37 – Synchronizace fází pro SSZ v síti křižovatek (Zdroj: Autor)

Projíždějí-li vozidla v koloně mezi křižovatkami A, B a C, je křižovatka B informována o příjezdu kolony z křižovatky A. Pokud kolona vozidel se seřadí do jízdního pruhu ve směru do křižovatky C, vysílá křižovatka B data ke křižovatce C, že žádá synchronizaci světelných signálů mezi křižovatkami B a C. Tím se zredukuje čekací doba projíždějící kolony vozidel mezi křižovatkami.

5.1.3 Architektura propojených křižovek v síti internetu věcí

Architektura internetu věcí k propojení křižovek do sítě je vybavena senzory, RFID senzory, kamerami, AD převodníkem, počítačem Raspberry Pi, Fuzzy řadičem, světelnou signalizací SSZ, privátní sítí VPN pro vzájemnou komunikaci mezi křižovatkami, internetem jako páteřním spojením, cloudovými službami, monitorovacím střediskem a Big Daty s nástrojem Hadoop. Architektura je zobrazena na obrázku 38.



Obrázek 38 – Architektura IoT v síti propojených křižovek (Zdroj: Autor)

K této architektuře jsou vysvětleny následující pojmy k zařízením v kompletní síti IoT.

Koncepci počítače **Raspberry Pi** vytvořil Dr. Eben Upton a jeho spolupracovníci v počítačové laboratoři Cambridgeské university v Anglii. Raspberry Pi je přes malou velikost plně funkčním počítačem, na kterém může běžet plnohodnotný operační systém Linux. Počítač má devět konektorů: napájecí konektor, analogové video, audio, síťové rozhraní ethernet, multimediální rozhraní s vysokým rozlišením, sériové rozhraní USB, konektory pro budoucí rozšíření, víceúčelové vstupní/výstupní rozhraní (Norris, 2015, s. 15, 19).

AD převodník (analogově-digitální převod) je potřeba pro převod analogového signálu ze senzorů na digitální signál, se kterým pracuje počítač Raspberry Pi. Prvním krokem AD převodníku je vzorkování analogového signálu, kterým se získávají napěťové hodnoty pro převod čísla odpovídající úrovni napětí, k tomu se používá vzorkovací kmitočet. Druhým krokem AD převodníku je převedení vzorkovacích hodnot napětí na digitální číslo. Způsob převodu na digitální číslo záleží na typu použitého integrovaného obvodu AD převodníku (Norris, 2015, s. 113).

Cloudové služby jsou poskytované služby na internetu. Služby jsou rozděleny do několika typů:

- software jako služba na poskytnutí softwarové infrastruktury,
- platforma jako služba na poskytnutí výpočetní a softwarové infrastruktury formou služby. Klient dostane nejen hardware, ale i balíček aplikací,
- infrastruktura jako služba na poskytování výpočetní infrastruktury, úložného prostoru a síťovou konektivitou formou služby. Klient se nemusí starat o údržbu a provoz hardware,

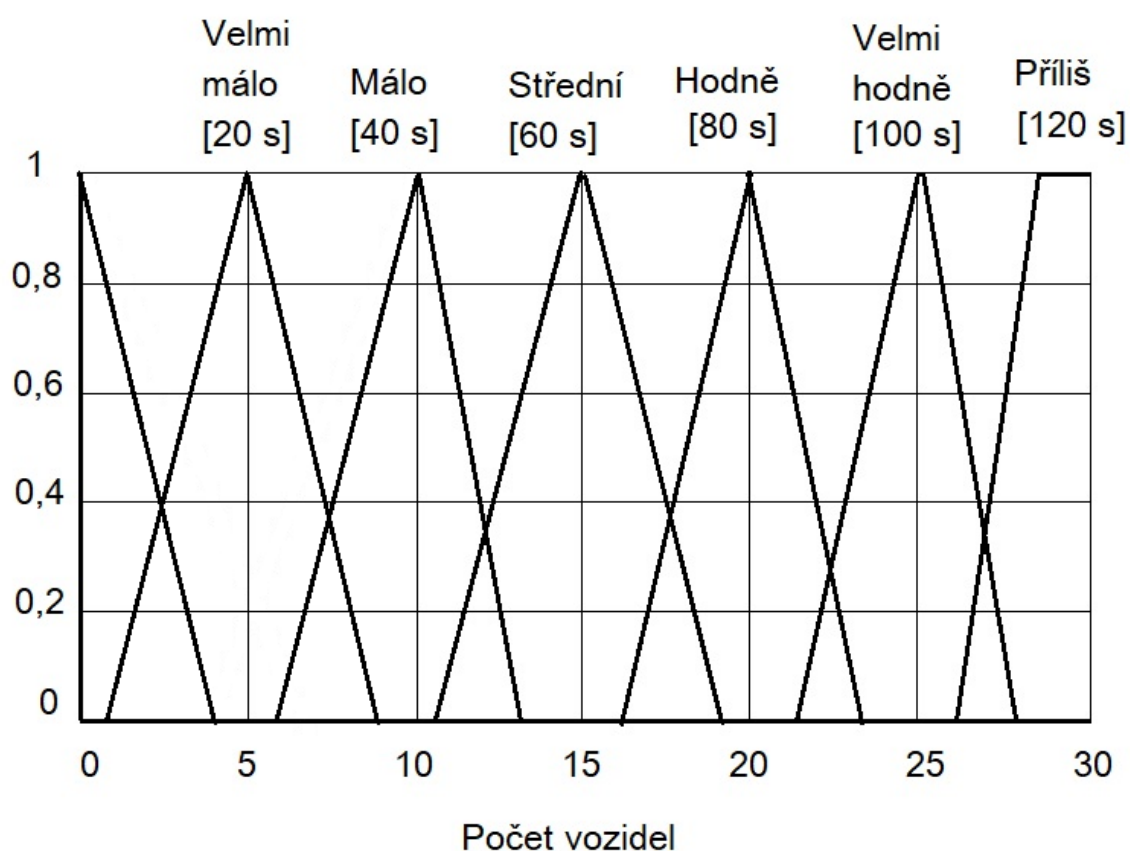
(Burian, 2014, s. 51).

Big Data jsou používány pro velké sady dat. Jedná se o data, která nemají dostatečnou strukturu, aby se daly uložit v tradičním datovém skladu. K Big Datům se řadí **Hadoop** platforma na zpracovávání distribuovaných dat, vytvořená pro sestavování indexů vyhledávání na způsob organizace dat v internetovém měřítku. Hadoop dokáže zpracovat petabyty a exabyty údajů přiřazením podmnožin těchto dat stovkám či tisícům serverům. Hadoop může být použit k přípravě dat pro analýzu, nebo jako analytický nástroj s jeho původním úmyslem. Nástupem sítě internetu, webu a dalších technologií se změnil charakter dat, data jsou volně strukturovaná, vysoce distribuovaná a mají vzrůstající objem. V této souvislosti se hovoří o trojrozměrnosti velikosti a růstu dat. Objem dat vzniklých v rámci provozu společností roste exponenciálně každý rok. Různorodost typů dat vzrůstá a rychlost, s jakou data vznikají, vzrůstá pokračující digitalizací (Burian, 2014, s. 90).

Monitorovací středisko kontroluje provoz na křižovatkách. Na křižovatkách jsou kamery, které vysílají online záběry o provozu křižovatek. V monitorovacím středisku je centrální počítač, který má prioritní možnost nastavení do manuálního módu řízení křižovatek, kdy řízení zajišťuje autorizovaný personál. Data sesbíraná z křižovatek o silničním provozu jsou skrze monitorovací středisko zaslána k uložení do Big Data. V monitorovacím středisku se provádí analýza dat o silniční dopravě a kontrola zabezpečení sítě.

Fuzzy řadič podle počtu vozidel přiřadí délku světelné signalizace. Ke své funkci zahrnuje jazykovou aproximaci. Fuzzy aproximace podle počtu vozidel je na obrázku 38.

Privátní síť VPN umožňuje virtuální soukromou zabezpečenou síť na internetu.

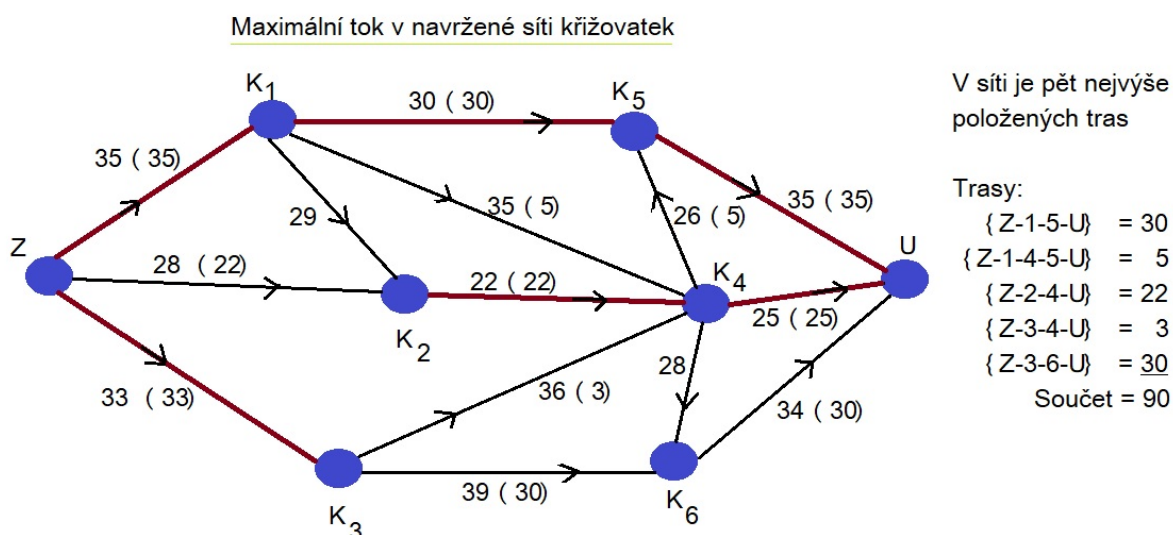


Obrázek 39 – Fuzzy aproximace podle počtu vozidel ve frontě (Zdroj: Autor)

Na obrázku 39 je fuzzy regulátor podle počtu vozidel ve frontě. K počtu vozidel je uveden a jazyková aproximace. Výstupním parametrem je délka zeleného signálu uvedena v hranaté závorce ve vteřinách. Se zvyšujícím se počtem vozidel, se rozšiřuje délka zeleného signálu, například ve frontě je 16 vozidel, délka zeleného signálu je 60 vteřin, neboť počet 16 znamená, že je aktivní pravidlo „Střední“ s výstupem [60 s].

5.1.4 Maximální dopravní tok v síti křižovatek

Na následujícím modelu síť křižovatek je vyznačena síť křižovatek jako graf, v němž uzly jsou křižovatky označeny K_1, K_2 až K_6 a začáteční uzel Z a ústí uzel U . Hrany mezi křižovatkami nesou propustnost za jednotku času, v tomto případě propustností je počet vozidel, které jedou mezi křižovatkami. Počet vozidel (propustnost) je odvozen od kritické hustoty, kdy dopravní proud přechází ze stavu volného toku (free flow) do stavu kongescí. Na jeden jízdní pruh je kritická hustota stanovena 25 vozidel na kilometr. Tedy jedno vozidlo zabere prostor kolem sebe 40 m včetně svoji délky. V městském provozu o rychlosti 50 km/h projede vozidlo dráhu 40 m za 3 vteřiny. Intenzita v takovém případě je jedno vozidlo za 3 vteřiny. Podle kritických hustot jsou ohodnoceny hrany grafu v závislosti na délce hrany, graf je zobrazen na následujícím obrázku 40.



Obrázek 40 – Maximální tok v navržené síti křižovatek (Zdroj: Autor)

Algoritmus sestavení maximálního toku v rovinné síti:

- výpočet zahájíme s nulovým tokem, sestrojíme nejvýše položenou nenasycenou orientovanou trasu ze zdroje Z do ústí U a vedeme po této trase tolik jednotek toku, abychom aspoň jeden úsek nasýtli,
- postup opakujeme tak dlouho, dokud existuje alespoň jedna trasa ze zdroje do ústí, která se skládá z nenasycených úseků,
- nelze-li druhý bod opakovat, je sestrojený tok v síti maximální a jeho hodnota je rovna součtu maximálních toků podle všech tras od zdroje do ústí,

(Tuzar et al., 1997, s. 234).

Výsledkem v navržené síti a součtem nejvýše položených tras je propustnost 90 vozidel za jednotku času.

5.2 Závěr kapitoly modelu vzájemně propojených křižovatek

Tato kapitola je praktickou částí a zahrnuje znalosti z předešlých kapitol zejména kapitolu o telekomunikační síti s podporou IoT.

Na úvodu kapitoly je úvod do architektury sítě internetu věcí, ve kterém jsou uvedeny součásti sítě, brána gateway mezi protokoly komunikační technologie mezi senzory a regulátory.

Dále následuje systém propojení dvou sousedících křižovatek a synchronizace světelných fází signalizace, které se provádí přes graf bezkoliznosti pro každou křižovatku a vyberou se dvě shodné fáze, na základě odeslaných dat mezi křižovatkami.

Dalším modelem je architektura propojených křižovatek, která obsahuje monitorovací středisko s výbavou pro sledování aktuálního silničního provozu a možností manuálního řízení křižovatky. Získaná data se ukládají do systému Big Data, neboť na ohromné množství dat běžná úložiště nestačí kapacitou. Páteří přenosu je síť internetu, v němž se data posílají ve virtuální privátní síti a v rámci cloudových služeb. Každá křižovatka je naprogramovaná v počítači Raspberry Pi, kde délku signalizace nastavuje fuzzy regulátor podle hustoty dopravních proudů.

Poslední úloha se zabývá maximálním tokem v síti, kdy mezi křižovatkami jsou hodnoty průtoku, počtu vozidel, nastaveny podle kritické hustoty na rozmezí dopravního proudu v režimu volného toku a začátkem kongesce.

6 Zabezpečení telekomunikační sítě na provoz křížovatek

6.1 Zabezpečení internetu věcí

Předmětem kapitoly je zabezpečení internetu, osvědčené postupy zabezpečení a hrozby internetu věcí. Šifrování dat a bezpečnost. Jedná se o teoretickou část kapitoly, ve které se čtenář seznámí s obecnými postupy zabezpečení.

6.1.1 Osvědčené postupy zabezpečení internetu věcí

Na začátku řetězu zabezpečení zařízení IoT jsou výrobci. Obecně někteří výrobci vyrábějí a prodávají zařízení IoT, která neobsahují dostatečné bezpečnostní funkce. To má za následek vážné poškození částí zařízení, jak i finanční, tak i abstraktní poškození, například pro širokou veřejnost. Jak se zařízení IoT rozšiřují a není poskytnuto zabezpečení těchto zařízení, škody způsobené v budoucnosti mohou být ještě větší. Podniky a individuální zákazníci zařízení IoT nedisponují technickými posudky k vyhodnocení nákupu podle parametru cena/užitek (cost/benefit). V úvahu může připadat, čím dražší zařízení, tím je řádně zabezpečeno (Corser, 2017, s. 1).

IoT překrývá další studijní obory, včetně mobilního výpočetního zařízení (Mobile Computing), Pervasive Computing, sítí bezdrátových senzorů (WSN – Wireless Sensor Network), Cyber Physical Systems. IoT představuje rozrůstající a měnící pole mnoha definic. IoT můžeme definovat, jako následující předepsaný způsob vyjádření (Corser, 2017, s. 2).

Internet věcí je pevné drátové nebo bezdrátové připojení s jedinečnou identifikací připojených zařízení, která jsou schopna zpracovávat data a komunikují mezi sebou bez lidské účasti.

Nějaká zařízení IoT pracují neustále bez dozoru a nepodléhají časté kontrole zabezpečení. Nejlepší způsob je izolovat přístup k zařízením a fyzický přístup k zařízením mají jen autorizované osoby. Tento způsob může pomoci blokovat nežádoucí osoby získat data a bránit se hackerům. Osvědčený postup zabezpečení zařízení je zahrnout několik vrstev přístupu, které vyžadují od útočníků obcházet spousty navržených překážek k zabezpečení a znepřístupnit tak nepovolený přístup k datům. Tam kde je zařízení zranitelné, mělo by se chránit, jedná se o otevřené TCP/UDP porty, výzvy k zadání hesla, místa jako webové

servery, nešifrovaná komunikace a rádiové spojení. Zranitelnost zařízení se objeví, když jsou zařízení zapojená. Zařízení mají být aktualizována a opravitelná (Corser, 2017, s. 4).

Výzkumní pracovníci zjistili, že nezabezpečených zařízení IoT v domácnostech a podnicích exponenciálně přibývá. Dalším vlivem na zabezpečení je zastarávání, spousta zařízení IoT má omezený životní cyklus (Corser, 2017, s. 5).

Zařízení IoT by neměla používat snadno zjistitelná hesla, včetně administrátora. Zařízení by neměla používat výchozí nastavení a neměla by mít zadní vrátka (back doors) a nástroj debug mód, utajený přístup od programátora. Stačí jedno odhalení tajného nastavení a můžou se nabourat do spousta zařízení. Každé zařízení by mělo mít unikátní heslo s výhodou restartování uživatelem. Hesla by měla být dostatečně odolná k odhalení metodou hrubé síly. Doporučuje se dvojitě heslo, které vyžaduje heslo od uživatele a dále je heslo vyžadováno bez znalosti hesla uživatele, například vygenerované heslo zaslané skrze zprávu SMS. Pro IoT aplikací podporujeme adaptivní ověření, které používá kontextuální informaci a strojově učící se algoritmus k vyhodnocení rizika zlého úmyslu a je více faktorů ověřování. Pokud je riziko vysoké, je uživatel nebo hacker dotazován s více ověřovacími faktory přístupu (Corser, 2017, s. 7).

Pokud je přístupové heslo silné a zabezpečeno, komunikace mezi zařízeními může být nabourána. V IoT je mnoho protokolů, např. Bluetooth, ZigBee, Z-wave, 6LoWPAN, Thread, Wifi, NFC, Sigfox, Neul, cellular a LoRaWAN. Záleží na protokolu a dostupnosti výpočetních zdrojů, zařízení může být slabě nebo silně šifrováno (Corser, 2017, s. 7).

Současné DDoS útoky jsou provedeny ve velké míře slabě zabezpečenými IoT zařízeními. V blízké budoucnosti bude připojeno 50 miliard zařízení k internetu a předpokládá se, že 1,1% z nich jsou schopna ovládnutím na dálku. To je 55 miliónů zařízení, která by mohla být použita při potenciálním DDoS útoku a dohromady vygenerovat až 55 **petabitů** za vteřinu (Corser, 2017, s. 8).

Rozdělení sítě do menších lokálních sítí použitím VLAN, IP adres nebo jejich kombinací. Rozdělení sítě je užitečné pro firewall zabezpečení a jasnou identifikaci jednoho nebo více zdrojů a cílového rozhraní platformy. Každému rozhraní firewall musí přidělit zabezpečenou zónu. Tento typ řešení je používán v průmyslu a může být užitečný v širších okolnostech. Oddělená zabezpečená síť s vyhrazeným kanálem by měla stačit. Pokud systém vyžaduje internet, virtuální soukromá síť (VPN) by měla být implementována (Corser, 2017, s. 9).

6.1.2 Hrozby internetu věcí

Bezpečnostní měřítka jsou efektivní v sítích, ale pouze tehdy, když máme zmapovanou síť. Pokud neznáme, co je v síti, je nemožné izolovat hrozby, které se objeví.

Silná bezpečnostní strategie zahrnuje odpovědi na otázky:

- Jak, kde a na co bude protivník útočit?
- Zda použijí zařízení IoT k dosažení útoku?
- Jaký efekt bude mít útok na organizaci nebo na síť?
- Zda důležité sekce sítě je potřeba izolovat a ochránit?

Zařízení IoT přidávají komplikace do zabezpečení sítě, ale hrozby jsou ještě zvládnutelné. Pokud má vlastník znalosti o síti, může být včas upozorněn, když je útok bezprostřední na periférii sítě. To poskytuje čas izolovat důležité části sítě před rozšířeným poškozením. Všechna zařízení by měla dostávat bezpečnostní záplaty, znalost bezpečnostních rizik a předcházení rizik jsou základy zabezpečené sítě (Hall, 2017, s. 11).

Systém IoT spoléhá na prostředníky k úspoře doby odezvy, pásma a úspoře energie. Zatímco proxy a gateway jsou nezbytné pro IoT, oba otevírají cesty pro útok. Dokonce když bezpečnostní protokoly IPsec a TLS jsou použity, obvykle dochází k porušení, když zprostředkovatel je schopen číst, měnit nebo vložit informace, které nebudou detekovány (Ericsson, 2017, s. 4).

Mezi hrozby se řadí především:

- neoprávněné získání dat,
- neoprávněné získání přístupových údajů, identity,
- neoprávněné získání obsahu komunikace a manipulace s daty,
- vyřazení nebo ovládnutí služby,
- neoprávněné využití cizích zdrojů,

(Pavlíček et al., 2017, s. 122).

Pokud se škodlivý software ocitne v novém prostředí, snaží se vytvořit své kopie a rozšířit na další zařízení. Využívá k tomu přenosu souborů, kromě různých sofistikovaných způsobů přenosu využívají i jiných analogických vlastností živých organismů jako jsou mutace, cizopasnictví. Principem zahlcení je umělé vytvoření ohromného počtu požadavků na některou veřejně dostupnou službu, při takovém počínání služba přestane požadavky vyřizovat nebo vyřizování je neúměrně dlouhé (Pavlíček et al., 2017, s. 123).

6.1.3 Zabezpečená IoT platforma

IoT se skládá z množství různých zařízení, senzory, aktory a dokonce i s cloud infrastrukturou. Zabezpečení IoT můžeme rozdělit do oblastí: zabezpečení senzorů, zabezpečení zařízení, edge zabezpečení a zabezpečení cloudové infrastruktury a sítě. Senzory s omezenými zdroji a schopnostmi nemají zabezpečovací mechanismy a stejně tak i mnoho zařízení. Zařízení jsou vázaná na síť a síť používají standardní bezpečnostní protokoly jako je TLS nebo standardní filtrovací techniky jakými jsou firewalls, gateways, edge uzly k zajištění šifrování komunikačního kanálu. Zařízení jsou zabezpečena případ od případu. Nejsnadnější cestou k ochraně koncových zařízení je zabezpečení sítě jednotným způsobem za bezpečnostní branou gateway (Leukerd, 2016, s. 32).

Zabezpečení jsou rozdělena do tří stupňů ochrany:

- prvním stupněm ochrany jsou právě síťová zabezpečení,
- druhým stupněm ochrany je zabezpečení senzorů a zařízení,
- třetím stupněm ochrany je monitorování a analýza hrozeb,

(Leukerd, 2016, s. 33).

Na zabezpečení dat se používají šifrovací schémata, v tomto případě se rozlišují šifrovací schémata na:

- homomorfní šifrování
- šifrování dle vyhledávání klíčových slov a vzorů

Homomorfní šifrovací schémata umožňují provést matematické operace na šifrování textu. Výsledek těchto výpočtů může být rozšifrován a bude odpovídat výsledkům stejných operací na prostém textu. Obecně je toto šifrování nežádoucí, protivník může porovnat zašifrovaný text s jiným zašifrovaným textem a dešifrovat ho do obdobného prostého textu. Stejná matematická operace může být dešifrována opakovaně. Homomorfní šifrování se stalo slavné v roce 2009, kdy pan Gentry představil první plně homomorfní šifrovací schéma. Předtím byla známá šifrovací schémata s homomorfními vlastnostmi. Homomorfní šifrování znamená, že šifrování textu je pod určitými operacemi, například ElGamal šifrovací schéma používá multiplikační operace. Gentryho schéma bylo první schéma s homomorfními oběma operacemi, aditivními a multiplikačními operacemi, proto se nazývá plně homomorfní šifrovací schéma. Několik dalších plně homomorfních šifrovacích schémat se nadále vyvíjí, například schéma „somewhat homomorphic encryption“ se nadále vyvíjí. Tyto schémata dovolí neomezené množství operací na šifrování textu či dat (Leukerd, 2016, s. 81).

Vyhledávací šifrování je popsáno jako šifrovací schéma, které hledá klíčová slova a vzory k šifrování. Zde jsou tři koncepty šifrovacích schémat.

Prvním je **symetrické šifrování** (Symmetric searchable encryption – SSE) je založeno na symetrické šifře. Odesílatel šifruje data a data si může před šifrováním upravit. Zašifrovaná data odesílatel nahraje na server a kdo má přístup ke stejnému tajnému klíči na dešifrování dat, může vyhledat zašifrovaná data uložena na serveru a dešifrovat tyto data. Nevýhodou je, když je dotaz předložen serveru, pak vyhledávací vzor je odhalen serverem (Leukerd, 2016, s. 81).

U symetrického šifrování jsou data šifrována stejným klíčem, odesílatel pomocí klíče data zašifruje a příjemce stejným klíčem dešifruje. Šifrovací klíč musí být velmi dobře chráněn, při větším počtu uživatelů klíče hrozí, že bude klíč kompromitován. Výhodou symetrického šifrování je nízká výpočetní náročnost. Použitím algoritmů se symetrickou šifrou je nenáročné na výkon, v případě komunikace s více subjekty neúměrně narůstá spotřeba klíčů (Pavlíček et al., 2017, s. 132, 133).

Druhým je **asymetrické šifrování** (Asymmetric searchable encryption – ASE) neboli veřejný klíč. Veřejný klíč na rozdíl od symetrického šifrování se liší tím, že uživatelé soukromých dešifrovacích klíčů zašifrovaných dat mohou být jiní, než ti, kdo zašifrovaná data veřejným klíčem vygenerují. Stejně jako u synchronního šifrování může být odhalen dotaz na serveru, kde jsou šifrovaná data uložena (Leukerd, 2016, s. 82).

Asymetrická šifra používá dva druhy klíčů, privátní a veřejný. Privátní klíč je znám pouze jednomu subjektu a veřejný klíč je volně dostupný všem. Komunikace probíhá tak, že odesílatel zašifruje zprávu veřejným klíčem příjemce a příjemce soukromým klíčem zprávu dešifruje. Každý účastník má svůj soukromý klíč a veřejné klíče jsou dostupné přes internet (Pavlíček et al., 2017, s. 133).

Odesílatel zašifruje zprávu svým soukromým klíčem a následně veřejným klíčem, příjemce musí kromě svého soukromého klíče použít i veřejný klíč odesílatele, tím se ověří autenticita odesílatele. Tímto způsobem funguje elektronický podpis. Asymetrická šifra je náročnější na výpočetní výkon. Kombinací symetrického a asymetrického šifrování vzniká hybridní šifra. Zpráva se zašifruje symetrickou šifrou, ke zprávě se přiloží tento klíč a ten se zašifruje asymetrickou šifrou. Příjemce nejdříve dešifruje symetrický klíč a následně dešifruje celou zprávu (Pavlíček et al., 2017, s. 134).

Třetím je **Single-database private information retrieval** (PIR) zaměřený na vyhledávání dat ze serveru bez odhalení toho, co uživatel vyhledává, tedy jaký je jeho dotaz (Leukerd, 2016, s. 82).

Mezi principy sítě IoT patří zabezpečení, bezporuchovost, odolnost, stabilita internetových aplikací a služeb, které jsou rozhodující k podpoře důvěry internetu. Jako uživatelé internetu potřebujeme mít vysoký stupeň důvěry v internet, v jeho aplikace a služeb spojené s dostatečným zabezpečením aktivit, které děláme online ve vztahu k rizikům spojené s těmito aktivitami. Internet věcí není jiný v tomto ohledu, zabezpečení v IoT je zásadně spojeno se schopnostmi uživatelů důvěřovat jejich prostředí. Pokud se zvyšuje počet připojených zařízení k internetu, rostou nové příležitosti potenciálního zneužití a zranitelnost zabezpečení. Slabě zabezpečená IoT zařízení by mohla sloužit jako přístupové body ke kybernetickému útoku, který by dovolil lstivě přeprogramovat zařízení nebo způsobit závadu. Slabě navržená zařízení mohou odhalit uživatelská data zloději a zanechají datové toky neadekvátně zabezpečený (Isoc, 2015, s. 20).

Spolu s potenciálními nedostatky navrženého zabezpečení, rychle rostoucí počet zařízení IoT, může zvýšit příležitosti k útoku. Pro představu, hodně propojených zařízení IoT, velmi slabě zabezpečených a připojených online k internetu, potenciálně ovlivní zabezpečení a odolnost internetu globálně a ne lokálně. Například nezabezpečená lednice nebo televize, která je infikována malwarem, může poslat tisíce spamových emailů celosvětově příjemcům, kteří používají domácí Wifi připojení (Isoc, 2015, s. 21).

V ekonomickém pojetí je nedostatek zabezpečení zařízení IoT výsledkem negativních externalit, kde náklady jsou vynuceny jednou stranou na straně druhé. Klasickým příkladem je znečištění prostředí, kde náklady na odklizení znečištění (negativní externality) jsou přeneseny na ostatní. V případě informačního zabezpečení, externality vzrůstají, když výrobci vyrábějí produkty, za které nenesou žádné náklady na zabezpečení, v tomto případě právní odpovědnost může ovlivnit výrobce k zaúčtování externalit a vyvinout více zabezpečené výrobky (Isoc, 2015, s. 21).

6.2 Zabezpečení sítě křižovatek s podporou IoT

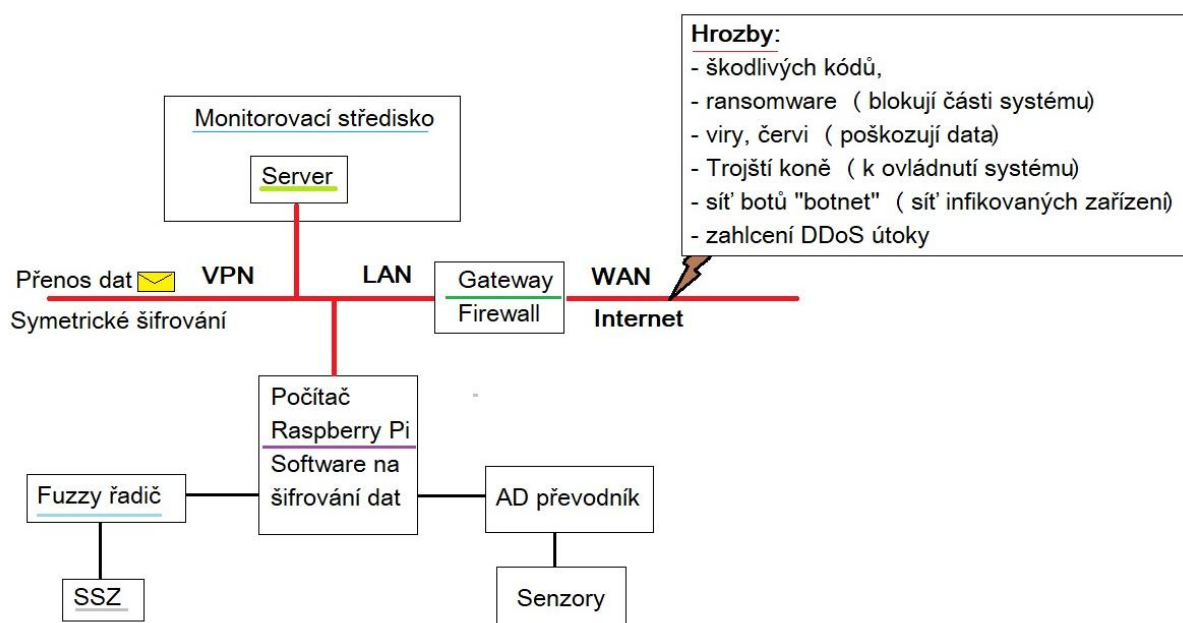
V praktické části kapitoly o zabezpečení sítě je použití zásad a návrh na zabezpečení sítě před škodlivými kódy.

6.2.1 Zabezpečení navrhované sítě

Zabezpečení místní sítě je podstatnou funkční částí před zvyšujícími se hrozbami útoků po internetu. Cílem škodlivých kódů je infikovat nová zařízení, poškodit je či vynášet skrytě

jejich data a šířit se dále po síti. Škodlivé kódy mohou změnit charakter zařízení, ovládnout či zablokovat systém. Ochranou proti škodlivým kódům je adekvátní zabezpečení.

V sestrojené síti křižovatek vznikají data u silničních senzorů, která se přenáší přes AD převodník do počítače Raspberry Pi a do Fuzzy řadiče k časování světelných signálů. Počítač Raspberry Pi má nainstalovaný program na šifrování dat a je připojen k internetu. Přes soukromou síť VPN přeposílá zašifrovaná data symetrickým klíčem sousední křižovatce pro synchronizaci světelných fází na SSZ a zašifrovaná data do monitorovacího střediska. Mezi místní síti křižovatek LAN a internetem WAN je brána gateway s filtrem firewall. Na obrázku 41 je zobrazen model navrhované křižovatky.



Obrázek 41 – Zabezpečení sítě křižovatek (Zdroj: Autor)

Zpravidla pro zabezpečení sítě jsou následující. Přístup k datům mají jen autorizované osoby, které znají šifrovací klíče. Přístup k řízení světelných signálních zařízení je složen z více úrovní zabezpečení. Pravidelná údržba sítě a obnova zastarávajícího zařízení a softwaru. Monitorování a analýza hrozeb. Data se přenáší šifrovaná symetrickou šifrou ve virtuální privátní síti pro zabezpečení přenosu dat, tím je dosaženo vysoké úrovně ochrany dat před neautorizovaným přístupem.

6.3 Závěr kapitoly zabezpečení telekomunikační sítě na provoz křižovatek

Předmětem této kapitoly je zabezpečení místní lokální sítě. Kapitola se dělí na dvě části. První část pojednává o obecných a osvědčených postupech zabezpečení internetu věcí, o hrozbách IoT, v neposlední řadě o zabezpečené IoT platformě. V zabezpečené IoT platformě jsou zmíněny typy šifrování a standardní filtrovací techniky jakými jsou firewall a gateway.

V druhé části kapitoly je popsáno zabezpečení sítě na provoz křižovatek. Datové přenosy získané z jednotlivých křižovatek jsou posílány po lokální síti mezi sousedními křižovatkami pro synchronizování světelných fází na SSZ a nadále jsou data poslány do monitorovacího střediska, kde jsou data nadále využívána. K přenosu dat po internetu se použije virtuální privátní síť, v níž jsou data navíc šifrována symetrickými klíči, které znají jen autorizované osoby z monitorovacího střediska. Tímto je zajištěn vysoký stupeň zabezpečení. Síť křižovatek je k internetu skrze bránu gateway s filtrem firewall.

7 Ekonomická analýza řízení světelných křižovatek s podporou sítě Internet of Things

7.1 Analýza přínosů řízení světelných křižovatek s IoT

V této části kapitoly jsou uvedeny přínosy IoT k efektivnějšímu řízení křižovatek, nejen ekonomické, ale zejména společenské, kde přínosy jsou zaměřeny na redukci emisí, hluchnosti z motorových vozidel a mají celospolečenský dopad na životní prostředí. Přínosy jsou následně shrnuty v analýze nákladů a přínosů.

7.1.1 Přínosy pro snížení emisí

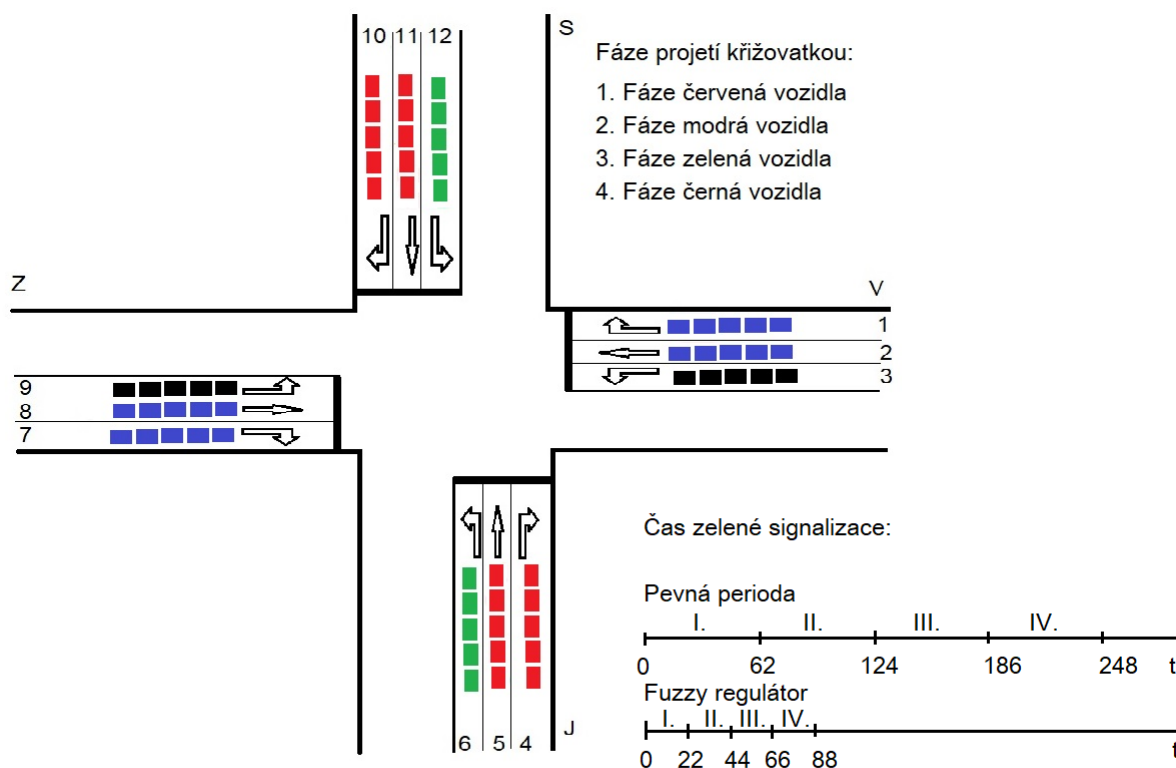
Řízení světelných křižovatek podle hustoty dopravních proudů poskytuje rychlý a plynulejší provoz, na obrázku 42 je zobrazena situace čtyřramenné křižovatky, na niž přijelo do každého jízdního pruhu 5 vozidel. Rozdíl řízení zelené signalizace mezi pevně daným intervalem a fuzzy regulátorem na následující, fuzzy regulátor přidá k 5 vozidlům celkovou dobu zelené 20 vteřin a dvě vteřiny žluté barvy pro změnu fáze. Světelná signalizace s pevnou periodou je 60 vteřin a dvě vteřiny žluté barvy pro změnu fáze. Čtyřramenná křižovatka má 12 jízdních pruhů a v každém je 5 vozidel, křižovatka má obsloužit tedy 60 vozidel během 4 fází světelných signalizací.

Od počátku času je zelená signalizace pro první fázi, při níž projede křižovatkou celkem 20 vozidel. Ostatní vozidla čekají v řadách za sebou. Pro křižovatku s pevnou periodou čekají ostatní vozidla 62 vteřin, než nastane zelená signalizace pro druhou fázi, tedy součin 40 vozidel a 62 vteřin je 2 480 součtem všech vteřin čekajících vozidel. Pro fuzzy regulátor činí doba 22 vteřin a tedy součin 40 vozidel a 22 vteřin je součtem čekacích dob, to je 880 vteřin.

Během druhé fáze projede křižovatkou dalších 20 vozidel a zůstává čekat zbylých 20 vozidel na červené signalizaci. Pro křižovatku s pevnou periodou signalizace čeká 20 vozidel po dobu 62 vteřin a součtem všech dob čekání pro každé vozidlo je součin 20 a 62 je 1 240 vteřin. Pro křižovatku s fuzzy regulátorem během druhé fáze čeká zbylých 20 vozidel 22 vteřin a součinem 20 a 22 vteřin dostaneme součet dob pro zbylá vozidla, to je 440 vteřin.

Během třetí fáze projede křižovatkou 10 vozidel a nyní čeká v řadách 10 vozidel, čekajících na čtvrtou fázi. Pro křižovatku s pevnou periodou signalizace čeká během třetí fáze 10 vozidel po dobu 62 vteřin a součinem 10 vozidel a 62 vteřin je 620 vteřin, jako celkový čas pro čekání vozidel. Pro křižovatku s fuzzy regulátorem je součet dob pro všechna zbylá

vozidla součinem doby čekání během třetí fáze 22 vteřin a zbylými 10 vozidly, kdy celková suma čekacích dob je 220 vteřin. Po uplynutí prvních tří fází opustí během čtvrté fáze všechna zbylá vozidla křižovatku.



Obrázek 42 – Čtyřramenná křižovatka s časovou periodou (Zdroj: Autor)

V tabulce 9 jsou zobrazeny délky dob zelené signalizace v rozdílnosti mezi pevnou periodou a fuzzy regulátorem během jednoho čtyřfázového cyklu.

Tabulka 9 – Doba čekání na červené signalizaci (Zdroj: Autor)

SSZ	Doba čekání na červené signalizaci během fází v jednom cyklu v [s]			
	1. Fáze	2. Fáze	3. Fáze	součet
Fixní perioda	2 480	1 240	620	4 340
Fuzzy regulátor	880	440	220	1 540

Vozidla čekají na červené signalizaci při pevné periodě celkem 4 340 vteřin, to je 72 minut a 20 vteřin. Porovnání s fuzzy regulátorem vozidla čekají na červené signalizaci celkem 1 540 vteřin, to je 25 minut a 40 vteřin.

Celý cyklus čtyřfázové křižovatky trvá s pevně stanovenou periodou 248 vteřin a s fuzzy regulátorem 88 vteřin. Pokud stejný model převedeme na den, 24 hodin, křižovatka s pevně stanovenou periodou SSZ provede 348 cyklů a pokud při stejné daných podmínkách budou

vozidla čekat na červené signalizaci, tak za jeden den prostojí vozidla 25 172 minut. Fuzzy regulátor při stejných cyklem má čekací dobu za 1 den 8 932 minut.

V tomto modelu se počítá s každou minutou, kdy vozidla čekají na červené signalizaci, každé vozidlo spaluje palivo a vypouští emise do ovzduší.

Podle EPA (U. S. Environmental Protection Agency) emisní faktor pro osobní vozidlo během stání s nastartovaným motorem, vyprodukuje za 1 minutu **6.19** gramů CO₂ (Lattini et al., 2005, s. 936).

V uvedeném modelu jsou v tabulce 10 uvedeny převody emisního faktoru CO₂ na doby čekání na červené signalizaci jak pro křižovátku s pevnou periodou SSZ a pro fuzzy regulátor.

Tabulka 10 – Emisní faktor CO₂ vozidel na červené signalizaci (Zdroj: Autor)

SSZ	Emisní faktor CO ₂ za dobu (t) při čekání na červené SSZ v [kg]		
	1 den	1 měsíc	1 rok
Fixní perioda	155,814	4 674,440	56 093,284
Fuzzy regulátor	55,289	1 658,672	19 904,068

V navrženém modelu projelo během jednoho dne 20 880 vozidel, během jednoho cyklu projelo 60 vozidel a cyklů je 348 za den. Na červené světelné signalizaci vozidla znečistila ovzduší při fixní periodě SSZ za jeden rok 56 tuny emisemi CO₂ a při fuzzy regulátoru vozidla během roku znečistila ovzduší necelými 20 tuny CO₂. Rozdíl je 2,8 násobný, téměř skoro trojnásobný ve prospěch fuzzy regulátoru v síti internetu věcí.

V rámci členských států EU se obchoduje s emisemi, které v ČR spravuje Ministerstvo životního prostředí (MŽP). Emisní obchodování je nástroj na snižování emisních skleníkových plynů. Česká republika draží své emisní povolenky na energetické burze v Lipsku (MŽP, 2018).

Podle Energetického regulačního úřadu – ERU, cena emisní povolenky pro rok 2017 činila 144,- Kč/t CO₂ (ERU, 2017).

V přepočtu na emisní povolenky křižovátka s podporou IoT s účinnějším řízením dopravních proudů zredukovala emise v hodnotě na 2 865 Kč za rok. Zatímco křižovátka s pevnou periodou SSZ při čekání vozidel na červené signalizaci má vyšší emise za 8 077,- Kč za jeden rok, rozdíl je 5 212 Kč. Přínos pro křižovátku řízenou v síti internetu věcí je téměř trojnásobný. K přepočtu na 100 křižovatek je přínos 521 200 Kč.

Tabulka 11 zobrazuje snížení emisí při řízení křižovatek podle hustoty provozu s fuzzy řadičem a s pevným intervalem.

Tabulka 11 – Přepoččet emisí na finanční hodnoty (Zdroj: Autor)

Křižovatka	Emise za 1 rok v tunách	Přepoččet dle emisních povolenek v [Kč]	Rozdíl v [Kč]	Přepoččet na 100 křižovatek v [Kč] za 1 rok
S pevným intervalem	56	8 077	5 212	521 200
S fuzzy řadičem	19,9	2 865		

Předmětem této části kapitoly je vyčíslení přínosů ve snížení objemu emisí při redukci čekacích doba na červené signalizaci.

7.1.2 Přínosy pro snížení onemocnění vlivem kratších čekacích dob

Se zvyšujícím se počtem vozidel se zvyšuje znečištění ovzduší výfukovými plyny. Znečištění ovzduší je často spojováno se zvýšenou chorobností a úmrtností kvůli kardiovaskulárním poruchám, rakovině plic, respiračními onemocněními jako je astma, bronchitida a respirační infekce. Ve vzduchu nejsou jen emise z vozidel, ale vzduchem poletují drobné fragmenty pneumatik, které obsahují vysoce alergické částičky latexu a mohou být zodpovědné za nárůst alergií (Proietti et al., 2003, s. 64).

Dieselové motory znečišťují emisemi a drobnými částičkami (sazemi) 10 krát více než konvenční benzínové motory na jednu míli a přibližně 100 krát více než vozidla s katalyzátorem (Proietti et al., 2003, s. 65).

Zpravidla rychlejší odbavení křižovatky, kdy vozidla projedou křižovatkou s kratší čekací lhůtou, se pozitivně projeví i na okolí. Negativní externalitou silniční dopravy jsou výfukové plyny, které vedou k vyšší chorobnosti obyvatelstva.

Podle Světové zdravotnické organizace (WHO) silniční doprava je zodpovědná až 30% za znečištění ovzduší ve městech v Evropě. V rozvojových zemích se doprava podílí na znečištění ovzduší až 70%, je to způsobeno starými dieselovými vozidly a nedostatkem veřejné dopravy. Na základě výzkumu z roku 2012 je zjištěno, že následkem znečištění ovzduší dopravou předčasně zemře ročně přibližně 3,7 milionů lidí (WHO, 2018).

V tomto ohledu řízení křižovatek podle hustoty dopravních proudů přináší méně emisí a snížení životní zátěže. V tomto směru se nedá hodnota ušetřeného zdraví se sníženými emisemi přímo vyčíslit.

K závislosti mezi emisemi a úmrtností jsou studie a jedna provedená studie z roku 2002, která zahrnuje data ze šesti měst, ukazuje, že zvýšením polévatvého prachu PM 2,5 (mikročástice ve vzduchu) o $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ vzroste úmrtnost o 3,4% (Krzyzanowski, 2005, s. 129).

V této části kapitoly je přínos spatřován ve snižování emisí a také v přímé závislosti se snížením úmrtnosti obyvatelstva a snížení chorob.

7.1.3 Přínosy pro snížení hluku, vibrací a zkrácení časů jízd

Silniční doprava v městské části způsobuje hluk. Jednotkou zvuku je decibel a 70 dB je hladina zvuku pro běžnou dopravu a pro těžkou dopravu je 90 dB. Závodní motorka a silný motor mají hladinu zvuku až 120 dB. Frekvence je počet vibrací za vteřinu. Podle mezinárodních standardů, hladina zvuku nad 85 dB a vyšší hladina zvuku poškozuje sluch, frekvence vyšší hladiny zvuku je v rozmezí 100 – 10 000 MHz. Lidské uši slyší v rozmezí 20 až 20 000 Hz. Frekvence vyjadřuje výšku zvuku. Pokud je počet period za vteřinu vyšší, zvuk je vyšší (soprán), při nízké frekvenci je zvuk hluboký. Hluk je definován jako vztah mezi zvukem a vibracemi. Hluk nejen, že ruší lidi, ale způsobuje i fyziologické a psychologické problémy (Ersoy a Karatepe, 2011, s. 109, 110).

Hluk z dopravy je druh zvuku, kterému jsou lidé vystaveni nejčastěji. Příčina hluku v dopravě je ve spojitosti s hlukem motoru, rychlostí vozidla, kvality povrchu silnice a hustoty dopravy. Při rychlosti 60 km/h a více, hluk jedoucího vozidla převyší hluk motoru (Ersoy a Karatepe, 2011, s. 112).

Vyšší hladina hluku na lidské zdraví přináší poškození sluchu, únavu, zvýšení krevního tlaku, zlost, vyčerpanost, zvýšení dechové a srdeční činnosti, snížení pracovní produktivity, sníženou koncentraci, poruchy spánku. Měřením hluku na křižovatkách bylo naměřeno v průměru 75,7 dB a výkyvy dosahují až 90 dB (Ersoy a Karatepe, 2011, s. 114,116).

Snížením čekacích dob na křižovatkách se sníží vibrace z vozidel a hluk vozidel v kolonách čekajících na červené signalizaci. V navrženém modelu doba jednoho cyklu SSZ na křižovatce s pevnou periodou je 248 vteřin a u křižovatky s fuzzy regulátorem je doba cyklu 88 vteřin, rozdíl je 160 vteřin. Řízení provozu podle hustoty provozu sníží dobu hluku až o 2/3.

Podle navrženého modelu, v němž se srovnává křižovatka s pevnou periodou a s fuzzy regulátorem je čekací doba na červené signalizaci během jednoho dne 25 172 minut pro pevnou periodu. Fuzzy regulátor při stejných cyklech má čekací dobu za 1 den 8 932 minut. Rozdílem těchto časů je 16 240 minut, to je 270 hodin a 40 minut.

Tabulka 12 zobrazuje rozdíl mezi křižovatkou řízenou s pevnou periodou SSZ a s fuzzy regulátorem v síti IoT v čekacích dobách na červené signalizaci. Rozdíl dob je vyjádřen v hodinách a k vyčíslení čekací doby je použita průměrná mzda na hodinu. Výsledkem je finanční ohodnocení doby strávené na křižovatce během jedné hodiny.

Tabulka 12 – Vyčíslení čekacích dob na křižovatce za 1 den (Zdroj: Autor)

Křižovatka	Doba čekání v křižovatce za 1 den v [min]	Rozdíl dob čekání za 1 den v [hod]	Průměrná mzda na hodinu v [Kč]	Vyčíslení čekacích dob během 1 dne v [Kč]
S pevnou periodou	25 172	270	188	50 760
S fuzzy regulátorem	8 932			

Podle Českého statistického úřadu (ČSÚ) je průměrná mzda 31 646 Kč za 4. čtvrtletí 2017 (ČSÚ, 2018).

Pokud má měsíc 168 pracovních hodin, průměrná mzda na hodinu je 188 Kč. V souvislosti na zkrácení čekacích dob na křižovatce, celkově posádky vozidel ušetří 270 hodin za den a vyjádřeno v penězích dle průměrné mzdy, hodnota činí 50 760 Kč za den a 1 522 800 Kč za měsíc a tedy 18 273 600 Kč za rok. Na sto křižovatkách je čas ohodnocen na 1 827 360 000 Kč za jeden rok.

Předmětem této části kapitoly je vyčíslení doby, během které vozidla prostojí na křižovatce v přepočtu na průměrnou mzdu. Též je zde uvedeno snížení zátěže hlukem, kdy vyšší hluk z dopravy po delší dobu zatěžuje zdraví stresem a způsobuje poruchy koncentrace, spánku a vyčerpanost.

7.1.4 Přínosy pro snížení dopravní nehodovosti na křižovatkách

Přínosy světelných křižovatek s podporou internetu věcí, kde řízení světelné signalizace probíhá podle vyhodnocení aktuální dopravní situace za účelem snížení čekacích dob na křižovatce, mohou být i ve snížení dopravní nehodovosti na křižovatkách.

Podle Centra dopravního výzkumu (CDV) ztráty plynoucí z dopravních nehod stojí dopravní nehody stát a společnost průměrně za rok (2016):

- jedna nehoda pouze s hmotnou škodou 364 500 Kč,
- jedna lehce zraněná osoba 668 500 Kč,
- jedna těžce zraněná osoba 5 094 200 Kč,
- jedna usmrcena osoba 19 411 000 Kč,

(CDV, 2018).

Tyto peníze vyjadřují náklady ze zdravotnictví a sociálních správ, úspory z dopravních nehod zůstávají v těchto rezortech (CDV, 2018).

Ukazatel hustoty ztrát z dopravních nehod je podíl celkových ztrát v penězích a počtu dopravních nehod. V roce 2016 byly škody z dopravních nehod celkem ve výši 69 358 069 000 Kč a počet nehod 98 864 nehod (CDV, 2018). Ukazatel hustoty ztrát z dopravních nehod je podíl celkové výše a počtu dopravních nehod, podílem je hodnota 701 550 Kč na jednu dopravní nehodu.

Podle Technické správy komunikací v Praze (TSK) počet nehod na světelných křižovatkách během sledovaného období jednoho roku bylo 3 559 na 458 světelných křižovatkách, v průměru připadá 8 nehod na křižovátku za jeden rok (TSK, 2014).

V přepočtu s hustotou ztrát z dopravních nehod je 8 nehod vyčísleno na 5 612 400 Kč. Vlivem rychlejšího odbavení křižovatek řízených podle hustoty by nehodovost mohla klesnout až o 40% a to o 2 440 000 Kč za jeden rok. Přepočet na sto křižovatek se jedná o snížení škod až o 244 000 000 Kč za jeden rok.

Předmětem této části kapitoly přínosem ve snížení dopravní nehodovosti a vyčíslení ztrát vlivem dopravních nehod, kdy jsou spočteny průměrné náklady na jednu dopravní nehodu a zhodnoceno pravděpodobnostní snížení dopravních nehod až o 40%.

Shrnutí přínosů z předešlých částí kapitoly přínosů zobrazuje tabulka 13, hodnoty jsou přepočteny na hodnoty pro sto křižovatek.

Tabulka 13 – Shrnutí přínosů pro sto křižovatek (Zdroj: Autor)

Přínosy	Redukce emisí CO ₂	Snížení onemocnění a úmrtí vlivem snížení emisí	Snížení hluku během čekání na červené až o 2/3 doby	Snížení čekacích dob na červené signalizaci	Snížení dopravní nehodovosti za 1 rok
Přínosy pro 100 křižovatek v [Kč]	521 200	nevyčíslitelné	nevyčíslitelné	1 827 360 000	244 000 000
Součet přínosů v [Kč]	2 071 881 200 + snížení úmrtí vlivem menších emisí ve vzduchu, + snížení hluku při čekání na červenou signalizaci vlivem kratších čekacích dob.				

Součtem zjištěných a ohodnocených přínosů za jeden rok na sto křižovatkách s řízením dle hustoty dopravních proudů je ohodnoceno na 2, 071 mld. Kč plus přínosy se snížením úmrtí a chorobnosti vlivem menších emisí ve vzduchu a také snížením hluku při průjezdu křižovatek vlivem kratších čekacích dob na červené signalizaci.

Výsledný přínos 2 mld. Kč ročně vychází z podkladů, které byly k dispozici a z úvah, které byly předloženy v diplomové práci. Reálný přínos se může trochu odchýlit, nicméně lze učinit relevantní závěr, že přínosy budou v řádech jednotek miliard Kč ročně pro 100 křižovatek.

7.2 Analýza nákladů řízení světelných křižovatek s IoT

V druhé části kapitoly jsou uvedeny náklady a negativní dopady na výstavbu křižovatek v síti internetu věcí.

7.2.1 Nákladovost projektu na vybavení a konfiguraci systému

Projekt na vybudování sítě křižovatek s podporou internetu věcí s sebou přináší vyšší materiální vybavenost, náklady na konfiguraci sítě pro sladění komunikace mezi zařízeními. Náklady na údržbu systému, jak energetickou, tak i softwarovou a hardwarovou. Náklady na robustnost sítě a bezporuchovost. Negativním dopadem jsou větší investiční náklady na vybudování sítě než u běžné křižovatky.

Náklady na hardware, software, integraci, údržbu, proces reengineeringu a analýzy dat jsou hlavními překážky v procesu zapojení internetu věcí (Uckelmann et al., 2011, s. 230).

K internetu věcí se váže nespočet nákladů týkajících se adaptování předmětů k funkčnosti sítě. Náklady na internet věcí jsou rozčleněny na sedm různých úrovní:

První úroveň nákladů zahrnují přenosná zařízení, která jsou propojena s fyzickými předměty. Přenosnými zařízeními jsou: RFID čtečky, silniční senzory, signální světla. Kalkulaci nákladů zobrazuje tabulka 14.

Náklady:

- Cena jedné kamery je 250 000 Kč.
- Cena SSZ včetně stožáru, návěstidla, software a signálního plánu, řadiče, kabeláže je 248 000 Kč za jeden kus (Striegler et al., 2013, s. 52).
- Cena jednoho silničního detektoru je v rozmezí 30 000 až 50 000 Kč (Správa veřejného statku, 2010).
- Cena RFID čtečky na vozidla je 10 000 Kč.

Tabulka 14 – Vyčíslení nákladů na zařízení v první úrovni (Zdroj: Autor)

Zařízení	Silniční senzory	RFID čtečky	Signální světelné zařízení - SSZ	Kamery	Zařízení na jednu křižovatku v [Kč]
Jednotková Cena v [Kč]	30.000	10.000	248.000	250.000	2 392 000
Počet v [ks]	12	4	4	4	
Celkem v [Kč]	360 000	40 000	992 000	1 000 000	

Náklady na jednu křižovatku v prvním stupni jsou 2 392 000 Kč. Náklady na 100 křižovatek jsou 239 200 000 Kč.

Druhá úroveň nákladů zahrnuje souhrn zařízení a softwaru jako jsou kabely, antény, snímače, kontrolky a jiná koncová zařízení, software a odpovídající instalační náklady.

Náklady na software, konfiguraci komunikace všech zařízení a fuzzy aproximace jsou vyčísleny podle času na vývoj softwaru a doby konfigurování systému s koncovými zařízeními. Raspberry Pi používá operační systém Linux a konfigurace se zařízeními je v jazyce Python. Vývoj software na řízení křižovatek a fuzzy aproximace v řadiči při době vývoje 6 měsíců má hodnotu 2 520 000 Kč. Hodnota je určena z doby vývoje a dva

programátoři se mzdou 1 250 Kč na hodinu při 168 hodinách za měsíc mají náklady na mzdy 420 000 Kč za měsíc. Za 6 měsíců vývoj kompletního software s konfiguracemi vyjde na 2 520 000 Kč. Vývoj softwaru probíhá metodou vodopád, postup je lineární a jednoduše pochopitelnými a vysvětlitelnými fázemi.

Hodnota jednoho kusu počítače Raspberry Pi je do 1 000 Kč a hodnota jednoho řadiče je do 1 000 Kč. Kabely UTP na přenos dat o délce 1 km má hodnotu do 6 000 Kč. Různé spojky a sběrnice k připojení mají hodnotu 10 000 Kč.

Tabulka 15 – Vyčíslení nákladů na zařízení ve druhé úrovni (Zdroj: Autor)

Zařízení	Software a fuzzy aproximace	Raspberry Pi, řadič	Kabely UTP 1 km	Spojky, sběrnice	Celková hodnota zařízení
Cena v [Kč]	2 520 000	2 000	6 000	10 000	2 538 000

V této úrovni jsou vyčísleny náklady na software v monitorovacím středisku včetně nákladů na fuzzy aproximaci v řadičích za 2 520 000 Kč a na jednu křižovátku ostatní příslušenství mají náklady na pořízení 18 000 Kč. Délka kabelů hraje roli ohledně vzdáleností křižovatek od monitorovacího centra, na sto křižovatek při průměrné délce 5 km od monitorovacího střediska je potřeba 500 km kabelu UTP a náklady budou při hodnotě 6 000 Kč za 1 km kabelu za 3 000 000 Kč. Dále 100 křižovatek vyžaduje 100 počítačů Raspberry Pi a řadičů, hodnota je 200 000 Kč a hodnota různých spojek, sběrnice a drobného materiálu je na 100 křižovatek 1 000 000 Kč. Na 100 křižovatek jsou náklady 4 200 000 Kč.

Na druhé úrovni je hodnota zařízení na 100 křižovatek 6 720 000 Kč včetně vývoje software a fuzzy aproximace.

Třetí úroveň nákladů zahrnuje všechny celkové náklady k systému, middleware jako je automatické zálohování dat a zachycení a přeposlání paketů, aktualizace k existujícímu systému.

Cloudové služby s možností vytvoření vlastní infrastruktury, úpravy konfigurace v reálném čase, neomezená alokace diskového prostoru má hodnotu 9 000 Kč na měsíc, na rok je za 108 000 Kč.

Archivace dat v Big Data Hadoop si vyžádá 1 000 EUR za 1 TB. Směnný kurz 1 EUR na české koruny ze dne 1.5.2018 je 25,30 Kč za 1 EUR (Kurzy, 2018). Hodnota uložení 1 TB dat je za 25 300 Kč.

Tabulka 16 - Vyčíslení nákladů na zařízení ve třetí úrovni (Zdroj: Autor)

Zařízení	Cloudové služby	Big Data	Celkem
Cena v [Kč]	108 000	25 300	133 300

Náklady v třetí úrovni jsou minimálně 133 300 Kč, kde jsou započítány služby za přenos dat po síti internetu a uložení 1TB dat v Big Data. Podle velikosti uložených dat v TB se náklady zvyšují. V tomto případě nezáleží na velikosti sítě, kolik je připojeno křižovatek.

Čtvrtá úroveň nákladů obsahuje náklady na vzdělání projektového týmu a koncových uživatelů, tak i náklady na reorganizaci. Nezbytné trénování a vzdělávání pro koncové uživatele je docela důležité, protože internet věcí vyžaduje fundamentální znalosti o různých technologiích, jako je Auto ID a o senzorech a také znalosti o zpracovávání a analýze dat v reálném čase. Trénování a vzdělávání pomáhá k poskytnutí přiměřené zručnosti. Náklady na reorganizaci procesů z klasického managementu, náklady na reengineering nebo na nové postupy.

Podle ročenky 2015 Technické správy komunikací hlavního města Prahy byly výdaje 556,5 mil. Kč na hlavní dopravní ústřednu a zavádění systémů řízení a regulace silničního provozu v Praze (TSK, 2016, str. 73).

Personál dopravní ústředny tvoří 40 lidí a roční mzdy jsou celkem 20 mil. Kč.

Cena školení personálu v informačních technologiích je 5 000 Kč na den, školení 2 ročně pro 40 zaměstnanců je 400 000 Kč. Náklady na školení pokrývají znalosti údržby a opravy sítě.

Tabulka 17- Vyčíslení nákladů na zařízení ve čtvrté úrovni (Zdroj: Autor)

Zařízení	Monitorovací středisko	Personál	Školení	Celkem
Cena v [Kč]	556 500 000	20 000 000	400 000	576 900 000

Náklady na monitorovací středisko s vybavením jsou pokryty při výstavbě. Personál obsluhy se nemění na velikosti obsluhy křižovatek a hodnota školení je stejná bez vlivu na rozsah sítě křižovatek.

Pátá úroveň nákladů obsahuje náklady na interní aplikace k plnému využití rozsahu internetu věcí. Náklady obsahují jak standardní software, tak i individuální software a všechny náklady na instalaci, přizpůsobení a výcvik.

V této úrovni se vyskytují náklady na různé interní aplikace k plnému využití internetu věcí. Síť internetu věcí dovoluje rozšíření o různé dodatečné aplikace ke zlepšení současného stavu. Aby se síť dále vyvíjela a byla pružnější a vývojově nezastarávala, je vhodné síť dále vyvíjet novými možnostmi, například interními aplikacemi. V hodnotě nákladů na interní aplikace jsou náklady na vývoj, testování, nasazení, údržbu a update. Doba vývoje aplikace se odvíjí podle požadované náročnosti, náročnější aplikace vyžadují dobu vývoje okolo 800 hodin i více, výsledná cena se může pohybovat v rozmezí až ke stům tisícům korun. V rámci rozpočtu je v této práci vymezen náklad v rozsahu 50 000 Kč za rok včetně instalace a konfigurace interní aplikace, jedná se o doplňkovou službu k rozšíření rozsahu internetové sítě.

Tabulka 18 - Vyčíslení nákladů na zařízení v páté úrovni (Zdroj: Autor)

Zařízení	Náklady na interní aplikace a konfiguraci
Cena v [Kč]	50 000

Tyto náklady jsou dodatečné a rozšiřující aplikovatelnost internetové sítě.

Šestá úroveň nákladů obsahuje fakt, že internet věcí potřebuje komunikaci a spolupráci přes širší začlenění subjektů jako jsou podniky, nekomerční účastníky, vládní instituce a koncoví uživatelé.

V této úrovni mohou být různé aplikace ohledně informací o zatížení různých komunikací poskytované přes internetové stránky nebo aplikace. Roční provoz webu běžně na trhu stojí 60 000 Kč, webhosting za 2 000 Kč, doména 200 Kč, vydání článků a zaplacení redaktora až 50 000 Kč, poskytnutí online záběrů kamer, roční hodnota provozu webu je za 150 000 Kč.

Tabulka 19 - Vyčíslení nákladů na zařízení v šesté úrovni (Zdroj: Autor)

Zařízení	Komunikace s okolím, webové stránky za jeden rok
Cena v [Kč]	150 000

Náklady na komunikaci s okolím se nemění s velikostí sítě propojených křižovatek.

Sedmá úroveň nákladů obsahuje provozní náklady na údržbu, provoz, zlepšení a rozšíření systému.

Náklady na údržbu jsou podle poruchovosti zařízení, pokud je pravděpodobnost 99% bezporuchovosti za 1 rok a systém se skládá ze 100 prvků, potom pravděpodobnost, že se zařízení během jednoho roku neporouchá, je vypočteno: $0,99^{100}$ výsledkem je 0,366.

Životnost výpočetní techniky je v rozmezí 3 až 5 let, během 5 let se vymění 100% součástí a na jeden rok provozu zařízení vychází v průměru 20% nákladů na obměnu zařízení. Pokud náklady na zařízení sta křižovatek jsou 239 200 000 Kč v prvním stupni a 4 200 000 Kč v druhém stupni, součet je 243 400 000 Kč, z toho je 20% 48 680 000 Kč. Pokud se má během 8 let vyměnit 100% součástí, tedy v průměru 12,5% průměrné náklady jsou 30 450 000 Kč. Nákup kvalitních součástí prodlouží dobu funkčnosti.

Náklady na provoz světelného signalizačního zařízení jedné křižovatky jsou 100 000 Kč včetně pravidelných revizí SSZ, nákup a výměna žárovek, personál s pracovní plošinou, spotřeba elektrické energie (Smítal, 2013). Náklady na provoz na sto křižovatek jsou 10 000 000 Kč.

Tabulka 20 - Vyčíslení nákladů na zařízení v sedmé úrovni (Zdroj: Autor)

Zařízení	Náklady na údržbu a obměnu na sto křižovatek	Náklady na provoz sta křižovatek	Součet nákladů na provoz a obměnu sta křižovatek
Cena v [Kč]	30 450 000	10 000 000	40 450 000

Náklady na celkovou obměnu činí 40 450 000 Kč na 100 křižovatek, v nákladech je zahrnuta celková obměna výpočetního zařízení po 8 letech. Náklady na údržbu se mohou během roků různě lišit.

7.2.2 Rozdělení nákladů

Hodnoty nákladů jsou v této části kapitoly rozděleny na fixní a variabilní. Fixní náklady jsou nezávislé na produkci, jedná se o náklady na budovy, nájemné, energie jako je elektřina. Variabilní náklady jsou závislé na produkci, týkají se materiálu, mění se s velikostí produkce. Celkové náklady jsou součtem fixních a variabilních nákladů.

Celkové náklady zobrazuje tabulka 21, jedná se o náklady na zřízení 100 křižovatek s fuzzy regulátorem a podporou sítě internetu věcí. Náklady jsou z předešlých sedmi úrovní nákladů.

Celkové náklady sedmi úrovní jsou 863 603 300 Kč, nejnákladnější položkou je zřízení monitorovacího střediska.

Průměrné náklady jsou podílem celkových nákladů a počtem výrobních jednotek, tedy křižovatek a monitorovacího střediska, v systému je zapojeno 100 křižovatek a jedno

středisko, celkem 101 jednotek. Průměrný náklad je 8 550 528 Kč na jednu křižovatku včetně podílu na monitorovacím středisku.

Tabulka 21 – Celkové náklady sedmi úrovní (Zdroj: Autor)

Náklady v jednotlivých úrovních	Náklady na 100 křižovatek v [Kč]
První úroveň	239 200 000
Druhá úroveň	6 720 000
Třetí úroveň	133 300
Čtvrtá úroveň	576 900 000
Pátá úroveň	50 000
Šestá úroveň	150 000
Sedmá úroveň	40 450 000
Celkem za sedm úrovní	863 603 300

Variabilní náklady jsou zobrazeny v tabulce 22. Variabilní náklady jsou závislé na počtu zapojených křižovatek, jedná se zejména o náklady na pořízení materiálu, senzorů, kabelů, kamer, radičů, počítačů a jejich údržba a provoz. Variabilní náklady jsou v hodnotě 283 370 000 Kč za rok.

Průměrné variabilní náklady jsou podílem variabilních nákladů a počtem vyrobených produktů, tedy počtem křižovatek. V systému je zapojeno 100 křižovatek a průměrné variabilní náklady jsou 2 837 300 Kč na jednu křižovatku.

Tabulka 22 – Variabilní náklady na sto křižovatek v navrženém modelu (Zdroj: Autor)

Variabilní náklady v jednotlivých úrovních	Náklady na 100 křižovatek v [Kč]
První úroveň	239 200 000
Druhá úroveň	6 720 000
Sedmá úroveň	40 450 000
Celkem za úrovně s variabilními náklady	286 370 000

Fixní náklady jsou relativně nezávislé na počtu zapojených křižovatek v systému. Fixní náklady jsou zobrazeny v tabulce 23. Jedná se internetové cloudové služby a úložiště na Big Data, zřízení centrálního monitorovacího střediska a služby s tím související jako je školení zaměstnanců, kdy není brán zřetel na počet zapojených křižovatek. Fixní náklady jsou 577 233 300 Kč. Nejvyšším nákladem je zřízení monitorovacího střediska.

Tabulka 23 – Fixní náklady na sto křižovatek v navrženém modelu (Zdroj: Autor)

Fixní náklady v jednotlivých úrovních	Náklady na 100 křižovatek v [Kč]
Třetí úroveň	133 300
Čtvrtá úroveň	576 900 000
Pátá úroveň	50 000
Šestá úroveň	150 000
Celkem za úrovně s fixními náklady	577 233 300

Celkové náklady jsou tvořeny investičními a provozními náklady. Investiční náklady zahrnují prostředky na realizaci opatření a provozní náklady zahrnují náklady spojené s provozem a údržbou daného opatření včetně oprav (Striegler et al., 2013).

Celkové náklady za navrhované období jsou vyjádřeny:

$$\mathbf{N}_z = \mathbf{t}_z \sum_{i=1}^k \frac{N_{vi}}{t_{zi}} \quad (51)$$

kde N_z celkové náklady za navrhované období v [Kč], t_z navrhované období [roky], N_{vi} náklady jednotlivých opatření, investiční a provozní náklady v [Kč], t_{zi} životnost jednotlivých opatření (Striegler et al., 2013).

V další části kapitoly je zobrazen průběh nákladů v čase.

7.2.3 Průběh nákladů v čase 10 let

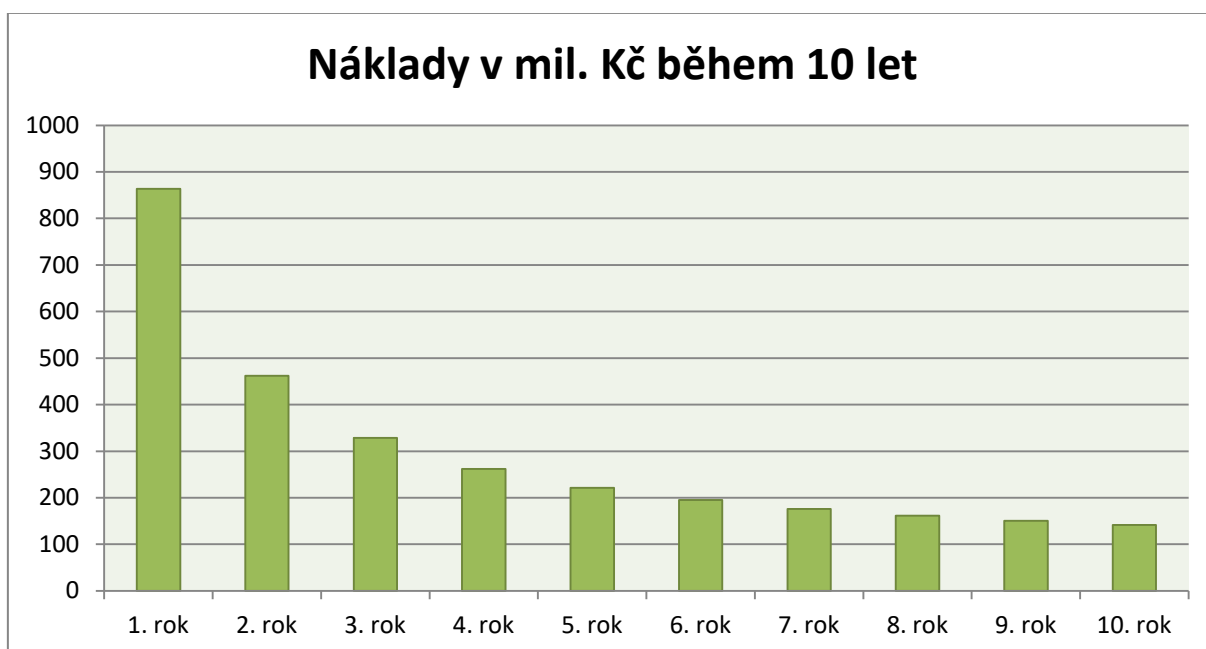
Nejvyšší náklady jsou na začátku, kdy nejnákladnějším prvkem je zařízení monitorovacího střediska. Prvním rokem investice jsou náklady nejvyšší, dalším rokem jsou náklady na mzdy personálu a školení, na cloudové služby a Big Data, náklady na interní aplikace, náklady na komunikaci s okolím, náklady na údržbu, opravy. Roční průběžné náklady činí 61 183 300 Kč. Vývoj nákladů je zobrazen na tabulce 24. Rozložení nákladu v čase je následovně, výdaje za předešlý rok plus průběžné náklady za rok děleno počtem let.

Na obrázku 43 je zobrazen graf průběhu nákladů na 10 let, v němž jsou náklady ustáleny na nákladech na provoz, pokud se systém zapojení křižovatek rozšiřuje, náklady se zvyšují.

Průměrný náklad na jeden rok během 10 let je 92 478 660 Kč.

Tabulka 24 – Vývoj nákladů na 10 let v navrženém systému (Zdroj: Autor)

Roky	Náklady
1. rok	863 603 300
2. rok	462 393 300
3. rok	328 656 633
4. rok	261 788 300
5. rok	221 667 300
6. rok	194 919 966
7. rok	175 814 728
8. rok	161 485 800
9. rok	150 341 077
10. rok	141 425 300



Obrázek 43 – Průběh nákladů v čase na 10 let (Zdroj: Autor)

V následující části kapitoly je uvedena analýza nákladů a přínosů.

7.3 Analýza nákladů a přínosů

V této části kapitoly je analýza mezi zjištěnými přínosy a náklady z předešlé části kapitoly.

Analýza nákladů a přínosů je používána jako hlavní nástroj pro ekonomické analýzy.

Analýza nákladů a přínosů je poměrování nákladů a prospěchu, je typem poměrového přístupu v rozhodovacích procesech. Nejedná se o náklady účetního typu, ale o jakési újmy, nebo lépe řečeno negativní dopady projektu. Metoda pracuje s pojmy, kterými jsou:

- efekty plynoucí z investice, veškeré dopady na zkoumané subjekty, které realizace investiční akce přináší. Z hlediska určitého subjektu mohou mít povahu pozitivní (benefits), tak negativní (cost), nebo neutrální (nikterak neovlivní),
- cost (újmy), veškeré negativní dopady na zkoumaný subjekt či skupinu, jedná se o záporné efekty plynoucí z investice,
- benefits (přínosy), veškeré pozitivní dopady na zkoumaný subjekt či skupinu, jedná se o kladné efekty plynoucí z investice,

(Marešová, 2012, s. 45,46).

Předpokladem pro analýzu nákladů a přínosů je vyjádření veškerých negativních a pozitivních dopadů v měřitelných v peněžních jednotkách. Pokud nejsou všechny dopady oceněny a nemohou být oceněny, používají se pro analýzu takzvané stínové ceny. Tento přístup dává možnost porovnat rozdílné varianty k dosažení jednoho cíle, ale dokonce kvalitativně odlišné varianty porovnat mezi sebou a také porovnat varianty s takzvanou nulovou variantou, tedy neuskutečněním žádného projektu (Marešová, 2012, s. 46).

Ohledně internetu věcí je několik problematických aspektů v analýze nákladů a přínosů:

- detailní analýza nákladů a přínosů může být časově náročná,
- je obtížné identifikovat, měřit a analyzovat všechny náklady a přínosy ve spojitosti s internetem věcí,
- společnosti jsou neochotné sdílet přínosy,

(Uckelmann et al., 2011, s. 230).

Alternativním řešením k analýze nákladů a přínosů by mohl být prodej a nákup informace, která je poskytnuta internetem věcí. Pro toto řešení je potřeba ocenit a zaúčtovat informaci. Podobný koncept je známý z telekomunikačního průmyslu, kde účtování nákladů je součástí celé infrastruktury, jako je hlasový hovor, SMS, přístup k internetu a prémiové služby přes poskytovatele služeb (Uckelmann et al., 2011, s. 230).

7.3.2 Analýza nákladů a přínosů vzájemně propojených křižovatek v síti IoT

V navrženém modelu jednoho sta vzájemně propojených křižovatek v síti internetu věcí jsou zjištěny přínosy a náklady.

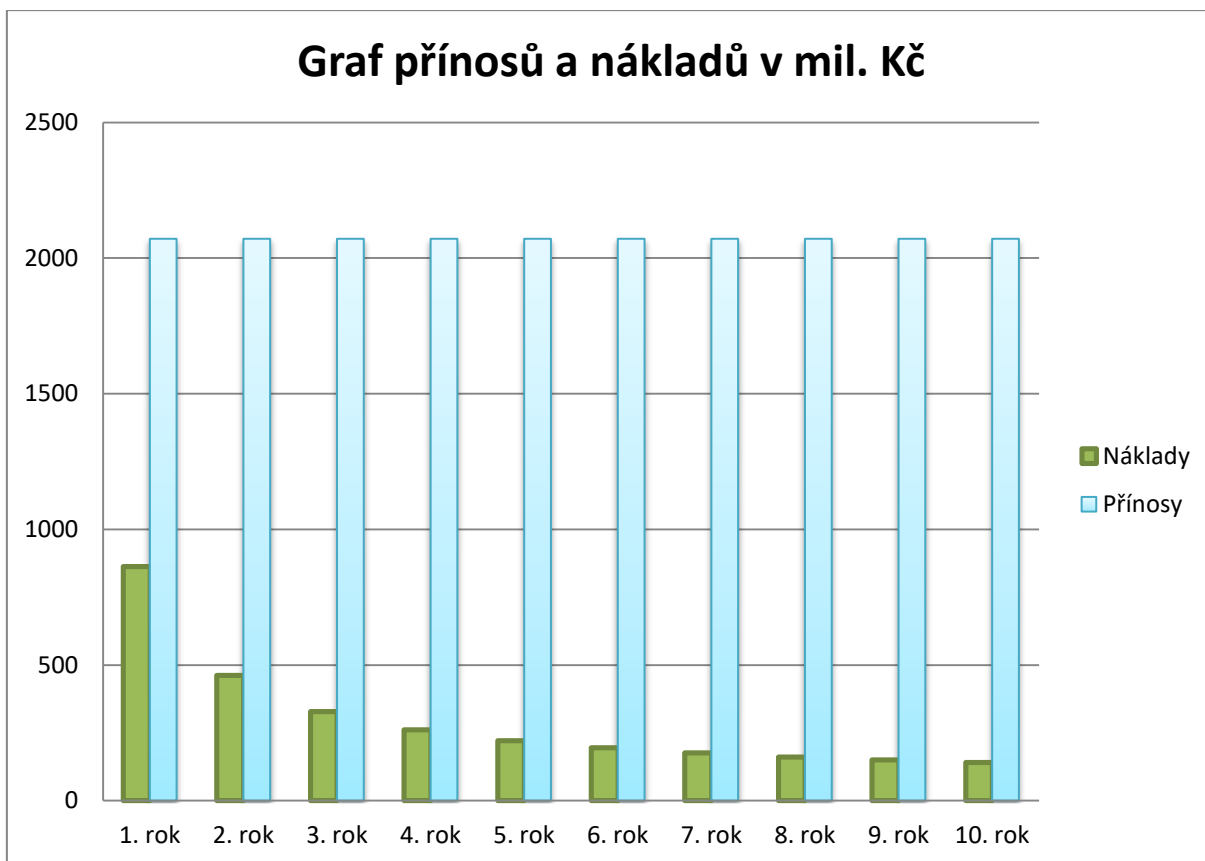
Přínosy vyplývající zefektivněním dopravy na křižovatkách jsou uvedeny ve stínových cenách, neboť se nadají běžně vyčíslit. Přínosy jsou ve snížení emisí z motorových vozidel v hodnotě a to 521 000 Kč za rok, snížení čekacích dob na červené signalizaci v přepočtu na průměrnou mzdu činí 1 827 360 000 Kč a snížením dopravní nehodovosti během jednoho roku činí 244.000.000 Kč. Dalšími přínosy je snížení úmrtí redukcí emisí ve vzduchu a snížení hluku při čekání na červených signalizacích. Celkově přínosy během roku jsou vyčísleny na 2 071 881 200 Kč.

Náklady na jeden rok provozu jsou 863 603 300 Kč, dále se náklady po zavedení snižují na provoz a údržbu a to v průměru na 92 478 660 Kč za jeden rok během 10 let.

Podílem přínosů a nákladů je téměř 2,4 násobek pro přínosy. Přínosy pro společnost zavedením křižovatek, které řídí dopravu na základě hustoty dopravních proudů, jsou více jak dvounásobné již během prvního roku provozu.

Pokud jsou po zavedení provozu náklady již v průměru 92 478 660 Kč za jeden rok a přínosy jsou stejně stejné, podíl přínosů a průměrných nákladů je 22,4. Přínosy zavedením se křižovatek s efektivním řízením podle dopravních proudů přinesou až 22 násobný užitek pro společnost v rámci snížení emisí a čekacích dob než vynaložené náklady do provozu těchto křižovatek.

Přínosy a náklady jsou zobrazeny na následujícím obrázku 44, zde jsou náklady rozložena na dobu investice 10 let a každoroční přínosy pro společnost a životní prostředí jsou během období stejné.



Obrázek 44 – Graf přínosů a nákladů během 10 let (Zdroj: Autor)

Negativní dopady řízení křižovatek s podporou sítě internetu věcí jsou nepatrné. Tyto křižovatky v městských zástavbách již jsou postaveny a technické příslušenství výpočetní techniky internetu věcí jen zvyšuje efektivitu řízení křižovatek s ohledem na snížení emisí ve městech a zkrácení čekacích dob na červených signalizacích.

7.4 Hodnocení ekonomické efektivity modelu na řízení křižovatek

V této části kapitoly je uvedeno hodnocení ekonomické efektivity navrženého modelu podle čisté současné hodnoty, vnitřního výnosového procenta a indexu rentability.

V navrženém modelu za jeden den projede 20 880 vozidel křižovatkou, v přiměřeném počtu projede sto křižovatkami 2 088 000 vozidel za den, za rok projede 762 120 000 vozidel.

Při hodnocení ekonomické efektivity se používá nejčastěji čistá současná hodnota, index rentability, vnitřní výnosové procento, doba návratnosti.

Pokud vozidla, která projedou křižovatkou, mají hodnotu příjmu jednu jednotku (stínová cena) a náklady na výstavbu křižovatek jsou převedeny na stejné jednotky jako výdaje, lze sestavit tabulku příjmu a výdajů a jejich toků neboli cash flow.

Tabulka 25 zobrazuje příjmy a výdaje na provoz sta křižovatek. Celkové náklady prvním rokem jsou 863 603 300 a křižovatkami projelo 762 120 000 vozidel, rozdíl 101 483 300 jednotek, náklady jako výdaje jsou záporné a vozidla na straně příjmů jsou kladné. Druhým rokem jsou náklady v hodnotě 61 183 300 jednotek.

Tabulka 25 – Příjmy a výdaje v navrženém modelu (Zdroj: Autor)

Rok	Příjmy	Výdaje	Cash flow
1	762 120 000	863 603 300	-101 483 300
2	762 120 000	61 183 300	700 936 700
3	762 120 000	61 183 300	700 936 700
4	762 120 000	61 183 300	700 936 700
5	762 120 000	61 183 300	700 936 700
6	762 120 000	61 183 300	700 936 700
7	762 120 000	61 183 300	700 936 700
8	762 120 000	61 183 300	700 936 700
9	762 120 000	61 183 300	700 936 700
10	762 120 000	61 183 300	700 936 700

Čistá současná hodnota je značena NPV (Net Present Value) a je vyjádřena vzorcem:

$$NPV = \sum_{n=1}^N P_n * \frac{1}{(1+i)^n} - K = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad (52)$$

kde i je úrok, N je doba životnosti, K je kapitálový výdaj, n jsou jednotlivá léta životnosti investice, P_n je peněžní příjem v jednotlivých letech životnosti investice, r je nominální diskontní sazba, t je čas, CF je hotovostní tok (Marešová, 2012, s. 98).

Vnitřní výnosové procento (Internal Rate of Return - IRR) představuje výnosnost projektu během doby jeho životnosti, je nezávislé na objemu investice, a proto je vhodné na porovnání investic s různým objemem (Marešová, 2012, s. 100, 105).

Vnitřní výnosové procento vychází ze vzorce:

$$IRR = i_n + \frac{\check{C}SN_n}{\check{C}SN_n + \check{C}SN_v} * (i_v - i_n) \quad (53)$$

Kde IRR je vnitřní výnosové procento, i_n je nižší zvolená úroková míra, $\check{C}SN_n$ je čistá současná hodnota při nižší úrokové míře, $\check{C}SN_v$ je čistá současná hodnota při vyšší úrokové míře, i_v je vyšší úroková míra (Marešová, 2012, s. 101).

Tabulka 26 zobrazuje diskontovaný cash flow při 6 % úrokové míře a 7% úrokové míře.

Tabulka 26 – Diskontované cash flow v navrženém modelu (Zdroj: Autor)

Rok	Cash flow	Úročitel 6%	Diskontované cash flow	kumulace	Úročitel 7%	Diskontované cash flow
1	-101 483 300	0,9433	-95 729 196	-95 729 196	0,9345	-89 458 934
2	700 936 700	0,8899	623 763 569	528 034 373	0,8734	461 185 221
3	700 936 700	0,8396	588 506 453	1 116 540 826	0,8162	911 320 622
4	700 936 700	0,7920	555 141 866	1 671 682 692	0,7628	1 275 159 557
5	700 936 700	0,7472	523 739 902	2 195 422 594	0,7129	1 565 116 767
6	700 936 700	0,7049	494 090 279	2 689 512 873	0,6663	1 792 022 427
7	700 936 700	0,6650	466 122 905	3 155 635 778	0,6227	1 965 014 399
8	700 936 700	0,6274	439 767 685	3 595 403 463	0,5820	2 092 524 815
9	700 936 700	0,5918	414 814 339	4 010 217 802	0,5439	2 181 157 462
10	700 936 700	0,5583	391 332 959	4 401 550 761	0,5083	2 237 308 252
Čistá současná hodnota			4 401 550 761	14 391 350 588		

Čistá současná hodnota je při 6% úrokové míře kladná, projekt je přijatelný.

Vnitřní výnosové procento je podle vzorce (53):

$$IRR = 6 + \frac{4\,401\,550\,761}{4\,401\,550\,761 + 14\,391\,350\,588} * 1 = 6,23$$

Hodnota IRR je vyšší než úroková míra 6%, investici lze hodnotit pozitivně.

Index rentability je spjatý s čistou současnou hodnotou, je relativní povahy. Poměříje diskontované peněžní příjmy k počátečním kapitálovým výdajům. Kladná hodnota ukazatele vyjadřuje přijatelnost projektu (Marešová, 2012, s. 103).

Index rentability je určen vzorcem:

$$I_z = \frac{\check{C}SN}{K} \quad (54)$$

Kde I_z je index rentability, $\check{C}SN$ je čistá současná hodnota, K je pořizovací kapitál (Marešová, 2012, s. 103).

Podle vzorce (54) je index rentability vyjádřen:

$$I_z = \frac{4\,401\,550\,761}{863\,603\,300} = 5,09$$

Jak je uvedeno výše, když je hodnota ukazatele kladná, projekt je přijatelný.

Provedeným hodnocením ekonomické efektivity přes čistou současnou hodnotu, vnitřní výnosové procento a index rentability je model na řízení křižovatek s podporou IoT přijatelný ve všech naměřených ukazatelích.

7.5 Závěr kapitoly ekonomické analýzy řízení světelných křižovatek s podporou sítě internetu věcí

Tato závěrečná kapitola přináší ekonomickou analýzu světelných křižovatek vzájemně propojených v komunikační síti internetu věcí.

Na úvodu kapitoly je model křižovatky, který srovnává běžnou světelnou křižovatku s pevným nastavením SSZ a křižovatku s fuzzy regulátorem. Přínosy pro křižovatku s fuzzy regulátorem v síti internetu věcí jsou ve snížení čekacích dob na červené signalizaci, tím snížení environmentální zátěže výfukovými plyny, snížením doby hluku motorových vozidel. S redukcí emisí ve vzduchu se váže snížení úmrtnosti a chorob. Dále snížením čekacích dob na křižovatkách vede ke snížení dob jízd vozidly a snížení dopravních nehod. Tyto nežádoucí jevy jsou vyčísleny podle stínových cen a jejich redukce jako snížení negativní externality, je hodnocena jako přínos zavedení efektivnějšího řízení dopravního provozu na křižovatkách.

Jednou stranou jsou přínosy, druhou stranou jsou náklady. Náklady na zavedení nových technologií jsou vyšší než stávající, zejména nejnákladnější je zřízení zázemí, monitorovacího střediska, náklady na jednu křižovatku jsou vyšší než na běžnou křižovatku, výsledkem je vyšší efektivita křižovatek při řízení dopravních proudů. Přínosy a náklady jsou zhodnoceny v analýze nákladů a přínosů.

Závěrem je uvedeno hodnocení ekonomické efektivity podle čisté současné, vnitřního výnosového procenta a indexu rentability, kdy ukazatele vyjadřují přijatelnost projektu.

8 Závěr

Diplomová práce se zabývala soustavou křižovatek v síti internetu věcí, kdy páteří komunikační sítě je internet. Zdejší architektura sítě internetu věcí nese sebou křižovatky, které mají silniční senzory na detekci motorových vozidel a křižovatky si mezi sebou zasílají informace o počtu vozidel projíždějících křižovatkou, aby křižovatky na sebe reagovaly v reálném čase, že se k nim blíží kolona vozidel z předešlé křižovatky. Křižovatka vyhodnocuje současný stav svých dopravních proudů v dosahu senzorů ve svém okolí, též na základě získané informace ze sousední křižovatky zná počet vozidel, která v blízké budoucnosti ke křižovatce přijedou. Křižovatka na základě současného stavu a dostupných informací ze sousedních křižovatek je schopna určit zatížení dopravních proudů v krátké budoucnosti a synchronizovat světelnou signalizaci „volno“ s intenzivním dopravním proudem. Řízení křižovatek podle hustot dopravních proudů přináší účinnější řízení provozu na pozemních komunikacích, zkrácení jízdních časů přes křižovatku, též zkrácení čekacích dob na červených signalizacích. V závislosti na snížení čekacích dob a účinného projetí křižovatkou souvisí redukce emisí výfukových plynů z motorových vozidel, snížení doby hluku z vozidel během čekání na červenou a ve výsledku snížení emisí ve vzduchu vede ke snížení zátěže na zdraví, snížení chorobnosti a úmrtnosti, neposlední řadě také k redukcí skleníkového efektu a smogu.

V kapitole po úvodu se práce zabývala stochastickými procesy od bodového procesu k Poissonově procesu, který uvádí pravděpodobnost výskytu jevu, například počet vozidel projíždějících křižovatkou. Nadále byly uvedeny Markovovy řetězce a rozhodovací procesy v diskrétním náhodném procesu, kdy budoucí jev nastane na základě současného stavu bez znalosti minulosti. Pro řazení vozidel v křižovatce byla použita teorie hromadné obsluhy, kdy vozidla projíždějící křižovatkou mohou tvořit bodový proces s nezávislými přírůstky. Vozidla s absolutní prioritou jsou obsloužena okamžitě, v případě křižovatek jsou na pozemní komunikaci senzory na technologii RFID, kdy vozidla integrovaného záchranného systému mají aktivní štítky RFID při zapnutém majáku, které přečte čtečka před křižovatkou a křižovatka umožní takovému vozidlu prioritu průjezdu vozidla. První kapitola obsahuje telematiku a dopravní systémy, kde jsou uvedeny detektory silničních vozidel vhodné pro konfiguraci v síti internetu věcí.

Fuzzy logika je součástí první kapitoly a je určena pro neurčitě, nejasné procesy. V části kapitoly o fuzzy logice je uvedena jazyková aproximace, báze pravidel, fuzzifikace a defuzzifikace. Dále jsou uvedeny příklady fuzzy logiky v dopravním inženýrství při řízení křižovatek, kdy křižovatky jsou řízeny na základě hustoty dopravního proudu a časování zelené světelné signalizace provádí fuzzy řadič. Řízení křižovatky je provedeno na základě

počtu vozidel v jízdním pruhu, fuzzy řadič na počtu vozidel aktivoval množinu pravidel a vyhodnotil, jak dlouho má svítit signalizace „volno“.

V kapitole po stochastických procesech se práce zabývala telekomunikační sítí internetu věcí, ve které byl uveden pojem a úvod do internetu věcí. Pojem internetu věcí není definován a v této práci byla uvedena definice internetu věcí odvozena od logistiky. V kapitole je uvedena autonomní kooperace logistických procesů. Internet věcí je založen na jedinečnosti identifikace, schopnosti vnímat a uchovat informaci o stavu předmětu, schopnosti realizace informace jiným externím subjektům, schopnosti komunikace s jinými objekty a schopnosti rozhodnutí o sobě v interakci s ostatními objekty. Následně bylo uvedeno ukládání dat a možnosti připojení architektury.

Dále v kapitole o internetu věcí byly uvedeny modely propojení křižovatek v síti internetu věcí, ukládání dat do Big Data s technologií zpracovávání distribuovaných dat Hadoop, představení malého počítače Raspberry Pi na řízení provozu křižovatek. Součástí je i dynamické řízení světelných křižovatek podle Kernerových tří fází teorie dopravy. V závěru kapitoly byly uvedeny modely na řízení křižovatky s podporou internetu věcí na snížení emisí a dohledem nad emisemi. Také komunikační model přes poskytovatele cloudových služeb, interoperabilita internetu věcí a telekomunikační systémy Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, Z-Wave.

Následnou kapitolou byl představen model křižovatky s optimálně nastavenou signalizací podle hustoty provozu. V této kapitole je popsán dopravní proud, přímkový vztah mezi rychlostí a hustotou dopravního proudu a fundamentální diagram hustoty a intenzity dopravního proudu. Praktickou částí jsou optimalizační úlohy pro dopravní proud v křižovatce, aplikace teorie hromadné obsluhy na řízení světelné křižovatky. Optimalizace řízení světelné křižovatky s fuzzy řadičem a řízení světelné křižovatky podle Markovova rozhodovacího procesu.

Další kapitolou je model křižovatek vzájemně propojených přes telekomunikační síť internetu věcí, v níž křižovatky výměnou dat mezi sebou komunikují a řídí provoz. V úvodní části kapitoly byl uveden úvod do architektury sítě internetu věcí. Dále byl představen systém propojení dvou křižovatek a synchronizace světelných fází signalizace mezi těmito křižovatkami. V cílové části této kapitoly byla představena architektura propojených křižovatek v síti internetu věcí, jedná se o praktickou část závěrečné práce. V architektuře jsou senzory na detekci vozidel, kamery na sledování provozu v reálném čase, počítač Raspberry Pi, který je připojen k internetové síti a k silničním sensorům, součástí počítače je fuzzy řadič pro nastavení délky světelných signalizací. Přes počítač Raspberry Pi je provedena konfigurace všech zařízení mezi senzory a řadičem, data o dopravních proudech jsou odeslána k sousedním křižovatkám a do centrálního monitorovacího střediska.

V monitorovacím středisku je autorizovaný personál, který dohlíží nad světelnými křižovatkami, a mohou převzít manuální řízení nad křižovatkou. Výstup z kamer z křižovatek vede do monitorovacího střediska. Správu internetu zajišťují cloudové služby, které poskytují infrastrukturu přenosu dat a služby s nimi související. Velké sady dat z dopravních proudů sesbíraných z křižovatek jsou uloženy v Big Data, které jsou zpracovány pomocí systému Hadoop pro různé dopravní analýzy.

Následná kapitola se zabývala zabezpečením telekomunikační sítě internetu věcí na provoz křižovatek, v kapitole byly uvedeny osvědčené postupy zabezpečení internetu věcí, hrozby internetu věcí. Zabezpečená platforma internetu věcí, ve které byla uvedena šifrovací schémata. V praktické části bylo představeno zabezpečení navrhované sítě před škodlivými kódy. Data sesbíraná od senzorů jsou symetrickou šifrou zašifrována a v síti internetu je použita virtuální privátní síť, která v kombinaci s šifrováním a filtrem Firewall představuje vysokou úroveň ochrany před škodlivými kódy. Škodlivé kódy mohou infikovat a poškodit zařízení a uložená data či ovládnout systém nebo zahltit síť velkým množstvím požadavků.

Následná kapitola o ekonomické analýze řízení světelných křižovatek s podporou sítě internetu věcí přináší analýzu přínosů křižovatek v síti internetu věcí. Přínosy jsou spatřovány ve snížení emisí, čekacích dob na červených signalizacích. Tyto negativní externality plynoucí z provozu dopravy, jsou křižovatky s dynamickým řízením podle hustot dopravních proudů redukovat a tím přispět ke zlepšení životního prostředí. V práci byly vyčísleny redukce emisí, dopravních nehod na křižovatkách, redukce času strávených na křižovatkách jako přínosy ke zlepšení stávající situace. V další části kapitoly byly shrnuty náklady na pořízení sto propojených křižovatek, nejvyšším nákladem bylo vybudování zázemí, centrálního monitorovacího střediska. Poté byla provedena analýza nákladů a přínosů. Závěrem bylo vypracováno hodnocení ekonomické efektivity projektu čistou současnou hodnotou, vnitřním výnosovým procentem a indexem rentability. Dle ukazatelů ekonomické hodnocení byl projekt přijatelný.

Řízení provozu světelných křižovatek s podporou komunikační sítě internetu věcí vyžaduje znalosti z mnoha oborů, jak nutně znalosti z oboru dopravy, tak i znalosti architektury internetu, síťového zapojení a síťového zabezpečení, znalosti algoritmů pro optimalizaci dynamických stochastických procesů, včetně návrhu stavebních úprav křižovatek pro optimalizaci řízení dopravních proudů. Mnoho času zabere konfigurace spojení mezi zařízeními, včetně ladění programovacích jazyků.

Diplomová práce přinesla další možnosti využití internetu věcí, zejména v dopravě při dynamickém řízení křižovatek a tím ke snížení externalit plynoucí z dopravy. S novými technologiemi ohledně síťového propojení, fuzzy logiky a fuzzy řadičů, zařízeními na detekci

dopravních prostředků lze řídit provoz na křižovatkách dle potřeb v momentální dopravní situaci. Adekvátní řízení světelných křižovatek je schopné přinést účinek redukce čekacích dob, zmenšení kongescí, snížení hluku, stresu a zátěže na životní prostředí v podobě výfukových plynů i prašnosti v městských zástavbách.

Literatura

- [1] ANNAS, R., YASSINE, H. a MOHAMMED B. IoT for ITS: *A Dynamic Traffic Lights Control based on the Kerner Three Phase Traffic Theory: International Journal of Computer Applications* [online]. 2016 [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: <http://www.ijcaonline.org/archives/volume145/number1/yassine-2016-ijca-910557.pdf>
- [2] AŽD PRAHA. *Systémy pro silniční dopravu: Dopravní detektory* [online]. [cit. 2018-04-18]. Dostupné z: <https://www.azd.cz/admin/files/Dokumenty/pdf/Produkty/Silnicni/Dopravni-detektory.pdf>
- [3] BURIAN, P. *Internet inteligentních aktivit*. Praha: Grada, 2014. Průvodce (Grada). ISBN 978-80-247-5137-5
- [4] CDV. *Ztráty z dopravních nehod v roce 2016: škoda přes 69 miliard korun* [online]. 2018 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.cdv.cz/tisk/ztraty-z-dopravnich-nehod-v-roce-2016-skoda-pres-69-miliard-korun/>
- [5] CORSER, G. *Internet of Things (IoT) Security Best Practices* [online]. 2017 [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: https://internetinitiative.ieee.org/images/files/resources/white_papers/internet_of_things_may_2017.pdf
- [6] ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD [online]. 2018 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: https://www.czso.cz/csu/czso/prace_a_mzdy_prace
- [7] ČUJAN, Z. *Telematika a Inteligentní dopravní systémy* [online]. 2012. [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: http://web2.vslg.cz/fotogalerie/acta_logistica/2013/2-cislo/1_cujan.pdf
- [8] DOHNAL, G. *Teorie hromadné obsluhy: Doplnkový text k přednášce pro 4. ročníky dopravní fakulty ČVUT Praha*. Praha, 1997. Přednáška. Fakulta strojní ČVUT.
- [9] ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD: *Průměrná cena emisní povolenky pro rok 2017* [online]. Jihlava, 2017 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: https://www.eru.cz/documents/10540/462920/prum_cena_emis_povol_2017.pdf/d7765a90-07e6-4f32-8fcd-d313290ad73b

- [10] ERICSSON. *IOT Security - Protecting The Networked Society* [online]. 2017 [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <https://www.ericsson.com/en/white-papers/iot-security-protecting-the-networked-society/white-paper-iot-security-protecting-the-networked-society>
- [11] ERSOY, S. a Y. KARATEPE. *Measurements of noise at crossroads and on transportations, its effects and possible measures to take* [online]. 2011 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.jvejournal.com/article/10447/pdf>
- [12] GUBBI, J., R. BUYYA, S. MARUSIC a M. PALANISWAMI. *Internet of Things (IoT): A Vision, Architectural Elements, and Future Directions* [online]. 2013 [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <http://www.buyya.com/papers/Internet-of-Things-Vision-Future2013.pdf>
- [13] HALL, D. W. *The Internet of Things: Opportunities and Threats* [online]. 2017 [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <https://royalsociety.org/science-events-and-lectures/2017/10/tof-internet-of-things/>
- [14] HALL, N. *Mass Flow Rate* [online]. 2015 [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/mflow.html>
- [15] HOOGENDOORN, S. *Capacity drop: A relation between the speed in congestion and the queue discharge rate* [online]. Delft University of Technology, The Netherlands, 2014 [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: http://www.victorknoop.eu/research/papers/2015trb_capdrop.pdf
- [16] ISOC. *The Internet of Things: An Overview* [online]. Ženeva, Švýcarsko, 2015, 2015 [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <https://www.internetsociety.org/resources/doc/2015/iot-overview>
- [17] JURA, P. *Fuzzy logika v modelování a řízení dynamických systémů: současný stav, perspektivy a výuka* = Fuzzy logic in modelling and control of dynamic systems : state of the art, perspective and education : teze přednášky k profesorskému jmenovacímu řízení v oboru Technická kybernetika. Brno: VUTIUM, 2005. ISBN 80-214-3019-2
- [18] KHIANG, T., KHALID, M. a YUSOF, R. *Intelligent Traffic Lights Control by Fuzzy Logic* [online]. [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/014c/17385fea93504d88912d04f2cfff6c19077.pdf>

- [19] KINNAL, V. a KACHAVIMATH, A. *International Journal of Emerging Technology in Computer Science & Electronics: Control of Vehicle Pollution Throught Internet of Things and Traffic Lights* [online]. 2015 [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <http://www.ijetcse.com/wp-content/plugins/ijetcse/file/upload/docx/264Control-of-Vehicle-pollution-through-Internet-of-Things-and-Traffic-Lights-pdf.pdf>
- [20] KOUKOL, M. a ZAJÍČKOVÁ, L. *Fuzzy Logic in Traffic Engineering: A Review on Signal Control* [online]. [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2015/979160/#B5>
- [21] LACHNIT, F. *Charakteristika dopravního proudu* [online]. Praha, 2005 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/12130378/>
- [22] LATTINI, G., G. PASSERINI a S. TASCINI. *Roundabouts and traffic emissions at crossroads* [online]. 2005 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/SPD05/SPD05091FU2.pdf>
- [23] LAKSHMINARASIMHAN, M. *IoT Based Traffic Management System* [online]. 2016 [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/310036684_IoT_Based_Traffic_Management_System
- [24] LEUKERD, B. *IoT 2020: Smart and Secure IoT Platform: International Electrotechnical Commission* [online]. 2016 [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <http://www.iec.ch/whitepaper/iotplatform/?ref=extfooter>
- [25] LUKÁŠ, L. *Pravděpodobnostní modely v managementu: Markovovy řetězce a systémy hromadné obsluhy*. Praha: Academia, 2009. Lanna. ISBN 978-80-200-1704-8.
- [26] LUKÁŠ, L. *Pravděpodobnostní modely v managementu: Teorie zásob a statistický popis poptávky*. Praha: Academia, 2012. ISBN 978-80-200-2005-5.
- [27] KRZYZANOWSKI, M. *Health effects of transport-related air pollution* [online]. 2005 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0006/74715/E86650.pdf?ua=1
- [28] KURZY [online]. 2018 [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/kurzy-men/kurzy-pro-cla/>

- [29] MAERIVOET, S. a DE MOOR, B. *Traffic Flow Theory* [online]. Katholieke Universiteit Leuven, Belgium, 2008 [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <https://arxiv.org/pdf/physics/0507126.pdf>
- [30] MAK, A. *Approximate Linear Programming for Traffic Control at Isolated Signalized Intersections*. Univerzita Amsterdam [online]. 2007 [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <https://www.math.vu.nl/~sbhulai/papers/paper-mak.pdf>
- [31] MAREŠOVÁ, P. *Měření ve znalostním managementu - aplikace metody Cost Benefit Analysis*. Hradec Králové: Gaudeamus, 2012. Recenzované monografie. ISBN 978-80-7435-229-4.
- [32] MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ [online]. Praha, 2018 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/drazby_povolenek
- [33] NAIR, Madvahan a CAI. *A Fuzzy logic Controller for Isolated Signalized Intersection with Traffic Abnormality Considered* [online]. 2007,5 [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.152.9439&rep=rep1&type=pdf>
- [34] NORRIS, D. *Raspberry Pi: projekty*. Brno: Computer Press, 2015. ISBN 978-80-251-4346-9.
- [35] PAVLÍČEK, A., GALBA, A. a HORA, M. *Moderní informatika*. Druhé. Průhonice: Professional Publishing, 2017. ISBN 978-80-906594-6-9.
- [36] PROIETTI, L., L. SPICUZZA a R. POLOSA. *Urban air pollution at the crossroads of the allergic pandemic* [online]. 2003 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/10639279_Urban_air_pollution_at_the_crossroads_of_the_allergic_pandemic
- [37] PŘIBYL, O. *Neintrusivní dopravní detektory* [online]. 2016 [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <https://zlotarev.fd.cvut.cz/mzd/ctrl.php?act=show,file,23845>
- [38] SMÍTAL, P. *Okružní křižovatky vs. světelně řízené křižovatky* [online]. 2013 [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/okruzni-krizovatky-vs-svetelne-rizene-krizovatky/>
- [39] SPRÁVA VEŘEJNÉHO STATKU PLZEŇ: *Vozidlové detektory* [online]. 2010 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://www.svsmp.cz/svetelna-signalizace/technologie-ssz-v-plzni-iv-komunikace-s-dopravni-ustrednou.aspx>

- [40] STOILOVA, K., STOILOV, T. a NIKOLOV, K. Autonomic Properties in Traffic Control. *Bulgarian Academy of Sciences* [online]. 2013 [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: http://www.cit.iit.bas.bg/CIT_2013/v13-4/2-3-TS3-v5_CIT_K_Todor-Gotovo-m.pdf
- [41] STRIEGLE, R., V. VALENTOVÁ, L. VYSKOČILOVÁ a J. NOVÁK. *Metodika popisující postup pro úprav u křižovatek* [online]. 2013 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.cdv.cz/file/metodika-popisujici-postup-pro-upravu-krizovatek/>
- [42] TECHNICKÁ SPRÁVA KOMUNIKACÍ PRAHA: *Ročenka 2015* [online]. 2016 [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://www.tsk-praha.cz/static/udi-rocenka-2015-cz.pdf>
- [43] TELANG, S. a Sujantha TERDAL. *International Research Journal of Engineering and Technology: An Internet of Things Based Real Time Traffic Light Control to Reduce Vehicles CO2 Emissions* [online]. 2016 [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <https://www.irjet.net/archives/V3/i7/IRJET-V3I7136.pdf>
- [44] TSK. *Dopravní nehody - Světelná signalizace a bezpečnost dopravy v Praze*: Technická správa komunikací hl. m. Prahy [online]. 2014 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:CdCGGFv4HuoJ:https://www.tsk-praha.cz/wps/wcm/connect/www.tsk-praha.cz20642/34d61a78-ff81-496b-acf0-09420626da11/Svetelna_signalizace_a_bezpecnost_dopravy_v_Praze.docx%3FMO%D%3DAJPERES+&cd=1&hl=cs&ct=clnk&gl=cz&client=firefox-b-ab
- [45] TUZAR, A., MAXA, P. a SVOBODA, V. *Teorie dopravy*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997. ISBN 80-01-01637-4.
- [46] UCKELMANN, D., HARRISON, M. a MICHAHELLES, F. *Architecting the internet of things*. Berlin: Springer, 2011. ISBN 978-364-2191-565.
- [47] VIJETHA, H. a NATARAJ. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET): I OT Based Intelligent Traffic Control System* [online]. 2017 [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: <https://www.ijraset.com/files/serve.php?FID=7713>
- [48] VORÁČOVÁ, Š. *Teorie hromadné obsluhy* [online]. 2015 [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <https://www.fd.cvut.cz/departament/k611/pedagog/K611THO.html>

- [49] WHO. *Health and sustainable development: Air pollution* [online]. 2018 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://www.who.int/sustainable-development/transport/health-risks/air-pollution/en/>
- [50] ZELINKA, T. a SVITEK, M. *Telekomunikační řešení pro informační systémy síťových odvětví*. Praha: Grada Publishing, 2009. ISBN 978-80-247-3232-9.

Seznam obrázků

- Obrázek 1. Struktura fuzzy systému
- Obrázek 2. Konstrukce fuzzy relace if ($x = A$) then ($y = B$)
- Obrázek 3. Příklad jazykové realizace, aproximace
- Obrázek 4. Čtyři fáze izolované křižovatky
- Obrázek 5. Izolovaná křižovatka
- Obrázek 6. Obecná struktura řízení SSZ systémem fuzzy logiky
- Obrázek 7. Klasifikace „smart“ předmětů podle výroby a účelu
- Obrázek 8. Architektura internetu
- Obrázek 9. Řízení běžné křižovatky a řešení provozu na křižovatce s detekcí dopravního provozu a automatického přizpůsobení světelných signálů
- Obrázek 10. Navrhovaný systém komunikace vozidel s lokální řídicí jednotkou v síti IoT
- Obrázek 11. Architektura vrstev analýzy dat
- Obrázek 12. Dopravní model Raspberry Pi
- Obrázek 13. Schéma pozorování toku v závislosti na hustotě
- Obrázek 14. Tři fáze ve schématu toku a hustoty
- Obrázek 15. Architektura IoT pro řízení křižovatek
- Obrázek 16. Diagram návrhu řešení řízení světelných křižovatek podle emisí CO₂
- Obrázek 17. Komunikační model zařízení – cloud
- Obrázek 18. Komunikační model zařízení – brána gateway
- Obrázek 19. Přímkový vztah hustoty a rychlosti
- Obrázek 20. Fundamentální diagram založený na rychlosti a inverzní hustotě
- Obrázek 21. Fundamentální diagram intenzity a hustoty při snížení počtu jízdních pruhů

- Obrázek 22. Fundamentální diagram intenzity a hustoty při snížení počtu jízdnic pruhů
- Obrázek 23. Čtyřramenná izolovaná křižovatka, zobrazena pro časování signálu "volno", rameno na pravé straně je zatíženo vozily až na maximální hustotu
- Obrázek 24. Křižovatka s omezenou kapacitou průjezdů vozidel
- Obrázek 25. Model čtyřramenné křižovatky s intenzitami na vstupu a na výstupu v první fázi průjezdu křižovatkou
- Obrázek 26. Model čtyřramenné křižovatky s intenzitami na vstupu a na výstupu v druhé fázi průjezdu křižovatkou
- Obrázek 27. Model čtyřramenné křižovatky s intenzitami na vstupu a na výstupu v třetí fázi průjezdu křižovatkou
- Obrázek 28. Model čtyřramenné křižovatky s intenzitami na vstupu a na výstupu ve čtvrté fázi průjezdu křižovatkou
- Obrázek 29. Dělení dopravního proudu do skupin vozidel
- Obrázek 29. Čtyřramenná křižovatka řízena fuzzy řadičem
- Obrázek 31. Izolovaná čtyřramenná křižovatka v Markovově rozhodovacím procesu
- Obrázek 32. Model křižovatky pro Markovův rozhodovací proces na minimalizaci nákladové funkce
- Obrázek 33. Schematické propojení senzorů a zařízení k síti IoT
- Obrázek 34. Schematické propojení brány IoT gateway se senzory
- Obrázek 35. Systém výměny dat mezi dvěma propojenými křižovatkami
- Obrázek 36. Graf bez kolizních fází křižovatek A a B
- Obrázek 37. Synchronizace fází pro SSZ v síti křižovatek
- Obrázek 38. Architektura IoT v síti propojených křižovatek
- Obrázek 39. Fuzzy aproximace podle počtu vozidel ve frontě
- Obrázek 40. Maximální tok v navržené síti křižovatek

- Obrázek 41. Zabezpečení sítě křižovatek
- Obrázek 42. Čtyřramenná křižovatka s časovou periodou
- Obrázek 43. Průběh nákladů v čase na 10 let
- Obrázek 44. Graf přínosů a nákladů během 10 let

Seznam tabulek

Tabulka 1.	Typy stochastických procesů
Tabulka 2.	Fuzzy proměnné na řízení SSZ
Tabulka 3.	Konfigurace fuzzy pravidel v matici pro řízení SSZ
Tabulka 4.	Přehled o vstupních a výstupních intenzitách v modelovaném příkladu
Tabulka 5.	Hodnoty pro fuzzy řadič
Tabulka 6.	Diagram světelných signálů, barevně oddělených slotů
Tabulka 7.	Diagram světelných signálů, barevně oddělených slotů
Tabulka 8.	Výběr shodných fází k synchronizaci dvou křižovatek
Tabulka 9.	Doba čekání na červené signalizaci
Tabulka 10.	Emisní faktor CO ₂ vozidel na červené signalizaci
Tabulka 11.	Přepočet emisí na finanční hodnoty
Tabulka 12.	Vyčíslení čekacích dob na křižovatce za 1 den
Tabulka 13.	Shrnutí přínosů pro sto křižovatek
Tabulka 14.	Vyčíslení nákladů na zařízení v první úrovni
Tabulka 15.	Vyčíslení nákladů na zařízení v druhé úrovni
Tabulka 16.	Vyčíslení nákladů na zařízení v třetí úrovni
Tabulka 17.	Vyčíslení nákladů na zařízení v čtvrté úrovni
Tabulka 18.	Vyčíslení nákladů na zařízení v páté úrovni
Tabulka 19.	Vyčíslení nákladů na zařízení v šesté úrovni
Tabulka 20.	Vyčíslení nákladů na zařízení v sedmé úrovni
Tabulka 21.	Celkové náklady sedmi úrovní
Tabulka 22.	Variabilní náklady na sto křižovatek v navrženém modelu
Tabulka 23.	Fixní náklady na sto křižovatek v navrženém modelu

Tabulka 24. Vývoj nákladů na 10 let v navrženém systému

Tabulka 25. Příjmy a výdaje v navrženém modelu

Tabulka 26. Diskontované cash flow v navrženém modelu