

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA DOPRAVNÍ**

Bc. Jindřich Belinger

**NÁVRH SYSTÉMU ŘÍZENÍ NA VJEZDU**

(Diplomová práce)

Praha, 2017





K620..... Ústav dopravní telematiky

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Bc. Jindřich Belinger**

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

**N 3710 – IS – Inteligentní dopravní systémy**

Název tématu (česky): **Návrh systému řízení na vjezdu**

Název tématu (anglicky): Ramp Metering Control System Design

### Zásady pro vypracování

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

- Seznamte se s problematikou řízení na vjezdu, měření vstupních veličin a využití akčních členů. Vypracujte příslušnou analýzu.
- Analyzujte logiku řízení. Analyzujte možnost automatického řízení a manuálního zásahu do řízení.
- Navrhněte řídicí systém pro vybranou část komunikační sítě. V rámci návrhu vytvořte mikrosimulační model.
- Implementujte svůj návrh na prostředí řídicích systémů. Vytvořený návrh náležitě zdokumentujte.
- Analyzujte spolehlivost funkce navržené aplikace.

Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího DP

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: Příbyl, P.: Inteligentní dopravní systémy a dopravní telematika. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. 184 s. ISBN 80-01-03122-5.

Příbyl, P. Svítek, M.: Inteligentní dopravní systémy. Praha: BEN -technická literatura, 2001, 543 s. ISBN 80-7300-029-6.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Bc. Vladimír Faltus, Ph.D.**

Datum zadání diplomové práce: **15. června 2016**

(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: **30. května 2017**

- a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia  
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

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



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

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

Bc. Jindřich Belinger  
jméno a podpis studenta

V Praze dne ..... 15. června 2016

## **Prohlášení**

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

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

V Praze dne 30.5.2017

.....

**Bc. Jindřich Belinger**

## **NÁVRH SYSTÉMU ŘÍZENÍ NA VJEZDU**

Diplomová práce  
Červen 2017

### **Úplná bibliografická identifikace**

**Jméno a příjmení autora:** Bc. Jindřich Belinger

**Název bakalářské práce:** Návrh systému řízení na vjezdu

**Pracoviště:** Ústav dopravní telematiky

**Vedoucí bakalářské práce:** Ing. Bc. Vladimír Faltus, Ph.D.

**Rok obhajoby bakalářské práce:** 2017

**Počet stran:** 80

**Počet příloh:** 9

### **Anotace (abstrakt)**

Diplomová práce se zabývá problematikou řízení na vjezdu. První dvě kapitoly jsou zaměřeny na seznámení s různými druhy detektorů, akčních členů a s principy řízení na vjezdu. Následná část je věnována tvorbě modelů dopravy, mikrosimulačního modelu a řízení, návrhu algoritmů a jejich implementaci na řídicí systémy.

### **Abstract**

This thesis deals with problematics of ramp metering control. The first two chapters are focused on getting acquainted with different types of detectors, actuators and ramp metering control principles. The subsequent section is devoted to traffic models development, microsimulation model and control, algorithms design and implementation to control systems.

**Klíčová slova**

Řízení na vjezdu RMC, dálnice, připojení na dálnici, modely dopravy, řídicí systémy, programovatelné automaty PLC, liniová schémata, simulace, snímače, doprava

**Keywords**

Ramp metering control RMC, highway, highway connection, traffic models, control systems, programmable logic controllers PLC, ladder diagrams, simulations, sensors, traffic

# Obsah

Seznam použitých zkratk	6
Seznam použitých veličin a jednotek	7
Slovník pojmů	9
Poděkování	10
Úvod	11
<b>1 Problematika řízení na vjezdu</b>	<b>12</b>
1.1 Technický popis systému [4]	12
1.1.1 <i>Architektura systému</i>	13
1.1.1.1 Funkční architektura	13
1.1.1.2 Informační architektura	14
1.1.1.3 Fyzická architektura	14
1.1.1.4 Komunikační architektura	15
1.1.1.5 Vazba na systém liniového řízení dopravy	15
1.1.2 <i>Přínosy</i>	15
1.1.3 <i>Řešení aplikace</i>	16
1.1.4 <i>Rozmístění prvků [4]</i>	16
1.2 Měření vstupních veličin	18
1.2.1 <i>Dopravní detektory [5]</i>	18
1.2.1.1 Indukční smyčky	19
1.2.1.2 Kamerové systémy	20
1.3 Akční členy [4]	22
1.4 Řadič [4]	22
1.5 Centrum dopravní telematiky	23
1.6 Světové implementace [8]	23
1.6.1 <i>Nizozemsko</i>	23
1.6.2 <i>Velká Británie</i>	23
1.6.3 <i>USA</i>	24
1.6.4 <i>Výhody a nevýhody</i>	27
<b>2 Algoritmy pro řízení na vjezdu [4]</b>	<b>28</b>
2.1 Akční zásahy	28
2.2 Řídicí přístupy [8]	28
2.2.1 <i>Modely dopravy</i>	30
2.3 Příklady algoritmů	31
2.3.1 <i>Algoritmus požadované kapacity [14]</i>	31
2.3.2 <i>Zpětnovazební RMC [15]</i>	32
<b>3 Návrh aplikace řízení na vjezdu</b>	<b>37</b>
3.1 Vybraný úsek komunikace	37
3.2 Architektura	39



3.2.1	<i>Uživatelské potřeby</i>	39
3.2.2	<i>Funkce</i>	39
3.2.3	<i>Funkční architektura</i>	40
3.2.4	<i>Informační architektura</i>	40
3.2.5	<i>Fyzická architektura</i>	40
3.2.6	<i>Komunikační architektura</i>	41
3.2.7	<i>Schéma a detailní popis vybraného úseku a instalovaného systému</i>	41
3.3	Model dopravy	42
3.4	Principy řízení	44
3.5	Algoritmy řízení a ovládání	46
3.5.1	<i>Algoritmus zapnutí a vypnutí řízení</i>	46
3.5.2	<i>Algoritmus volby signálního plánu</i>	49
3.5.3	<i>Algoritmus aktivace signálního plánu</i>	51
3.5.4	<i>Algoritmus signálního plánu</i>	52
<b>4</b>	<b>Vytvoření simulačního modelu</b>	<b>53</b>
4.1	Simulace bez řídicího systému	56
4.1.1	<i>Testovací data</i>	56
4.1.2	<i>Data Praha</i>	57
4.2	Simulace s použitím řídicího systému RMC	59
4.2.1	<i>Testovací data</i>	59
4.2.2	<i>Data Praha</i>	60
4.3	Porovnání výsledků s RMC a bez RMC	61
4.3.1	<i>Testovací data</i>	61
4.3.2	<i>Data Praha</i>	63
4.4	Ověření a kalibrace limitů řízení	63
<b>5</b>	<b>Implementace na řídicí systémy</b>	<b>64</b>
5.1	Hardware	64
5.2	Konfigurace	64
5.3	Implementace algoritmů	65
5.4	Testování	68
<b>6</b>	<b>Analýza spolehlivosti funkce navržené aplikace</b>	<b>69</b>
6.1	Detektory a komunikace s řadičem	69
6.1.1	<i>Detektory</i>	69
6.1.2	<i>Komunikace detektoru s řadičem</i>	70
6.2	Řadič	70
6.3	Akční členy a komunikace s řadičem	70
6.3.1	<i>Akční členy</i>	70
6.3.2	<i>Komunikace akčních členů s řadičem</i>	71
6.4	Dopravní ústředna a komunikace s řadičem	71

6.4.1	<i>Dopravní ústředna</i> .....	71
6.4.2	<i>Komunikace dopravní ústředny s řadičem</i> .....	71
	<b>Závěr</b> .....	<b>72</b>
	<b>Seznam použitých zdrojů</b> .....	<b>74</b>
	<b>Seznam obrázků</b> .....	<b>76</b>
	<b>Seznam tabulek</b> .....	<b>78</b>
	<b>Seznam rovnic</b> .....	<b>79</b>
	<b>Seznam příloh</b> .....	<b>80</b>

## Seznam použitých zkratek

ACC	Accumulator	Akumulátor
GBP	Great Britain Pound	Anglická libra
IZS		Integrovaný záchranný systém
LPR	Licence Plate Recognition	Rozpoznávání SPZ
NDIC		Národní dopravní informační centrum
PLC	Programable Logic Controler	Programovatelný automat
PNV		Podíl nákladních vozidel
RLTC	Road Line Traffic Control	Liniové řízení dopravy
RMC	Ramp Metering Control	Řízení na vjezdu
RPDI		Roční průměr denních intenzit
SP		Signální plán
SPZ		Státní poznávací značka
SSZ		Světelné signalizační zařízení
TMO	Traffic Measuring Object	Dopravní měřicí objekt
USD	United States Dollar	Americký dolar
VAC	Voltage in Alternated Current	Střídavé napětí

## Seznam použitých veličin a jednotek

a	[-]	Koeficient	Koeficient algebraické rovnice
akt_p	[-]	Proměnná	Signální plán aktuálního cyklu
b	[-]	Koeficient	Koeficient algebraické rovnice
cycSecond	[s]	Proměnná	Sekunda cyklu
Init	[-]	Proměnná	Inicializace systému
k	[voz/km]	Hustota	Počet vozidel na jednotku délky komunikace
o	[%]	Obsazenost	Poměr doby obsazení detektoru k periodě měření
o_det1	[%]	Proměnná	Obsazenost v hlavním směru
o_det2	[%]	Proměnná	Obsazenost bližšího kongesčního detektoru
o_det3	[%]	Proměnná	Obsazenost vzdálenějšího kongesčního detektoru
o_det4	[%]	Proměnná	Obsazenost za místem připojení rampy
pred_p	[-]	Proměnná	Signální plán předchozího cyklu
q	[voz/h]	Intenzita	Počet vozidel v místě měření za jednotku času
q_det1	[voz/h]	Proměnná	Intenzita v hlavním směru
RMC	[-]	Proměnná	Spouštění a vypínání řízení
SP_00	[-]	Podprogram	Signální plán vjezdu 0 vozidel za 30 s
SP_01	[-]	Podprogram	Signální plán vjezdu 1 vozidla za 30 s
SP_02	[-]	Podprogram	Signální plán vjezdu 2 vozidel za 30 s
SP_03	[-]	Podprogram	Signální plán vjezdu 3 vozidel za 30 s
SP_04	[-]	Podprogram	Signální plán vjezdu 4 vozidel za 30 s
SP_05	[-]	Podprogram	Signální plán vjezdu 5 vozidel za 30 s
SP_06	[-]	Podprogram	Signální plán vjezdu 6 vozidel za 30 s
SP_07	[-]	Podprogram	Signální plán vjezdu 7 vozidel za 30 s
SP_08	[-]	Podprogram	Signální plán vjezdu 8 vozidel za 30 s
SP_09	[-]	Podprogram	Signální plán vjezdu 9 vozidel za 30 s
SP_10	[-]	Podprogram	Signální plán vjezdu 10 vozidel za 30 s

SP_11	[-]	Podprogram	Signální plán vjezdu 11 vozidel za 30 s
SP_12	[-]	Podprogram	Signální plán vjezdu 12 vozidel za 30 s
SP_13	[-]	Podprogram	Signální plán vjezdu 13 vozidel za 30 s
SP_14	[-]	Podprogram	Signální plán vjezdu 14 vozidel za 30 s
SP_15	[-]	Podprogram	Signální plán vjezdu 15 vozidel za 30 s
SP_16	[-]	Podprogram	Signální plán blikavá žlutá (vypnuto)
v	[km/h]	Rychlost	
VH	[voz·h]	Vozohodina	
v_det4	[km/h]	Proměnná	Rychlost za místem připojení rampy

## Slovník pojmů

Algoritmus	Postup při řešení problému
Hlavní směr	Dálnice D7 směr na Prahu
Kongesční detektor	Detekce vzniku kongesce (fronta na přivaděči)
Metering rate	Počet vypuštěných vozidel během jednoho cyklu
Vedlejší směr	Přivaděč ze silnice I/61 na D7 směr na Prahu

## **Poděkování**

V první řadě bych tímto rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce, panu Ing. Bc. Vladimíru Faltusovi, Ph.D., za perfektní vedení, obětování svého času pro konzultace i za pomoc při praktické části v laboratoři řídicích systémů. Dále bych chtěl poděkovat kolegovi Bc. Marku Švecovi za odborné rady v oblasti simulace. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat přítelkyni a rodině za podporu během studia i během zpracování závěrečné práce.

## Úvod

Ve své diplomové práci se budu věnovat řízení silniční dopravy, konkrétně problematice řízení na vjezdu (Ramp metering control – RMC). Tímto způsobem řízení dopravy se budu zabývat především kvůli tomu, že doposud nebyl v České republice nikde nasazen, avšak výsledky v řadě implementací po celém světě byly úspěšné. Nasazení řízení na vjezdu by vedlo k větší bezpečnosti provozu a snížení cestovních dob v místech připojování vedlejší komunikace na liniovou.

V teoretické části práce (první dvě kapitoly) shrnu základní principy, popis a přínosy systému řízení na vjezdu. Uvedu také informace a poznatky z již funkčních systémů ze zahraničí, jelikož v České republice implementován nebyl. Následně naváží různými druhy dopravních detektorů využívaných pro sběr dat o dopravním proudu. Dále zde uvedu akční členy, kterými dochází k řízení vjezdu na liniovou komunikaci a základní způsoby řízení.

V následné praktické části se zaměřím v první řadě na výběr úseku pro implementaci řízení na vjezdu. Po výběru úseku provedu simulace pro dané parametry komunikace z důvodu vytvoření modelů dopravy. Pomocí modelů dopravy určím rozhodující pravidla pro řízení systému. V rámci návrhu systému nejdříve vytvořím algoritmy jednotlivých procesů pomocí vývojových diagramů a následně algoritmy implementuji do řízení mikrosimulačního modelu i na prostředí programovatelných automatů (PLC).

Hlavním cílem této diplomové práce je získání zkušeností s řídicími systémy, vytvoření mikrosimulačního modelu, návrh funkčních algoritmů, implementace algoritmů do řízení modelu a na řídicí systémy, a to konkrétně na programovatelné automaty. Dále pak porovnat výsledky modelu s použitím navrženého řízení a bez něj. Potřebné je posoudit případné stavební či jiné úpravy v místě realizace systému RMC. Dílčím cílem je analyzovat spolehlivost funkce navrženého systému. Jedním z cílů je rovněž seznámení s různými prostředky detekce parametrů dopravního proudu a prostředky pro zobrazení akčních veličin řidičům vozidel.



# 1 Problematika řízení na vjezdu

Řízení na vjezdu (RMC) je automaticky řízený soubor telematických prvků na pozemní komunikaci, který se dle aktuálního stavu dopravy hlavního proudu snaží dávkovat vozidla z rampy připojovacího pruhu v momentě, kdy tato vozidla mají možnost se do hlavního proudu připojit takovým způsobem, aby nedošlo k narušení dopravního toku na hlavní komunikaci.

Vzhledem k rostoucím intenzitám vozidel na pozemních komunikacích nastávají častěji konfliktní situace, které mohou vést k dopravním nehodám a dále i ke ztrátám na lidských životech. Telematická aplikace RMC slouží k předcházení takovýmto situacím. Při vysokých hustotách provozu díky zásahu tohoto systému nedochází k náhodnému vjíždění připojovaných vozidel do hlavního proudu a tím k náhlým změnám rychlostí vozidel vedoucích ke vzniku STOP and GO vln.

Nachází-li se dopravní proud na liniové komunikaci na mezi stability, stačí malý podmět k tomu, aby nastala reakce projevující se tvorbou kolony nebo dokonce nehody. Tímto podmětem mohou být vjíždějící vozidla na liniovou komunikaci takovým způsobem, že nutí zpomalit nebo změnit směr vozidla jedoucí na ní. Řízení vjezdu na dálnici (Ramp metering control) neustále vyhodnocuje data měřená na liniové komunikaci a predikuje její stav před daným vjezdem. Následně dávkuje vjezd připojujících se vozidel pomocí světelného signalizačního zařízení (SSZ). Doba zelené na SSZ je přímo ovlivněna momentálním a predikovaným stavem na liniové komunikaci.

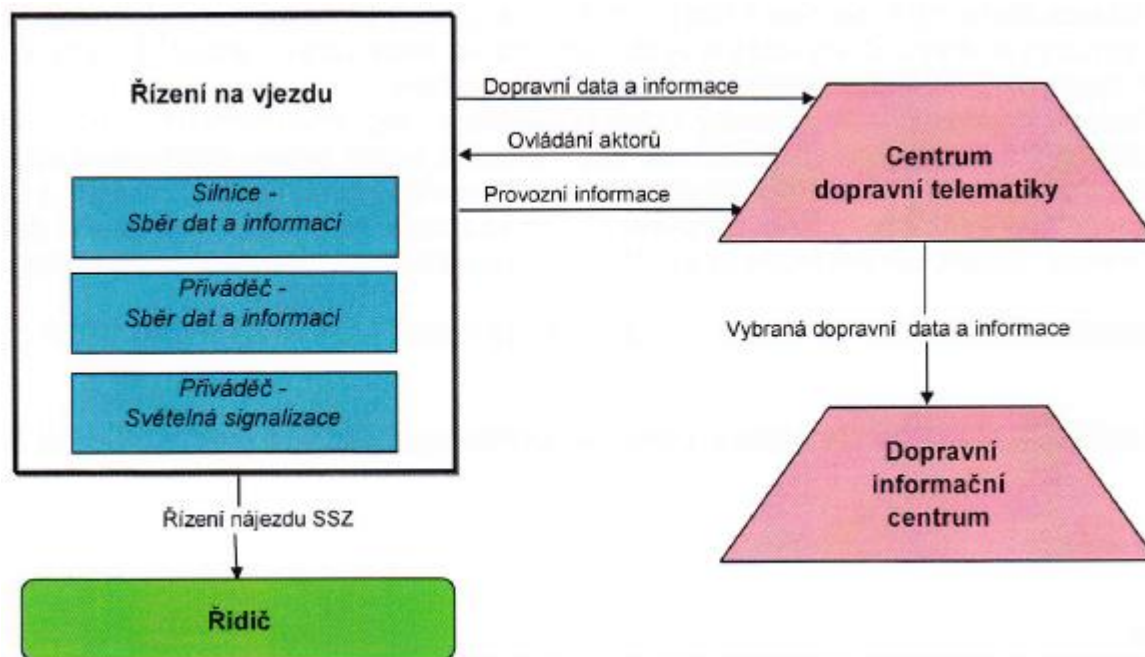
Napojení dálnic pomocí RMC je méně častá varianta vzhledem k vysoké rychlosti vozidel a možnosti vzniku nehod vlivem front na rampách, kde by je řidiči nečekali. Ovšem pokud geometrické podmínky umožní využít RMC při napojení dálnic, může být výrazně zlepšena schopnost řídit provoz na dálnici podílem vstupujících vozidel.

## 1.1 Technický popis systému [4]

System řízení na vjezdu (RMC) je charakterizován trojbarevným světelným signalizačním zařízením na vjezdové větvi mimoúrovňové křižovatky před připojovacím pruhem.

Vozidla jsou pomocí SSZ dávkována tak, aby bylo minimalizováno narušení hlavní trasy a aby byla zvýšena bezpečnost provozu při řazení vozidel do hlavního dopravního proudu. Zároveň je doporučeno kontrolovat tvorbu kolon připojovaných vozidel.

Součástí systému je rovněž svislé dopravní značení, které upozorňuje řidiče na tento způsob řízení dopravy v dostatečné vzdálenosti před příjezdem vozidla k SSZ.



Obr. 1: Schéma základních fyzikálních vazeb [4]

### 1.1.1 Architektura systému

Systém RMC je popsán hierarchickou architekturou. Funkce hierarchické architektury spočívá v komunikaci pouze sousedních dvou vrstev. Data z detektorů jsou předávána řadiči, který je lokalizován poblíž návěstidel. Řadič následně data vyhodnotí a předá dále centru dopravní telematiky. Dle vyhodnocení dat vydá příkaz k zobrazení dané návěsti na akčních členech (návěstidlech). Z centra dopravní telematiky může být vyslán příkaz k vypnutí či zapnutí řízení. Architektura systému RMC je znázorněna na následujících obrazech.

#### 1.1.1.1 Funkční architektura

Funkční architektura je složena z vrstev zobrazených na Obr. 2. Naměřená data se shromažďují a vyhodnocují ve vrstvě 2 a dále jsou předávány vrstvě nadřazené. Ve 2. vrstvě se rovněž provádí automatizované řízení. Z této vrstvy jsou data poskytována vrstvě 1., kde probíhá řízení útvaru a krizové řízení s možným zásahem dispečera, který může sledovat situaci pomocí dohledových kamer, jsou-li mu k dispozici. Opačnou cestou se předávají informace zpět od 1. až po poslední vrstvu 3.



Obr. 2: Funkční architektura RMC

### 1.1.1.2 Informační architektura

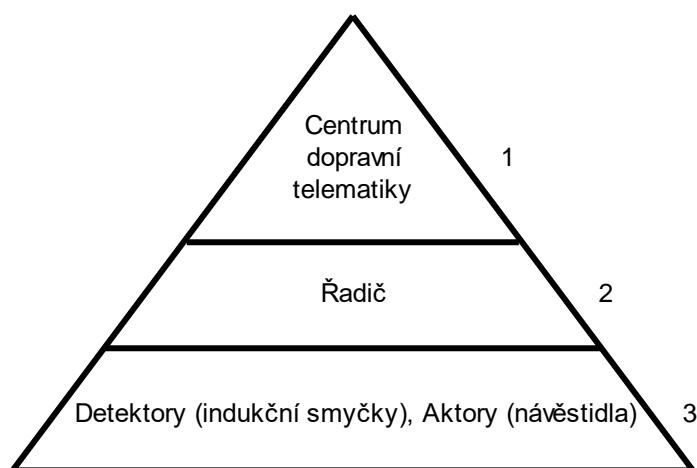
Informační architektura popisuje tok informací mezi jednotlivými vrstvami. Druh informací je sepsán v následující tabulce Tab. 1. Informace přenášená mezi vrstvami 2 a 3 se mohou lišit v závislosti na typu použitých detektorů. Pokud by byly využity snímače obyčejné je třeba přenášené informace dále zpracovat v řadiči. Pokud by byly využity inteligentní snímače, výstupem z nich jsou přímo parametry dopravy, které není nutné dále zpracovávat.

Tab. 1: Informační architektura RMC

Vrstva	Informace
3 – 2	Obsazení detektoru
2 – 3	Akční veličiny automatizovaného řízení
2 – 1	Strategické informace o dopravním proudu
1 – 2	Akční veličiny strategického a krizového řízení
1 – NDIC	Informace o stavu dopravy

### 1.1.1.3 Fyzická architektura

Fyzická architektura je strukturována dle Obr. 3. Vychází z funkční architektury, ale zobrazuje fyzické prvky, které vykonávají jednotlivé funkce z předešlé funkční architektury. Vrstva 3 zahrnuje detektory (indukční smyčky, videodetekce) a akční členy (návěstidla). Vyšší vrstva 2 zahrnuje řadič a vrstva 1 centrum dopravní telematiky. Dané uspořádání je v souladu s technickými podmínkami dopravní telematiky na pozemních komunikacích.



Obr. 3: Fyzická architektura RMC

#### 1.1.1.4 Komunikační architektura

Komunikační architektura obsahuje propojení prvků fyzické architektury i propojení v rámci jedné vrstvy. Na úrovni vrstvy 3 se nejčastěji využívá propojení metalické. To samé platí i pro propojení s vrstvou 2. K propojení vrstev 2 a 1 je možné využít vedení metalické, optické nebo bezdrátové. Záleží na dostupnosti jednotlivých sítí, ale zároveň vzít ohled na množství přenášených dat.

#### 1.1.1.5 Vazba na systém liniového řízení dopravy

Vazba RMC na systém liniového řízení dopravy (RLTC) je velmi příznivá, jelikož systém RLTC může upravit dopravní proud před místem připojení vedlejší komunikace tak, aby vozidla z přípojné rampy se mohla snáze zařadit do hlavního proudu. RLTC tak může zasáhnout např. snížením maximální dovolené rychlosti v daném úseku nebo dokonce uzavřením pravého jízdního pruhu.

#### 1.1.2 Přínosy

Prokazatelným přínosem této telematické aplikace je zvýšení bezpečnosti provozu harmonizací dopravního proudu z toho důvodu, že při připojování vozidel do saturovaného hlavního dopravního proudu často dochází k riskantním manévřům přiváděných vozidel a následně změně směru nebo zpomalení vozidel hlavního proudu. [4]

#### Mobilita, spolehlivost a účinnost

Systém RMC má příznivý dopad na kongesci a tím i na zkrácení jízdních dob, zatímco se zvyšuje mobilita na dálnicích i jejich propustnost. Spolehlivost cestovních dob (cestovní doby

se závažně nemění) se stala měřítkem efektivity RMC. Tato spolehlivost byla ověřena v mnoha regionech, kde bylo řízení na vjezdu nasazeno. [8]

## **Bezpečnost**

RMC pomáhá rozdělit velké shluky vozidel na přípojné rampě a dávkuje vozidla do hlavního směru, pouze pokud je v něm možnost se připojit. Použitím této metody se sníží počet nehod. Tento poznatek potvrdilo zavedení RMC v daných oblastech.

Správné řízení fronty na rampách dokáže zabránit negativním vlivům a ucpání ulic města vozidly, která čekají na povolení k vjezdu na dálnici. [8]

## **Snížení dopadů na životní prostředí**

System harmonizuje dopravní proud v hlavním směru vlivem optimálního připojování vozidel, tím dochází k redukci stop and go vln v hlavním směru a v důsledku toho k úsporám paliva a snížení emisí. Ačkoli je obtížné měřit dopady na životní prostředí, některé regiony nechaly provést analýzu ovzduší, kde došlo ke snížení emisí uhlíku. [8]

### **1.1.3 Řešení aplikace**

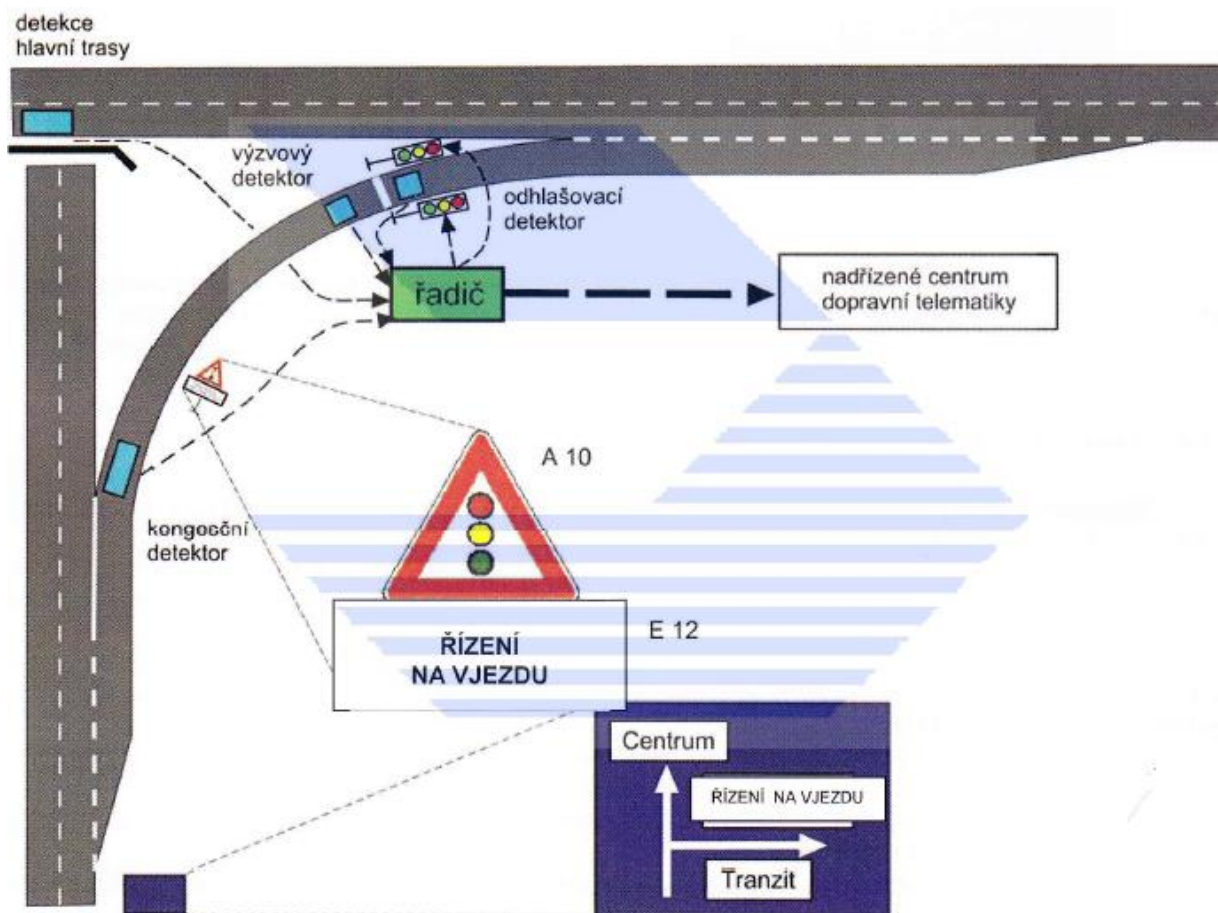
Základem těchto telematických aplikací je sběr dopravních dat, přenos dat a povelů, zpracování dat a řízení SSZ. Důležitou roli ve funkci systému představuje řídicí proces, který obstarává modifikovaný řadič SSZ, pro který platí ta výjimka, že nemusí dodržovat minimální délku signálu volno 5 s. System RMC pracuje pouze lokálně, předpokládá se také propojení s informačními systémy a provozními systémy zajišťujícími servis. Rychlost vozidel na přivaděči musí být upravena na max. 50 km/h v dostatečné vzdálenosti před přivaděčem. Podkladem pro implementaci tohoto systému je doporučeno zpracovat model dopravy s rozhodující úlohou odstupů vozidel. [4]

### **1.1.4 Rozmístění prvků [4]**

Návěstidla SSZ jsou umístěna po obou stranách přivaděče. Mezi sloupy SSZ je na vozovce vyznačená souvislá čára (STOP čára). Návěstidla jsou umístěna ve vzdálenosti 10 – 20 m před začátkem připojovacího pruhu. Pro možnost řízení je vhodné umístit dopravní detektory na následujících místech:

- Detekce dat hlavní trasy – měřicí řez umístěn 750 až 1500 m před začátkem připojovacího pruhu. Doporučená je však detekce ve dvou řezech před připojovacím pruhem a také bezprostředně za ním;
- Detekce dat a tvorby kolon přivaděče – měřicí řez umístěn v dostatečné vzdálenosti před SSZ, aby v případě tvorby kolony detekovaná vozidla stojící na konci kolony před SSZ nemohla ovlivnit stabilitu dopravního proudu a bezpečnost dopravy, z něhož jsou přiváděna;
- Detekce vozidel odhlašujících se ze STOP čáry;
- Detekce přihlašujících se vozidel – měřicí řez umístěn 10 až 20 m před STOP čárou.

Řadič SSZ, který řídí funkci systému, bývá zpravidla umístěn v blízkosti SSZ. [4]



Obr. 4: Typická konfigurace RMC [4]

## 1.2 Měření vstupních veličin

K získávání vstupních veličin se využívají snímače neboli detektory. Měřením vstupních veličin získáváme informaci o stávajícím stavu měřeného systému, v tomto případě dopravního proudu. Měřené veličiny musejí charakterizovat měřený systém.

Dopravní data se detekují na hlavní trase ve všech jízdnicích pruzích. Interval sběru dat je 5 až 20 sekund. Z těchto naměřených dat se vytvoří dopravní model, který je podkladem pro algoritmy řídicího procesu [4].

Dopravní data, která se měří na přivaděči, zahrnují kromě odhlášení a přihlášení vozidel také přítomnost jedoucího vozidla a měření vzniku kolony. Interval sběru dat na přivaděči je rovněž 5 – 20 sekund.

### 1.2.1 Dopravní detektory [5]

Dopravní detektory jsou nezbytné pro využití dopravní telematiky. Právě z těchto technických prvků tvořících sběrný systém informací o dopravním proudu se získávají vstupní data pro řízení dopravy. Charakteristickými veličinami dopravního proudu jsou:

- Intenzita [voz/h];
- Rychlost [km/h];
- Obsazenost jízdnicích pruhů;
- Klasifikace vozidel, podíl nákladních vozidel;
- Hustota [voz/km].

Dopravní detektory využívají různé fyzikální principy a vyrábí se v mnoha provedeních. Mezi nejrozšířenější patří indukční smyčky a videodetekce.

Detektory dělíme do základních dvou skupin podle toho, zda zasahují do vozovky či nikoliv. Snímače zasahující do povrchu vozovky označujeme jako intrusivní. Neintrusivními snímači rozumíme ty, které nejsou aplikovány do vozovky a nedochází tím k jejímu narušení.

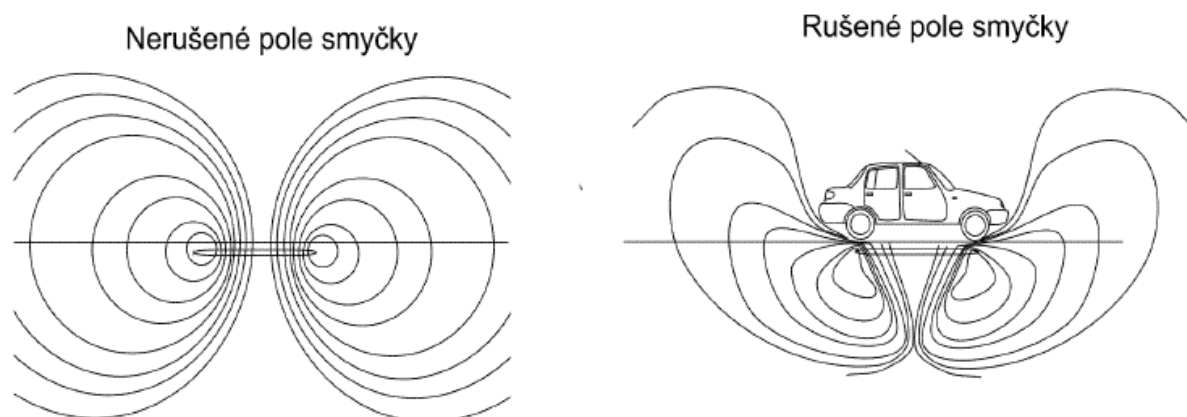
Tab. 2: Rozdělení detektorů [10]

Intrusivní	Neintrusivní
Indukční smyčky*	Kamerové detektory*
Magnetické detektory	Ultrazvukové detektory
Piezoelektrické detektory	Infračervené detektory
Detektory s vláknovou optikou	Mikrovlnné detektory

Detektory, které jsou označené v Tab. 2 symbolem \*, bývají nejčastěji využity pro sběr dat o dopravním proudu a budou dále podrobně rozepsány.

### 1.2.1.1 Indukční smyčky

Indukční smyčky využívají změny indukčnosti cívky, která je zabudována pod povrchem vozovky. Jedná se tedy o intrusivní detektory. Umisťují se do vyfrézované drážky ve vozovce nebo v lepším případě přímo při výstavbě komunikace do asfaltového koberce. Zařízení obsahuje vodič umístěný ve vozovce, přívodní vedení, impedanční transformátor a vyhodnocovací zařízení. Impedanční transformátor a vyhodnocovací zařízení se nacházejí mimo prostor vozovky. Změna indukčnosti je vyvolána pohybem kovového předmětu (automobilu, motocyklu, jízdního kola,...) nad vodičem. Impedanční transformátor zaznamená tuto událost a ta je předána do vyhodnocovacího zařízení. Princip činnosti je zobrazen na Obr. 5. Smyčky ve vozovce mohou mít různé tvary. Nejčastěji se však využívá tvar obdélníkový.



Obr. 5: Princip narušení indukční smyčky [11].

Cívka je napájena ze zdroje harmonických kmitů o frekvenci  $20 \div 150$  kHz. Detektor zaznamenává:

- Změnu amplitudy;
- Posuv fáze;
- Změnu kmitočtu.

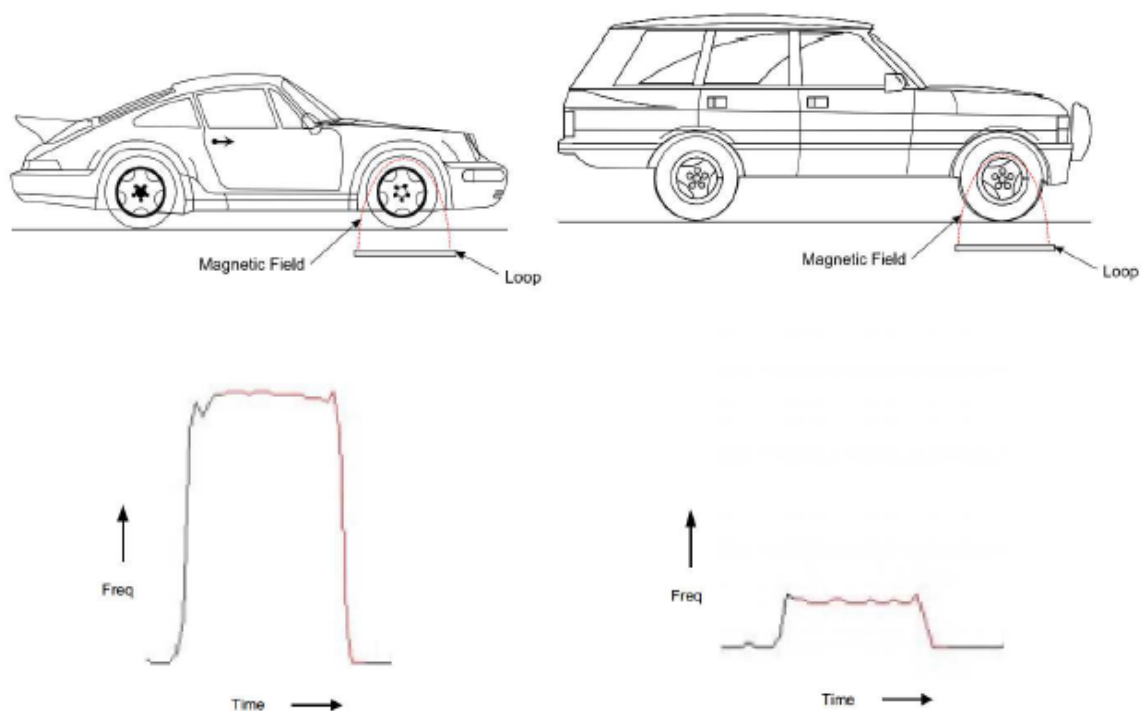
Přítomností vozidla se sníží amplituda, posune se fáze a zvýší se kmitočet obvodu. Změna kmitočtu při obsazení smyčky je znázorněna na Obr. 6. Na tomto snímku lze zároveň sledovat, že při průjezdu různých druhů vozidel se frekvence zvyšuje odlišně. [10]

Citlivost smyčky se může lišit vlivem různých faktorů. Mezi tyto faktory patří povrch vozovky, který by měl být proveden z nevodivého materiálu. Dále pak armování,



kteřé snižuje citlivost o 5 ÷ 50 %, délka přívodního vedení, hloubka uložení cívky ve vozovce a překrytí smyčky vozidlem (může dojít k částečnému překrytí). [10]

Pomocí indukční smyčky mohou být měřeny tyto veličiny dopravního proudu: intenzita, obsazenost, přítomnost vozidla, časový odstup a rychlost. Pro přesné měření rychlosti je třeba umístit dvě smyčky za sebou v určité vzdálenosti.



Obr. 6: Změna frekvence při průjezdu vozidla [11].

Tab. 3: Hodnocení indukčních smyček [10]

Výhody	Nevýhody
Nízká cena	Zásah do vozovky
Spolehlivost	Omezení dopravy při výstavbě
Flexibilita	Nutnost údržby
Neovlivněné počasím	Snížení životnosti vozovky
	Nutnost reinstalace při opravách vozovky

### 1.2.1.2 Kamerové systémy

Kamerové systémy využívají změny obrazu v čase. Jedná se o neintrusivní dopravní detektory. Kamery jsou obvykle umístěny nad jízdnicí pruhy vozovky, kde jednou kamerou je snímáno více jízdnicích pruhů. Pojmem kamerové systémy můžeme rozumět videodetekci, dohledové kamery nebo identifikační kamery. Identifikační kamery slouží k identifikaci vozidel čtením SPZ (LPR). LPR jsou využívány v systémech pro automatický výběr mýta.

Dohledové kamery jsou využívány jako prvky, skrze které mohou dispečerů sledovat dopravu. Dohledové kamery bývají používány společně s videodetekcí. Videodetekce slouží k měření parametrů dopravního proudu.

V obrazu záběru se vytyčí oblast, ve které budou rozpoznávány změny. Vytvoří se tzv. virtuální smyčky. Při průjezdu vozidla tímto prostorem dojde ke změně obrazu. Tato změna je registrována softwarem a následně je vyhodnocena. Videodetekce dokáže také zaznamenat překážku v prostoru pozemní komunikace nebo dopravní nehodu. Stane se to tím, že vyhodnocovaný prostor bude stále obsazen, tato informace se přeneše k dispečerovi, který prostřednictvím dohledových kamer situaci vyhodnotí a vhodně zasáhne. Systémy videodetekce dělíme na integrované videodetektory a videodetekční modulární systémy. Integrované videodetektory jsou kamery vybavené snímačem v jednom celku. Výstupem z těchto detektorů jsou data o dopravním proudu. Oproti tomu výstupem z modulárních systémů je videozáznam, který se zpracovává až v nadřazené vrstvě. Výhodou modulárních systémů je možnost využít různé druhy kamer. Dále existuje možnost využít obrazový záznam, např. pro dopravní inženýrství, modelování atd. V nadřazeném systému lze libovolně volit snímané oblasti. Lze využít také pro úsekové měření rychlosti, obsazenosti úseku.

Tab. 4: Hodnocení videodetekce [10]

Výhody	Nevýhody
Nezasahuje do vozovky	Ovlivněno počasím (mlha, vítr)
Možnost měnit snímané oblasti	Rychlost zpracování videa
Flexibilita	Větší objemy dat
Není potřeba reinstalace při opravách vozovky	Nutnost umístění na portál nebo sloup



Obr. 7: Záznam videodetekce [12]

### 1.3 Akční členy [4]

Akčními členy v systému RMC jsou návěstidla, která dávají řidiči povolení ke vjezdu z přípojně na hlavní komunikaci. Užívá se zde světelných signálů tříbarevné soustavy s plnými signály. Doporučené je použití signálů o průměru 300 mm. Návěstidla musejí být vybavena diagnostikou poruch, kterou vyhodnocuje řadič. Řadič poskytuje hlášení nadřazené stanici o ztrátě napájení, poruše světelného zdroje a přepnutí na náhradní světelný zdroj. Následně nadřazená stanice musí generovat hlášení.



Obr. 8: Tříbarevné návěstidlo [13]

### 1.4 Řadič [4]

System RMC může být konfigurován v následujících variantách:

- Řadič SSZ je připojen paralelní datovou sběrnici s distribuovanými řídicími stanicemi nebo vstupními moduly, které jsou umístěné u měřících řezů hlavní komunikace. Distribuované vstupní moduly zajišťují pouze přenos dat do hlavní řídicí stanice. Propojení hlavní řídicí stanice je provedeno paralelním přenosem dvoustavových signálů.
- Řadič SSZ je přímo propojen s jednotlivými detektory sériovou sběrnici.

Napájení elektrickou energií musí zajistit napájení všech detektorů, SSZ, řadiče a případně i distribuované stanice nebo vstupní moduly. Doporučené je napájení nepřerušovaným zdrojem a záložním napájením po dobu 120 minut.

Procesní kapacita řadiče musí být navržena na zpracování velkého objemu dat, které se získávají kontinuálním měřením na detektorech. Cílem zpracování dat je tvorba modelů dopravy. Algoritmy pro zpracování dat musejí zajistit systémovou integritu (v určitých mezích doplnit chybějící data např. z důvodu krátkodobého výpadku na detektoru).

## 1.5 Centrum dopravní telematiky

Centrum dopravní telematiky (dopravní ústředna) je místo, odkud je možné dohlížet i dálkově ovládat systém RMC. Dohled a ovládání probíhá na pracovišti dispečinku. Odsud je možné provést dispečerem akční zásah do systému (např. při vzniku dopravní nehody, poruchy, atd.). Rovněž jsou dopravní ústředně poskytována data pro řízení dopravy na vyšší úrovni (např. řízení oblasti nebo útvaru).

## 1.6 Světové implementace [8]

V této části budou porovnány vybrané jednotlivé implementace systému RMC ve světě. Systém RMC je jednoznačně nejvíce rozšířen v USA. Dále pak v Nizozemsku, Velké Británii, ale také v Austrálii, Japonsku a mnoha dalších zemích.

### 1.6.1 Nizozemsko

V okolí města Zoetemeer se zrodila myšlenka o použití RMC v roce 1989 a do roku 1995 jich bylo 9 implementováno. Nasazení proběhlo na dálnici A12 mezi městy Utrecht a Hague. Na této dálnici projelo více než 110 000 voz/den. Kongesce nastávaly poblíže Zoetemeeru z důvodu zúžení a vlnitosti terénu. Zhotovitelem se stal Dutch Ministry of Transport.

Na 11 km dlouhém úseku RMC zvýšilo kapacitu úzkého hrdla o 3 %. Další pozitivní dopady byly na rychlosti (zvýšení ze 46 na 53 km/h), o 13 % kratší cestovní doby. Zdržení na rampách činilo 20 sekund a celý systém měl pozitivní dopad na široké okolí.

### 1.6.2 Velká Británie

RMC ve Velké Británii zhotovil Department of Transport. V důsledku opakujících se kongescí na dálnici M6 byl systém RMC implementován a připojen k centrálnímu počítači pro monitorovací účely. Počáteční systém dávkoval vozidla maximálně po devíti. Výsledky studie vedla k rozšíření RMC do ostatních oblastí.

Po instalaci dále docházelo ke kongescím, ale stejně bylo dosaženo výhod. Kapacita úzkého hrdla vzrostla o 3,2 %. To mělo za následek úsporu 110 000 GBP za rok. Vzhledem k pořizovací ceně RMC 225 000 GBP a za předpokladu, že roční náklady na údržbu byly 10 000 GBP, se za první rok provozu vrátilo 40 % nákladů. Zdržení na přípojních rampách činilo průměrně 1,5 minuty prodloužení cestovních dob. Systém byl podpořen policií i motoristickými organizacemi a neshledal žádnou nežádoucí kritiku veřejnosti. RMC bylo méně účinné v zimních obdobích, kdy je rychlost vozidel nižší.

### **1.6.3 USA**

#### **Austin, Texas**

Zhotovitelem systému v této oblasti byl Department of Highways. V dané oblasti byl instalován na třech místech v severním směru komunikace I-35. Implementace proběhla z důvodu působení při ranní špičce. Problémem v této oblasti bylo zúžení hlavní komunikace a zároveň přípojovací rampa s vysokými intenzitami vozidel.

Výsledkem implementace daného systému došlo ke zvýšení propustnosti komunikace o 7,9 % a nárůstu rychlosti o 60 %. Později byl systém odstraněn z důvodu změny geometrie mimoúrovňových křižovatek.

#### **Houston, Texas**

Implementace v Houstonu na komunikaci I-10 Katy Freeway byla instalována v roce 1996 a ohodnocena v roce 1997 vzhledem k naměřeným parametrům. Zhotovitelem byl v tomto případě Texas Department of Transportation.

Výsledkem instalace byla denní úspora času 2 875 hodin v porovnání stejného nájezdu bez RMC. Cena stanovená za 1 hodinu času je 12,88 USD. Ve výsledku je tedy denní úspora 37 070 USD.

#### **Denver, Colorado**

Zhotovitelem Denverského systému byl Colorado Department of Highways. Proces implementace byl započat v sedmdesátých letech, kdy daný systém obsahoval pět RMC na komunikaci I-25 v severním směru. Tento systém následně expandoval do centralizovaného s doplněnými dalšími RMC.

Výsledkem prvotního projektu bylo zvýšení rychlosti o 58 %, cestovní doba se zkrátila o 37 %, snížení emisí o 24 % a snížení počtu nehod o 5 %. Dále došlo ve zmiňované oblasti k celkovému nárůstu intenzit o 100 až 400 voz/h. Pozdější posouzení ukázalo, že centrální koordinace je prospěšná pouze při kongescích a rychlostech nižších než 55 mph.

#### **Detroit, Michigan**

Systém RMC se zde stal důležitou částí informačního systému pro řidiče. Systém byl započat v roce 1982 s šesti RMC na východním směru I-94. Mnoho dalších přibylo později. Zhotovitelem RMC v Detroitu byl Michigan Department of Transportation.

V tomto případě došlo ke zvýšení rychlosti pouze o 8 %, ale oproti tomu se zvýšila intenzita z 5600 voz/h na 6400 voz/h. Celkový počet nehod se snížil o 50 % a počet zranění při nehodách klesl o 71 %. Hodnocení následně ukázalo, že další výhody by přinesla implementace RMC na přípojné komunikace k dané dálnici I-94.

### **Long Island, New York**

Na Long Islandu bylo instalováno šedesát RMC na východní části Long Island Expressway jako součást informačního systému pro motoristy INFORMS. Zhotovitelem aplikace byl New York Department of Transportation.

Po implementaci RMC klesly cestovní doby v hlavním směru o 22 až 26 minut a připojující se motoristé průměrně ušetřili 13 % cestovní doby. Průměrné rychlosti vzrostly z 29 mph na 35 mph. Při ranní špičce se počet detektorů oznamujících rychlost nižší než 30 mph snížil o 50 %. Průměrná délka fronty na odbavovací rampě byla v rozmezí od 1,2 do 3,4 vozidla. Při průzkumu veřejného mínění se 40 % respondentů domnívalo, že systém RMC nebyl dobrý nápad, na druhou stranu dalších 40 % respondentů pohlíželo na tento systém kladně.

### **Minneapolis, Minnesota**

Zhotovitelem zde byl Minnesota Department of Transportation. RMC byl implementován v sedmdesátých letech jako část Twin Cities Metropolitan Area Freeway Management System. První nasazení proběhlo na I-35 E a zahrnoval pár RMC řízených pevným časem. Později byl systém upgradován na izolované dopravně závislé řízení. V roce 1974 přišla další implementace na I-35 W zahrnující 39 RMC, některé doplněny o pruhy pro více obsazená vozidla a videodetekci.

Po deseti letech došlo k vyhodnocení systému. Výsledky přinesly zvýšení rychlostí ve špičkových hodinách z 34 na 46 mph, zvýšení propustnosti o 32 %, snížení dopravních nehod o 38 %.

### **Portland, Oregon**

V roce 1981 byly instalovány RMC na komunikaci I-5 v severojižní trase. Celkem 16 systémů řízených pevným časovým cyklem zhotovil Oregon Department of Transportation.

Aplikací RMC byla zvýšena rychlost z 16 na 41 mph v severním směru a v jižním ze 40 na 43 mph. Vlivem toho došlo k úspoře paliva 540 galonů za týden. Snížení nastalo u bočních a srážek a střetů zezadu. Celkové snížení nehod o 43 % ve špičkových hodinách.

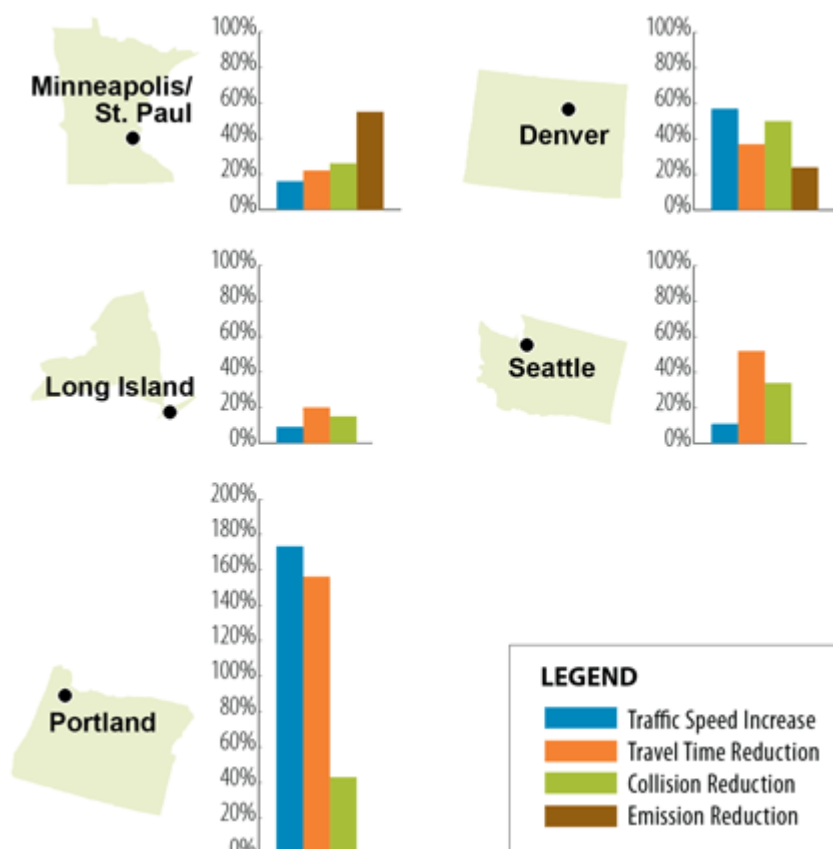
### Seattle, Washington

Roku 1981 Washington Department of Transportation nasadil RMC severně od Seattlu na I-5. Po dobu šesti let, bylo testováno 17 systémů v jižním směru a 5 v severním na zhruba 7 mil dlouhém koridoru.

Během testování se snížila cestovní doba z 22 na 11,5 minuty, přičemž intenzita v severním směru vzrostla o 86 % a v jižním o 62 %. Počet dopravních nehod se snížil o 39 % a zdržení na přípojných rampách nepřekročilo 3 minuty.

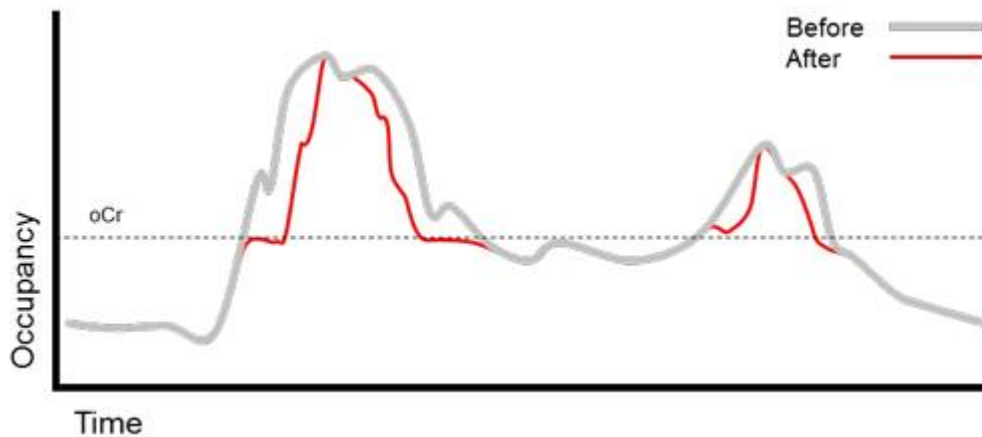
### Zhodnocení projektů

Implementací RMC došlo k dlouhodobě příznivému dopadu na okolí. Tyto benefity velmi závisí na úrovni a typu kongescí. Jedná se o jednu z nákladově nejefektivnějších metod řízení liniových komunikací. Jednotlivé dopady použitím RMC jsou zobrazeny na Obr. 9.



Obr. 9: Lokální výsledky implementace RMC v USA [8]

Dále je pak na Obr. 10 zobrazen průběh obsazenosti v čase na komunikaci s RMC a bez něj. Z tohoto průběhu je patrné, že v některých situacích obsazenost klesá, tím pádem roste rychlost vozidel.



Obr. 10: Průběh obsazenosti před a po aplikaci RMC [8]

#### 1.6.4 Výhody a nevýhody

Zde došlo k porovnání nákladů na vybudování a provoz RMC a stav bez tohoto systému. Zavedením RMC naměřené přínosy převáží náklady spojené s touto aplikací v poměru 15:1, jak ukázala implementace z USA. Tento poměr je vynikající pro zlepšení dopravy.



## 2 Algoritmy pro řízení na vjezdu [4]

Pro správnou funkci systému se využívá poměrně složitých algoritmů, které zahrnují i predikci stavu dopravy před přípojovacím pruhem. Z toho důvodu se předpokládá před uvedením systému do trvalého provozu zkušební provoz pro optimalizaci řízení.

Základní pravidla pro řízení:

- Doba červeného signálu je určena aktuálním stavem dopravy na hlavní trase a na přivaděči s přihlédnutím ke krátkodobé predikci tohoto stavu;
- Minimální doba zeleného signálu je daná základním požadavkem dávkování vozidel na přípojovací pruh. Neřídí se normativními požadavky;
- Pokud je vyhodnocen vjezd jako bezproblémový, vydává řadič na vjezdu přerušovaný žlutý signál.

### 2.1 Akční zásahy

Akční zásahy systému RMC jsou zprostředkovány pouze návěstidlem (návěstidly). Počet vypuštěných vozidel (metering rate) je dán dopravní situací na hlavní komunikaci. Tento počet vozidel je dosahován volbou vhodné délky cyklu (bývá předdefinováno cca 5 délek cyklu). Pokud stav dopravního proudu je podsaturovaný, počet vpuštěných vozidel během jednoho cyklu je tak velký, jak velký je rozdíl aktuálního stavu od stavu saturace. Pokud je dopravní proud za mezí saturace (v kongesci), na hlavní komunikaci je vpuštěné pouze nezbytné minimum vozidel.

### 2.2 Řídicí přístupy [8]

V závislosti na stávající infrastruktuře, omezeních a cílech RMC může zhotovitel vybírat z několika různých přístupů řízení. V Tab. 5 jsou uvedeny jednotlivé přístupy řízení včetně vhodných situací pro implementaci. Sloupce značí, zda se jedná o řešení s pevným časovým plánem, který nevyužívá detekce vozidel, nebo systém závislý na dopravě, který využívá detekci vozidel a na základě ní upravuje řízení. V řádcích je uvedeno dělení na rozsáhlé systémy zahrnující např. celou městskou část nebo systémy lokální, které řídí jeden nebo malý počet vjezdů na dálnici. Následuje přehled z běžně používaných řídicích přístupů RMC.

**RMC s jedním jízdním pruhem** na rampě umožňuje vstupu pouze jednoho vozidla na dálnici během každého cyklu.

**RMC s více jízdními pruhy na rampě** využívá přiřazení signálu pro každý pruh zvlášť. Těchto více pruhů je nutné sloučit za STOP čarou do jednoho, který bude následně vstupovat na dálnici.

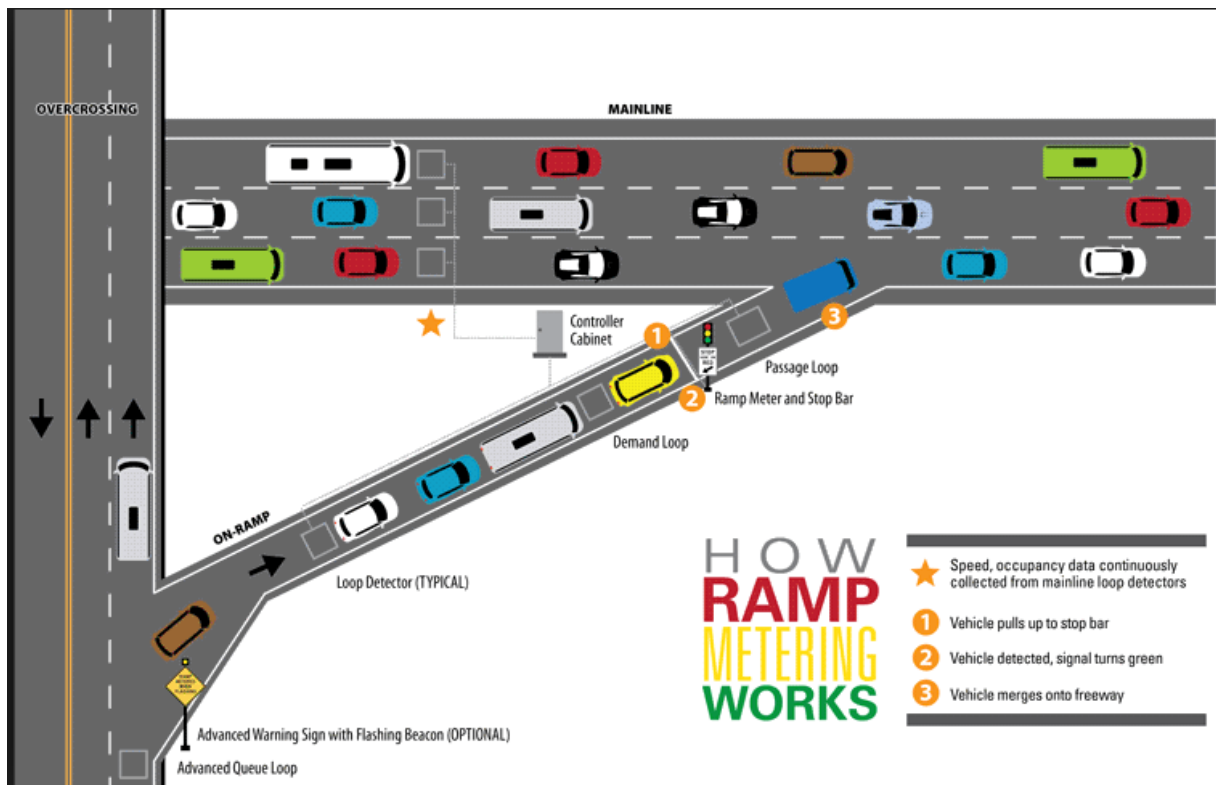
**Jednotlivé vypouštění vozidel** operuje s kratší dobou signálu volno, než při vypouštění dvou vozidel najednou.

**Duální vypouštění vozidel** využívá delších signálů volno a umožňuje vstoupit dvěma vozidlům na dálnici.

**Bypass** zabraňuje specifickým vozidlům (s vysokou obsazeností, autobusy, atd.) v získávání zpoždění na RMC a mohou přímo vjíždět na dálnici. V této konfiguraci by mohl systém využívat pouze jednu smyčku, pro řízení délky cyklu pokaždé, když je detekováno vozidlo.

Tab. 5: Shrnutí RMC přístupů [8]

RMC	S pevným časovým cyklem	Dopravně závislé
Lokální	Vhodné pro lokalizované problémy	Vhodné pro lokalizované problémy
	Nevyžaduje detekci	Vyžaduje detekci
	Vyžaduje pravidelné ruční aktualizace	Vyšší náklady oproti pevnému cyklu
	Neefektivní za nestatických podmínek	Větší výhody a výnosy dané reakcí na aktuální stav
	Vyšší provozní náklady v porovnání s odezvou dopravních systémů	
Rozsáhlé	Vhodné pro rozsáhlé problémy	Vhodné pro rozsáhlé problémy
	Nevyžaduje detekci	Vyžaduje detekci
	Pro rozsáhlé systémy se málo využívají dopravně závislé	Nejužitečnější pro koridory a rozsáhlé systémy
		Nejvyšší náklady, ale přináší nejvíce výhod

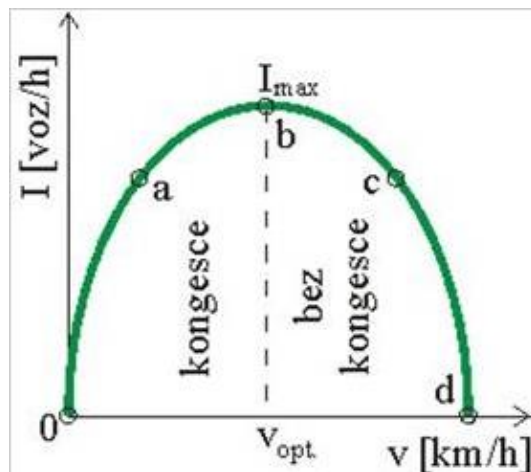


Obr. 11: Princip řešení [8]

### 2.2.1 Modely dopravy

Na základě modelů dopravy z naměřených dat lze určit, v jakém stavu se dopravní proud nachází a díky tomu může systém vhodně zakročit. Například pokud by se dopravní proud nacházel v saturovaném toku a dále se zahušťoval, reakce řízení by byla taková, že by se snížil počet vozidel, která by byla vpuštěna na hlavní komunikaci z přípojné rampy.

Základem činnosti systému je zpracování a vyhodnocení naměřených dat. Je potřeba vzít v potaz velké objemy dat, které je zapotřebí vyhodnotit a spočítat z nich dvou nebo vícedimenzionální model. Dvoudimenzionální model je založen na hodnotách intenzity a rychlosti k nahlédnutí na Obr. 12. S pomocí tohoto modelu je možné dále klasifikovat dopravní proud a vyhledávat nestability. Řídící algoritmy musí rovněž umět v určitých mezích doplnit chybějící data. Tato ztráta dat může být způsobena poruchou nebo rušením. [2]



Obr. 12 : Dvoudimenzionální model [16]

## 2.3 Příklady algoritmů

### 2.3.1 Algoritmus požadované kapacity [14]

Algoritmus požadované kapacity byl navržen v roce 1975 panem Masherem. Algoritmus spočívá v měření obsazenosti po proudu od připojení rampy. Pokud naměřená hodnota překročí kritickou hodnotu, může dojít k tvorbě kongescí. Proto se nastaví metering rate na minimum. Kritická obsazenost je maximální obsazenost očekávaná na daném úseku komunikace. Pokud je obsazenost měřená po proudu od spojení menší než kritická hodnota, měří se intenzita proti proudu od spojení a metering rate je nastaven na rozdíl mezi intenzitou před spojením a za spojením. Metering rate je definován jako počet vozidel, která mohou být vypuštěna z rampy během jednoho cyklu. Následující vztahy popisují tento algoritmus:

$$\begin{aligned}
 & \text{if } (O_o \leq O_c) \text{ then } (R = \max(q_{cap} - q_{in} \cdot R_{min})) \\
 & \text{if } (O_o > O_c) \text{ then } (R = R_{min})
 \end{aligned} \tag{1}$$

$O_o$  – naměřená obsazenost po proudu

$O_c$  – kritická obsazenost

$R$  – metering rate

$q_{cap}$  – rozdíl mezi naměřenou hodnotou po a proti proudu

$q_{in}$  – naměřená intenzita proti proudu

$R_{min}$  – minimální metering rate

Jedná se o dopředný algoritmus, který nemá nezávislost na předchozím stavu. Tento algoritmus byl překonán vložением zpětné vazby a vznikem algoritmu ALINEA, který je popsán v kapitole 2.3.2.

### 2.3.2 Zpětnovazební RMC [15]

Řízení pomocí zpětné vazby, kde jsou využity informace v reálném čase ve výpočtu každé fáze měření, mají příznivý vliv na dopravní proud. Tyto algoritmy jsou tedy lepší alternativou algoritmů dopředných.

Řídicí strategie ALINEA navržená Papageoriou v roce 1991 se ukázala jako jednoduché, vysoce efektivní a jednoduše implementovatelné řešení na základě výsledků jednotlivých aplikací v Evropě (Paříž, Amsterdam) [17]. Oproti ostatním algoritmům ALINEA výrazně snižuje zdržení vozidel na přípojných rampách. Tento algoritmus maximalizuje propustnost hlavního proudu udržováním obsazenosti za přípojnou rampou.

$$r(k) = r(k - 1) + K_R \cdot (\hat{o} - o_{out}(k)) \quad (2)$$

$r(k)$  – metering rate během intervalu  $k$  ve voz/h

$r(k - 1)$  – metering rate během předchozího intervalu  $k - 1$  ve voz/h

$\hat{o}$  – kritická obsazenost v %

$o_{out}(k)$  – naměřená obsazenost detektoru po proudu v intervalu  $k$  v %

$K_R$  – regulační parametr

Výše uvedená rovnice udává, že pokud obsazenost po proudu v aktuálním intervalu překročí kritickou hodnotu, ALINEA sníží dobu signálu volno. Doba signálu volno se stanoví dle následující rovnice:

$$g(k) = g(k - 1) + K_R \cdot \frac{C}{r_{sat}} \cdot (\hat{o} - o_{out}(k)), \quad g_{min} \leq g \leq g_{max} \quad (3)$$

$g(k)$  – zelená fáze během intervalu  $k$  v sekundách

$g(k - 1)$  – zelená fáze během intervalu  $k - 1$  v sekundách

$C$  – doba cyklu v sekundách

$r_{sat}$  – intenzita v saturaci na rampě ve voz/h

$g_{min}$  – minimální délka zelené v sekundách ( $g_{min} > 0$ )

$g_{max}$  – maximální délka zelené v sekundách ( $g_{max} < C$ )

Chu a Yang v roce 2003 identifikovali 4 parametry, které je třeba kalibrovat pro implementaci algoritmu ALINEA. Parametry jsou uvedeny v následujících bodech:

- Požadovaná obsazenost detektoru po proudu;
- Vzdálenost mezi tímto detektorem a spojením rampy s hlavní komunikací;
- Doba cyklu;

- Regulační parametr.

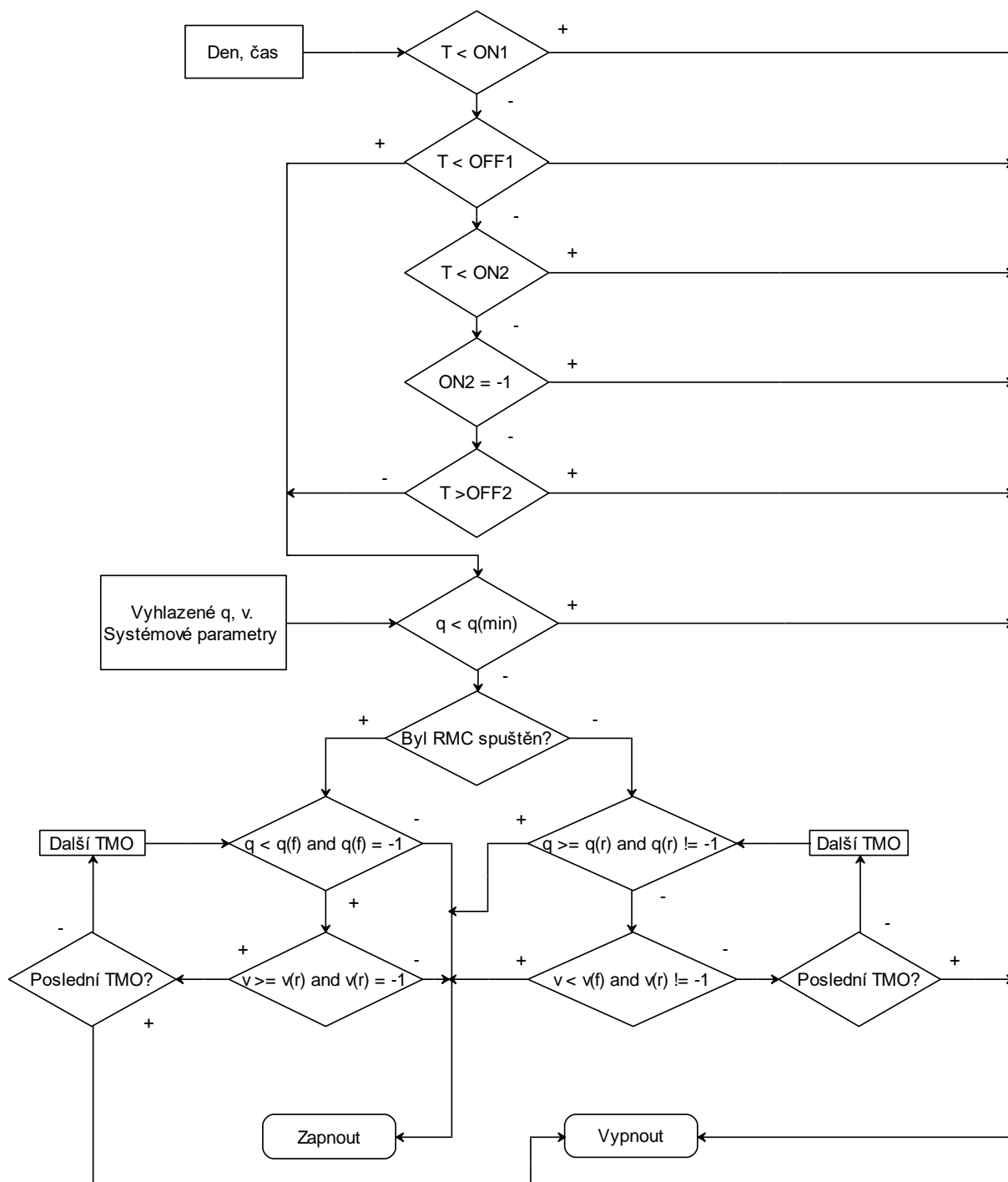
Předchozí hodnoty stanovené Papageogiou byly následující:

- Kritická obsazenost v rozsahu 18 ÷ 31 %;
- Optimální hodnota regulačního parametru 70;
- Doba cyklu 30 s až 5 minut v závislosti na vzdálenosti detektoru po proudu;
- Vzdálenost detektoru po proudu 45 ÷ 610 m.

Chu a Yang použili genetické algoritmy pro nalezení optimálních hodnot pro tyto parametry.

Výsledkem jejich práce jsou následující hodnoty:

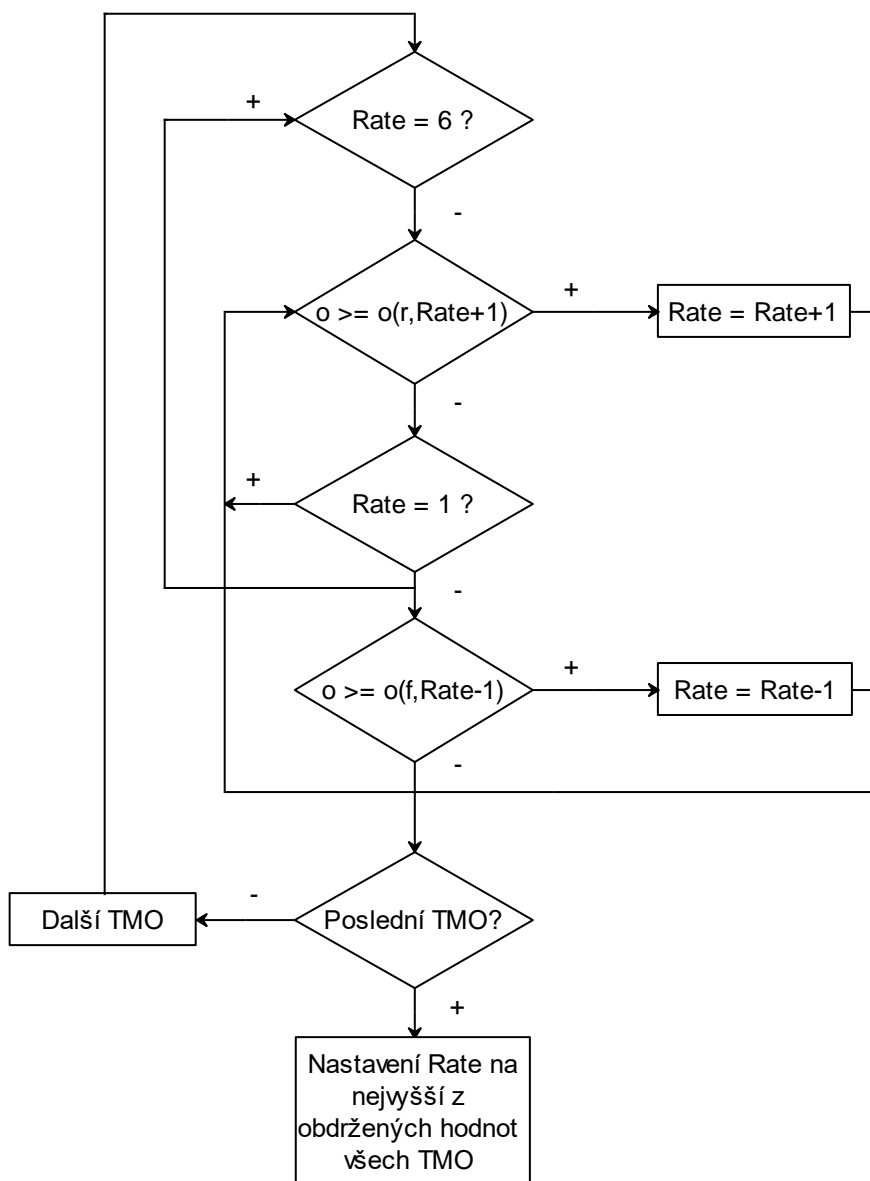
- Kritická obsazenost v rozsahu 19 ÷ 21 %, 30 ÷ 31 %;
- Optimální hodnota regulačního parametru 70 ÷ 200;
- Doba cyklu 30 ÷ 60 s;
- Vzdálenost detektoru po proudu 120 ÷ 140 m.



Obr. 13: Algoritmus zapínání a vypínání RMC [17]

Na Obr. 13 je zobrazen vývojový diagram algoritmu, který rozhoduje, zda bude systém RMC zapnut nebo vypnut. Na úplném začátku vstupuje do systému informace o dni a času. Pokud je čas menší než čas zapnutí nebo větší než čas vypnutí, bude systém vypnut. Pokud se ovšem aktuální čas nachází v intervalu od času zapnutí do času vypnutí, dále rozhoduje podmínka, zda byla překročena minimální prahová hodnota intenzity. Do této podmínky vstupují vyhlazená data z detektorů. Pokud prahová hodnota nebyla překročena, systém bude

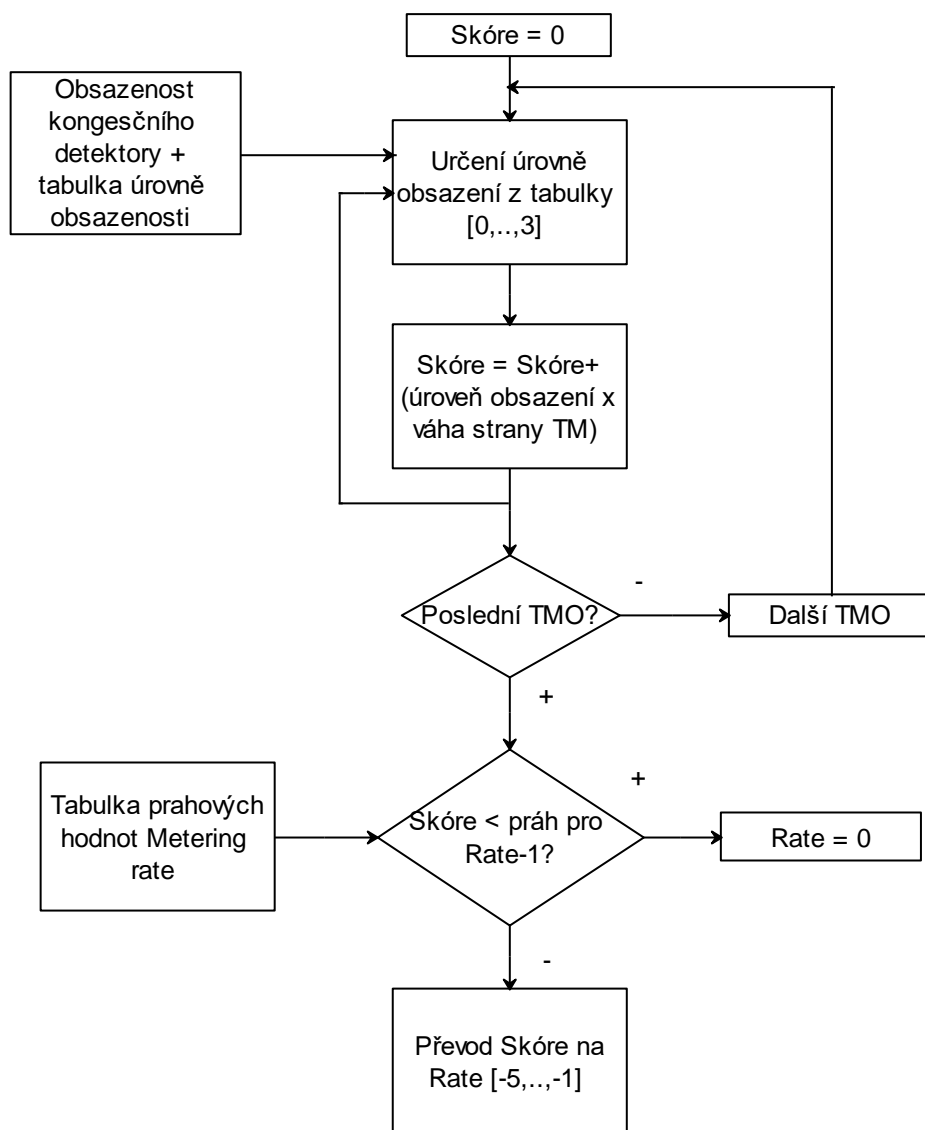
opět vypnut. Překročila-li naměřená intenzita prahovou hranici, záleží na tom, zda byl v předchozím stavu systém RMC zapnut nebo ne. RMC je vypnut, když intenzita klesne pod kritickou hranici a rychlost vzroste přes kritickou hranici.



Obr. 14: Algoritmus volby délky cyklu RMC [17]

Délka cyklu se počítá každou minutu a je založena na obsazenosti detektoru po proudu. V systému bývá předdefinováno 5 délek cyklu. Každá délka cyklu obsahuje horní a spodní hranici obsazenosti, pro kterou je tato doba cyklu určena. Pokud vzroste obsazenost nad horní hranici obsazenosti, pro kterou je tato doba cyklu určena, je vybrána nejbližší vyšší doba cyklu. Pokud obsazenost klesne pod spodní mez, je vybrána nejbližší nižší doba cyklu. Celý algoritmus je popsán vývojovým diagramem na Obr. 14.





Obr. 15: Algoritmus řízení fronty RMC [17]

Algoritmus řízení fronty slouží k prevenci vzniku fronty na rampě. Obsazenost je měřena na každém kongesčním detektoru na rampách. Dále je mu přiřazena váha pro výpočet skóre. V závislosti na skóre a nastavených prahových hodnotách může být délka cyklu navýšena až o tři úrovně. Tento algoritmus je zachycen vývojovým diagramem na Obr. 15.

### 3 Návrh aplikace řízení na vjezdu

Pro návrh aplikace systému RMC byl vybrán konkrétní úsek dálnice v jednom směru s připojením vedlejší komunikace.

#### 3.1 Vybraný úsek komunikace

Zvolený úsek je vyznačen na následujícím Obr. 16 a Obr. 17. Nachází se západně od Prahy na dálnici D7, Exit 7 u měst Kladna a Buštěhradu. Konkrétně se jedná o mimoúrovňové křížení se silnicí I. třídy I/61. Pro návrh systému RMC byl vybrán pouze směr na Prahu. Úsek komunikace byl vybrán z důvodu vzniku kongescí především během ranní špičky. Následkem jsou pak riskantní manévry vozidel, která se na dálnici chtějí připojit ze silnice I/61. Vybrané mimoúrovňové křížení je vhodné pro implementaci systému RMC jelikož se vedlejší komunikace připojuje na komunikaci liniovou.

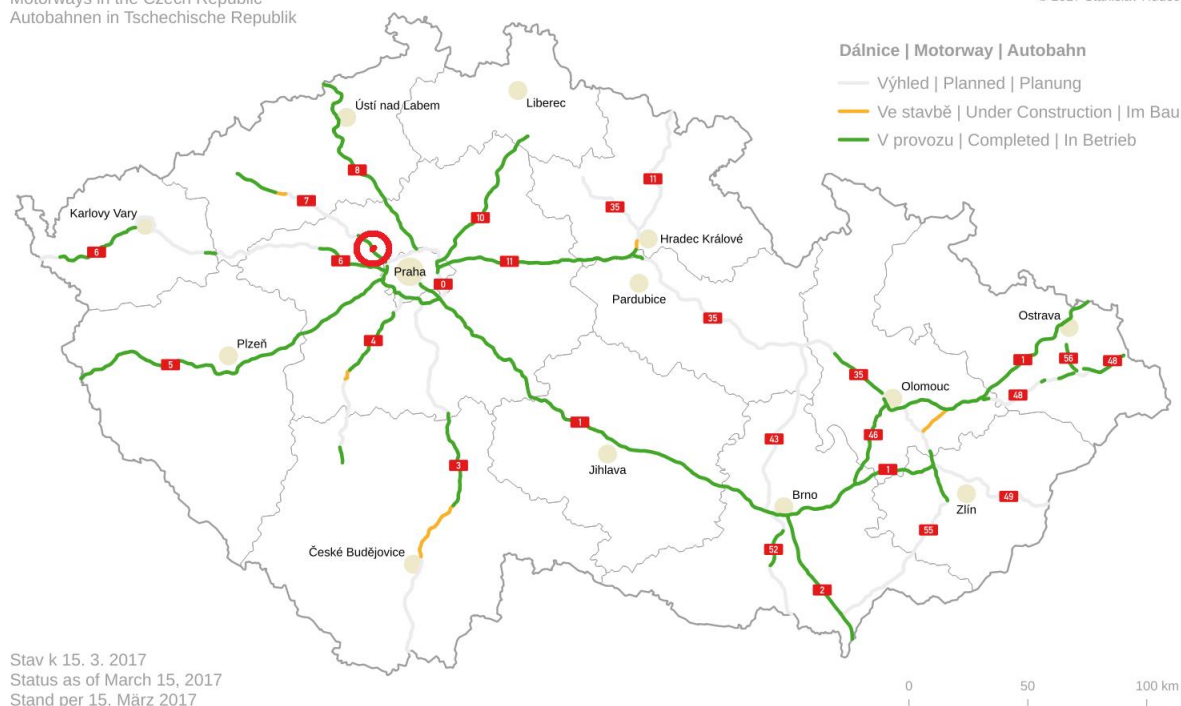
Roční průměr denních intenzit (RPDI) byl na D7 38 688 voz/den a na I/61 10 465 voz/den v roce 2010. Pro návrh však byla použita 50-tá rázová intenzita, která je pro D7 3714 voz/h a pro I/61 1057 voz/h. Všechny hodnoty intenzit jsou udávány pro oba směry. [9]

#### Dálnice v České republice

Motorways in the Czech Republic  
Autobahnen in Tschechische Republik

 **ceskedalnice.cz**

© 2017 Stanislav Hudec

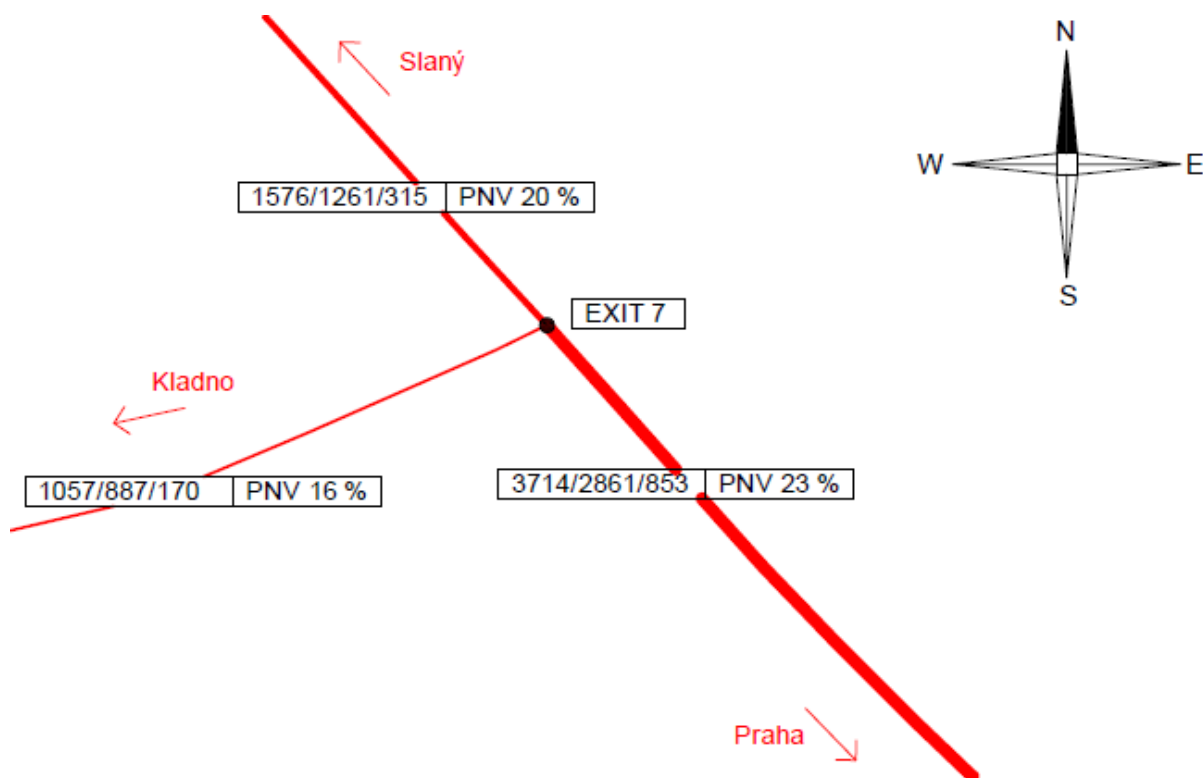


Obr. 16: Označení zvoleného úseku [18]



Obr. 17: Situace [19]

Na základě nasbíraných dat byla vytvořena mapa intenzit zobrazená na Obr. 18. Uvedené hodnoty jsou uvedeny ve formátu počet vozidel celkem/osobní vozidla/nákladní vozidla. Všechny uvedené hodnoty jsou v jednotce voz/h pro oba směry. Zkratka PNV označuje podíl nákladních vozidel. Na následujícím schématu jsou uvedeny hodnoty 50-té rázové hodinové intenzity. K vytvoření mapy intenzit sloužila data z celostátního sčítání dopavy ŘSD v roce 2010.



Obr. 18: Mapa intenzit [9]

## 3.2 Architektura

Navržená architektura vychází z architektury zmíněné v kapitole 1.1.1.

### 3.2.1 Uživatelské potřeby

Uživateli tohoto systému jsou řidiči vozidel na dálnici i připojující se vedlejší komunikace ve směru do Prahy. Dále pak správce komunikace, složky IZS a správce systému RMC. Řidiči vozidel mají potřebu daný úsek projet plynule. Vyšší prioritu v plynulém průjezdu mají řidiči na dálnici před řidiči vedlejší komunikace, kteří v důsledku na plynulost dálnice mohou být zpomalení. Správce komunikace i správce systému RMC chtějí především co nejmenší počet kongescí či nehod, to je dosaženo zvýšením plynulosti dopravy. Pokud složky IZS mají potřebu projet daný úsek v hlavním směru, je možné přípojně rameno z vedlejší komunikace na potřebný čas zastavit.

### 3.2.2 Funkce

Systém RMC obsahuje 3 funkce. První funkcí je určení na základě měření, v jaký okamžik je vhodné systém aktivovat a kdy ho ponechat vypnutý. Druhá z nich je funkce vhodného dávkování vozidel z přípojně rampe do hlavního proudu. Tato funkce je prováděna pomocí dílčích podfunkcí a to nastavení vhodné délky cyklu, délkou doby volna během tohoto cyklu

a řízení délky fronty na rampě. Další funkcí je sběr dopravních dat a předávání ke zpracování. Volitelně je možné doplnit funkci kontroly jízdy na červenou.

### 3.2.3 Funkční architektura

Navržená funkční architektura je shodná s architekturou v kapitole 1.1.1.1.



Obr. 19: Navržená funkční architektura RMC

### 3.2.4 Informační architektura

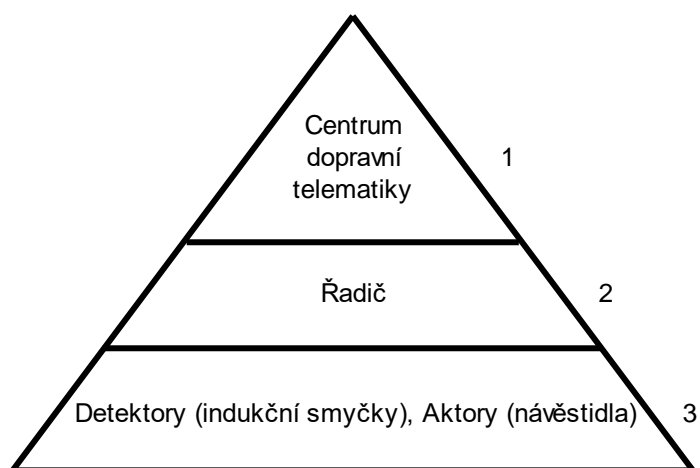
Navržená informační architektura vychází z architektury v kapitole 1.1.1.2. Druh informací, které jsou předávány mezi jednotlivými vrstvami, je sepsán v následující tabulce Tab. 6.

Tab. 6: Navržená informační architektura RMC

Vrstva	Informace
3 – 2	Obsazenost, intenzita
2 – 3	Akční veličiny (rozsvícení návěstí)
2 – 1	Strategické informace o dopravním proudu
1 – 2	Akční veličiny strategického a krizového řízení
1 – NDIC	Informace o stavu dopravy

### 3.2.5 Fyzická architektura

Navržená fyzická architektura vychází z architektury v kapitole 1.1.1.3.



Obr. 20: Navržená fyzická architektura RMC

### 3.2.6 Komunikační architektura

Komunikační architektura obsahuje propojení prvků fyzické architektury i propojení v rámci jedné vrstvy. Detektory a aktory zahrnuté ve vrstvě 3 budou propojeny s řadičem metalickým vedením, jelikož jejich vzájemná vzdálenost není příliš vysoká. Řadič bude dále komunikovat s centrem dopravní telematiky po optickém vedení, a to z důvodu velké vzdálenosti i množství přenášených dat.

### 3.2.7 Schéma a detailní popis vybraného úseku a instalovaného systému

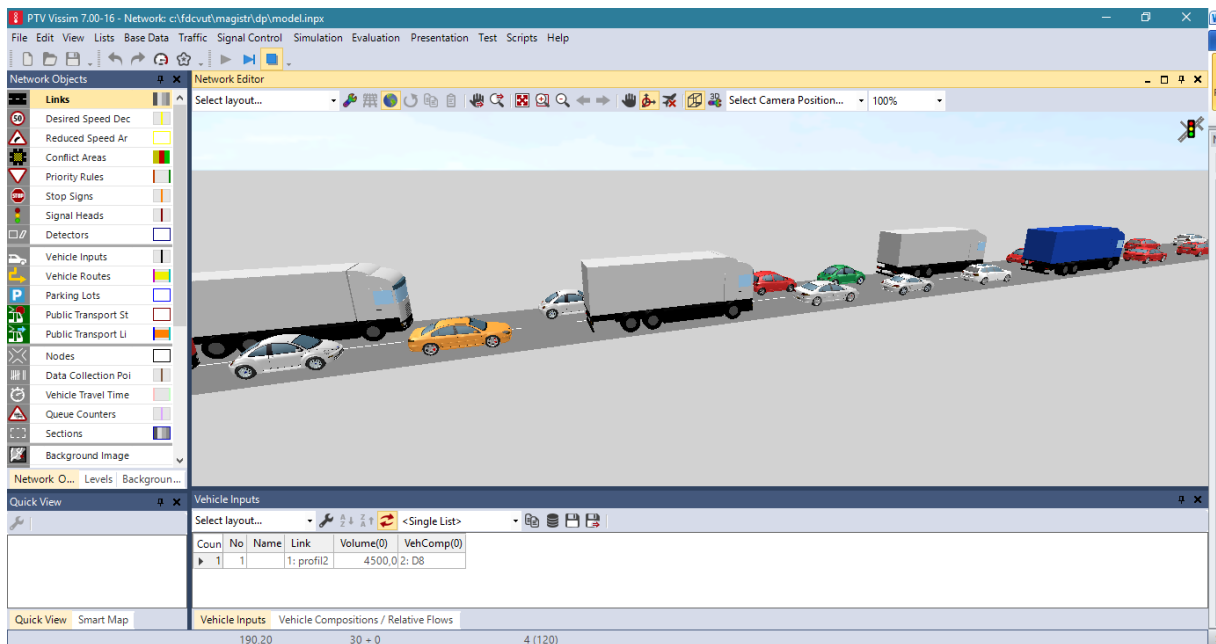
Pro možnost implementace systému RMC je nutné provést změny v dopravním značení dané lokality a doplnit prvky potřebné pro řízení. Pro možnost řízení je potřebné snížit maximální dovolenou rychlost na přivaděči na 50 km/h. Jelikož maximální dovolená rychlost v předchozím úseku je 90 km/h je nezbytné umístění dvou dopravních značek B20a (Nejvyšší dovolená rychlost) s omezením nejprve na 70 km/h a dále pak na 50 km/h. Za nimi následuje doplnění výstražné značky A10 (Světelné signály) s dodatkovou tabulkou s textem: „ŘÍZENÍ NA VJEZDU“. Před úsekem je doplněna informativní směrová značka IS09a (Návěst před křižovatkou) o text „ŘÍZENÍ NA VJEZDU“ v daném směru. Zbytek dopravního značení byl ponechán stávající. Pro možnost řízení je nezbytná implementace detektorů, návěstidel a řadiče RMC. Návěstidla jsou umístěna po obou stranách přivaděče u stop čáry a jsou označena V1 a V2. Řadič by měl být situován co nejbližší k návěstidlům. Dále jsou využity 4 detektory (indukční smyčky) označené na schématu jako DV1 až DV4. Detektory DV1 a DV2 slouží k detekci fronty na přivaděči. Následující dva detektory DV3 a DV4 slouží ke sběru dopravních dat v hlavním směru (dálnice D7) a jsou umístěny 1000 m před bodem

spojení hlavní a vedlejší komunikace. Indukční smyčky jsou zvoleny z důvodu vyšší spolehlivosti oproti videodetekci. Schéma situace je zobrazeno v příloze A.1.

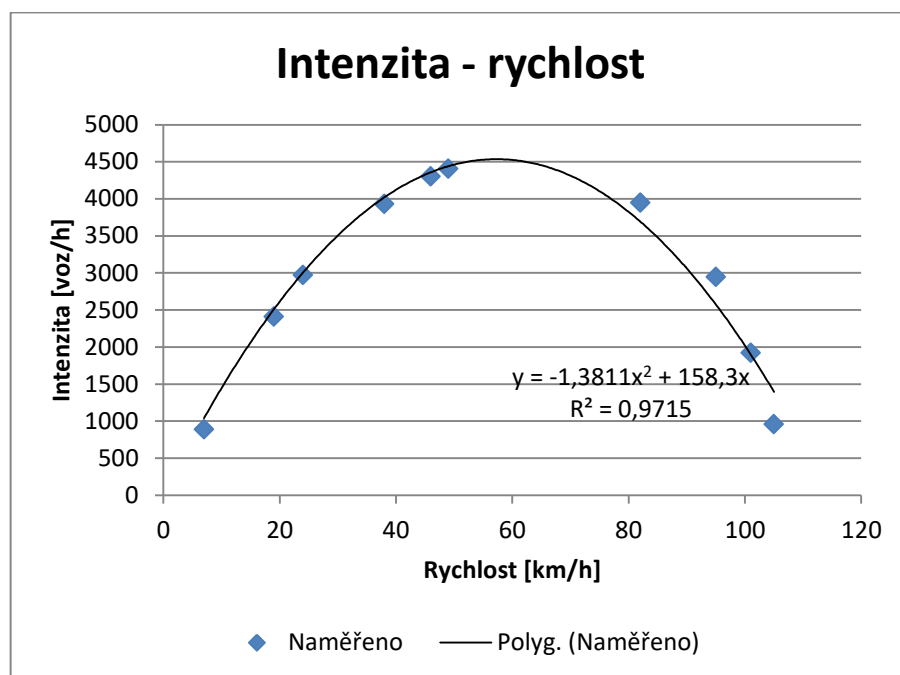
### **3.3 Model dopravy**

Pro řízení je nezbytné sestavit modely dopravy. To lze provést jednak z naměřených dat nebo simulací daného úseku. V tomto případě byla zvolena metoda simulace, jelikož měření by se muselo provádět na několika různých profilech po dlouhou dobu, aby nastaly všechny situace z pohledu stupňů dopravy. Simulace byly provedeny pro hlavní dopravní proud na dálnici. Vytvořený model dopravy je shodný pro úsek před křížením i za ním. Simulace probíhala v softwarovém prostředí PTV VISSIM 7. Během simulace bylo nutné naměřit hodnoty intenzity a rychlosti pro vytvoření dvoudimenzionálního modelu dopravy a to pro všechny stupně dopravy. Toho bylo dosaženo tím, že se nejprve zvyšovala intenzita na vstupu komunikace až do oblasti saturace. Po dosažení saturace je nemožné na vstupu komunikace na ni vpustit více vozidel, proto je nutné na konci komunikace vytvořit kongesci. V tomto případě bylo kongesce docíleno postupným snižováním maximální dovolené rychlosti na konci úseku, tím se začal dopravní proud zahušťovat. Náhled simulace je zobrazen na Obr. 21.

Výstupem simulace je rychlost jednotlivých vozidel, intenzita a obsazenost. Data ze simulací byla zpracována do dvoudimenzionálního modelu dopravy rychlost – intenzita a obsazenost – intenzita. Dále byly naměřené hodnoty proloženy křivkou pomocí funkce nástroje MS Excel. Zjištěním rovnice křivky byly dále dopočítány potřebné hodnoty.



Obr. 21: Simulace dat pro modely dopravy v prostředí PTV VISSIM 7



Obr. 22: Model dopravy intenzita - rychlost

Na Obr. 22 je zobrazen model dopravy intenzita - rychlost pro 110 km/h (maximální dovolená rychlost ve zvoleném úseku) a 2 jízdní pruhy s proloženými daty křivkou druhého řádu a zobrazenou rovnicí. Z uvedeného modelu druhého řádu je patrné, že se jedná o parabolický model typu Greenshields.

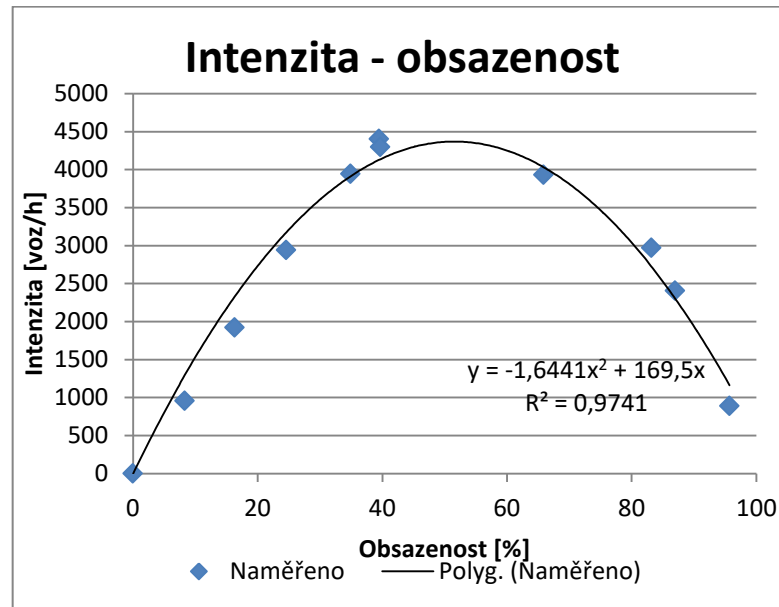
Grafy i rovnice modelu jsou uvedeny v příloze B.1. Proložením modelů křivkou získáme následně polynom popisující model. Polynom je ve tvaru:



$$q = a * v^2 + b * v. \quad (4)$$

Rovnice po dosazení konkrétních hodnot koeficientů uvedeného modelu:

$$q = -1,3811 * v^2 + 158,3 * v. \quad (5)$$



Obr. 23: Model dopravy intenzita – obsazenost

Na Obr. 23 je znázorněn model dopravy intenzita – obsazenost pro úsek se stejnými parametry jako výše uvedený model intenzita rychlost. Tento model je vhodné zobrazit s ohledem na následující návrh řízení. V grafu je rovněž zobrazena rovnice křivky prokládající naměřená data:

$$q = a * o^2 + b * o. \quad (6)$$

Rovnice po dosazení konkrétních hodnot koeficientů uvedeného modelu:

$$q = -1,6441 * o^2 + 169,5 * o. \quad (7)$$

### 3.4 Principy řízení

Navržené řízení se zakládá na měření intenzity a obsazenosti v hlavním směru před připojením vedlejší komunikace. Prahové hodnoty pro spuštění systému RMC byly stanoveny na 15 % obsazenosti pro spuštění a 50 % obsazenosti pro vypnutí. Tím pádem systém RMC pracuje pouze tehdy, je-li naměřená obsazenost větší než 15 % a zároveň menší než 50 %. Pokud se obsazenost nachází v uvedeném intervalu, dále dojde k volbě signálního plánu dle naměřených intenzit na dálnici. Hodnoty pro volbu daného signálního plánu jsou uvedeny

v Tab. 7, kde je intenzita na dálnici označena jako  $q_{D7}$  a označení signálního plánu uvádí počet vozidel vpuštěných na dálnici během jednoho cyklu daného signálního plánu. Ve sloupci  $q_{61}$  je uveden počet vozidel, který by se při daném signálním plánu mohla připojit z vedlejší komunikace na dálnici. Dále jsou použity dva detektory pro detekci fronty na přivaděči. Těmito detektory lze dvoufázově řídit frontu, která by mohla potenciálně vzniknout, aby nezasáhla přilehlou komunikaci.

Tab. 7: Pravidla řízení

		$q_{D7}$	$o_{D7}$
$q_{61}$	Signální plán	ON	ON
1800	SP_15	2500	17,83
1680	SP_14	2620	18,93
1560	SP_13	2740	20,07
1440	SP_12	2860	21,26
1320	SP_11	2980	22,49
1200	SP_10	3100	23,77
1080	SP_9	3220	25,12
960	SP_8	3340	26,53
840	SP_7	3460	28,04
720	SP_6	3580	29,65
600	SP_5	3700	31,38
480	SP_4	3820	33,28
360	SP_3	3940	35,40
240	SP_2	4060	37,85
120	SP_1	4180	40,83
0	SP_0	4300	45,08

Na Obr. 24 je zobrazen signální program, který byl vytvořen pro řízení vjezdu na dálnici. V prvním sloupci je uvedena hodinová intenzita vozidel při daném signálním plánu. Ve druhém sloupci je také uvedena intenzita vozidel, ale za dobu jednoho cyklu, tedy za 30 s. Dále jsou zobrazeny pouze návěsti, které budou rozsvíceny v daných sekundách cyklu. Tento signální plán byl navržen pro maximální rovnoměrnost vypouštění vozidel během doby cyklu.

		Sekunda cyklu																																		
voz/h		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30					
1800	15																																			
1680	14																																			
1560	13																																			
1440	12																																			
1320	11																																			
1200	10																																			
1080	9																																			
960	8																																			
840	7																																			
720	6																																			
600	5																																			
480	4																																			
360	3																																			
240	2																																			
120	1																																			
0	0																																			

Obr. 24: Signální plán

### 3.5 Algoritmy řízení a ovládání

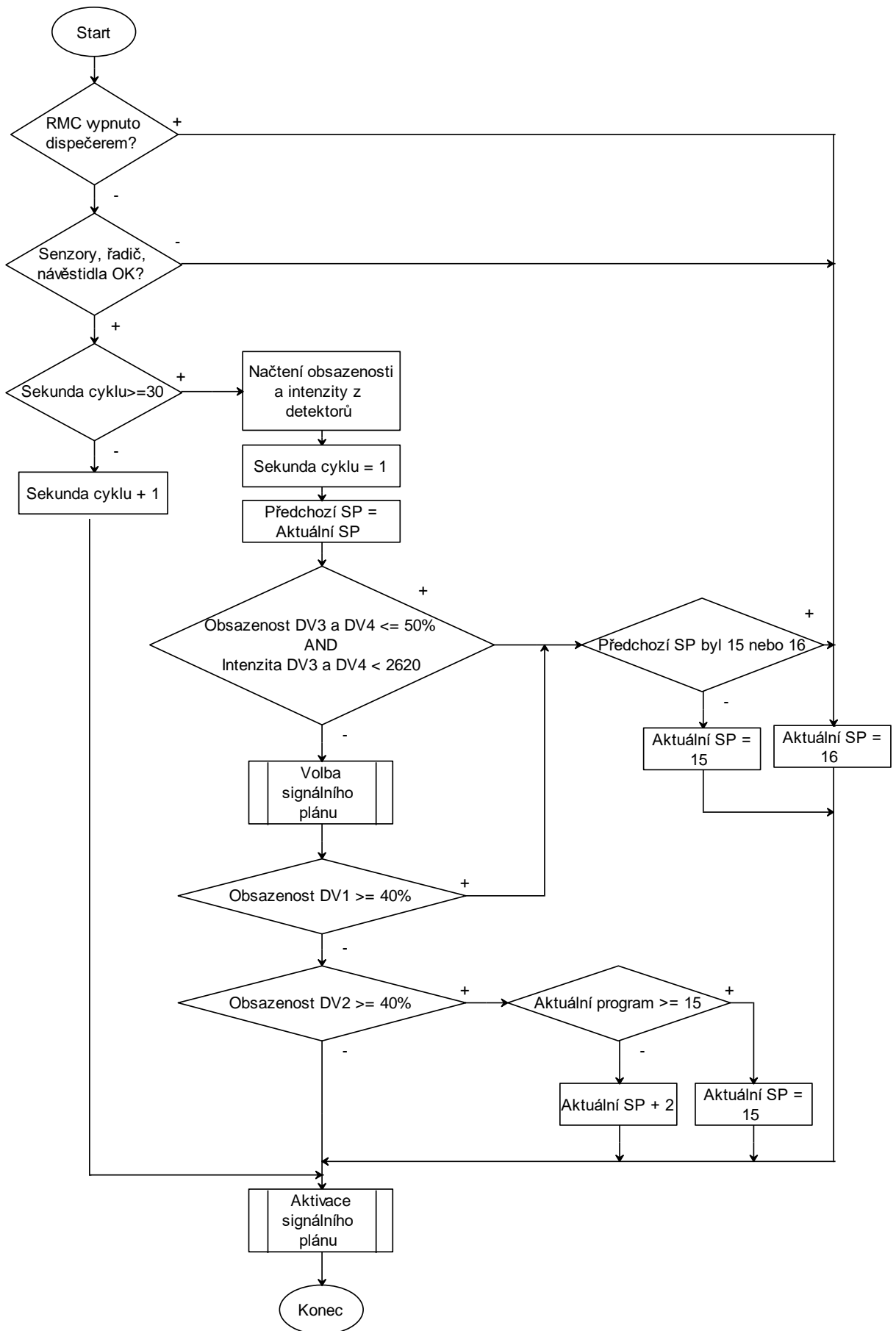
Algoritmus řízení se skládá z několika dílčích algoritmů. Mezi dílčí algoritmy patří: algoritmus zapnutí a vypnutí řízení, algoritmus volby signálního plánu, algoritmus aktivace signálního plánu a algoritmus signálního plánu. Všechny dílčí algoritmy jsou potřebné pro správnou funkci řízení a dále budou podrobně rozepsány. Jak je patrné z Obr. 24, navržený systém neobsahuje při přechodech ze signálu volno (zelená) do signálu stůj (červená) a naopak přechodový žlutočervený a žlutý signál, a to z důvodu přesnosti dávkování vozidel. V systému je využita pouze blikavá žlutá pro signalizaci vypnutého systému.

#### 3.5.1 Algoritmus zapnutí a vypnutí řízení

Algoritmus zapnutí a vypnutí řízení je zobrazen na Obr. 25. Pokud je RMC vypnuto dispečerem z řídicí ústředny nebo dojde poruše na některém z prvků systému (detektory, radič, návěstidla), systém přejde rovnou do stavu vypnutí. Je-li RMC vypnuto, na návěstidlech je zobrazena blikavá žlutá, která je v diagramu uvedena jako SP\_16. Pokud jsou všechny komponenty v pořádku a funkční, pokračuje se k porovnání aktuální sekundy cyklu s délkou cyklu. Jsou-li tyto dvě hodnoty stejné, dojde k načtení obsazenosti a intenzity z hlavní trasy (data jsou zprůměrována za délku cyklu), jako předchozí signální plán se nastaví aktuální a sekunda cyklu se nastaví na hodnotu 1. Pokud je obsazenost v hlavním směru menší nebo rovna 50 % a intenzita je nižší než 2620 voz/h je aktivován signální plán 16, jestliže byl předchozí signální plán 15 nebo 16. Byl-li předchozí plán jiný

než tyto dva, nastaví se aktuální na hodnotu 15. Pokud je intenzita hlavního směru vyšší než udaná prahová hodnota a obsazenost nižší, pokračuje se dále k volbě signálního plánu. Následují dvě podmínky, které mají za cíl regulovat délku fronty na přivaděči. První z nich udává vypouštění vozidel při překročení obsazenosti vzdálenějšího kongesčního detektoru od stop čáry. Pokud je překročena hranice 40 % obsazenosti, dojde k vypuštění vozidel pomocí signálního plánu 15 nebo 16. Druhá podmínka určuje postup při zvýšení obsazenosti bližšího kongesčního detektoru. Vzroste-li na tomto detektoru obsazenost nad 40 %, k aktuální zvolenému signálnímu plánu na základě dopravních dat z hlavního směru se přičte hodnota 2. Znamená to, že během jednoho cyklu bude vypuštěno o dvě vozidla více z důvodu redukce fronty na přivaděči. Tyto dvě podmínky hlídající délku vzniklé fronty jsou důležité z hlediska ovlivnění přilehlé komunikace vozidly ve frontě.

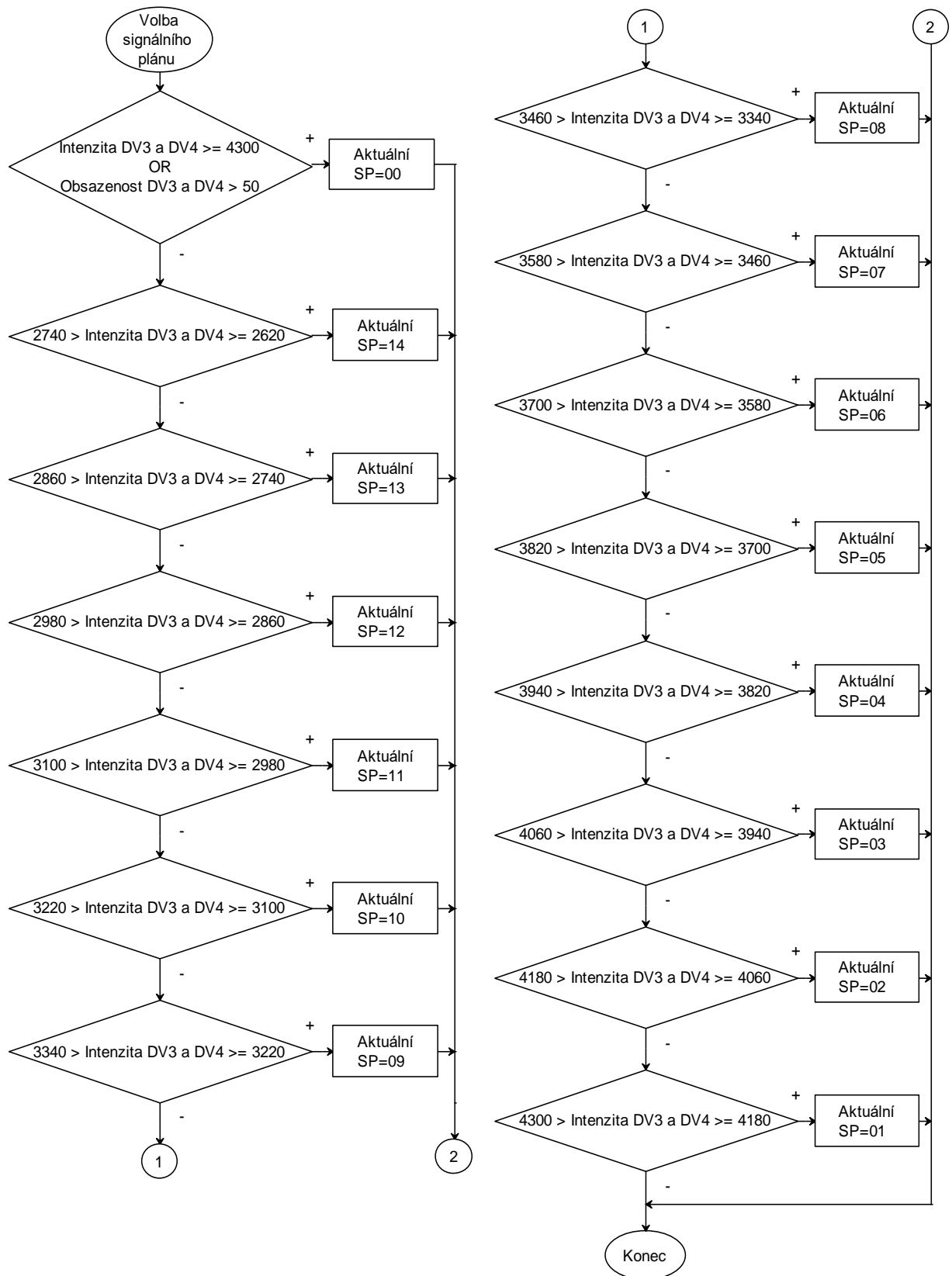
V případě kdy se nerovná u třetí podmínky sekunda cyklu s délkou cyklu, dojde pouze k inkrementaci sekundy cyklu. Jako poslední je aktivován podprogram, který aktivuje signální plán vybraný s ohledem na stav hlavního směru a případný vznik fronty na přivaděči.



Obr. 25: Navržený algoritmus vypnutí a zapnutí RMC

### 3.5.2 Algoritmus volby signálního plánu

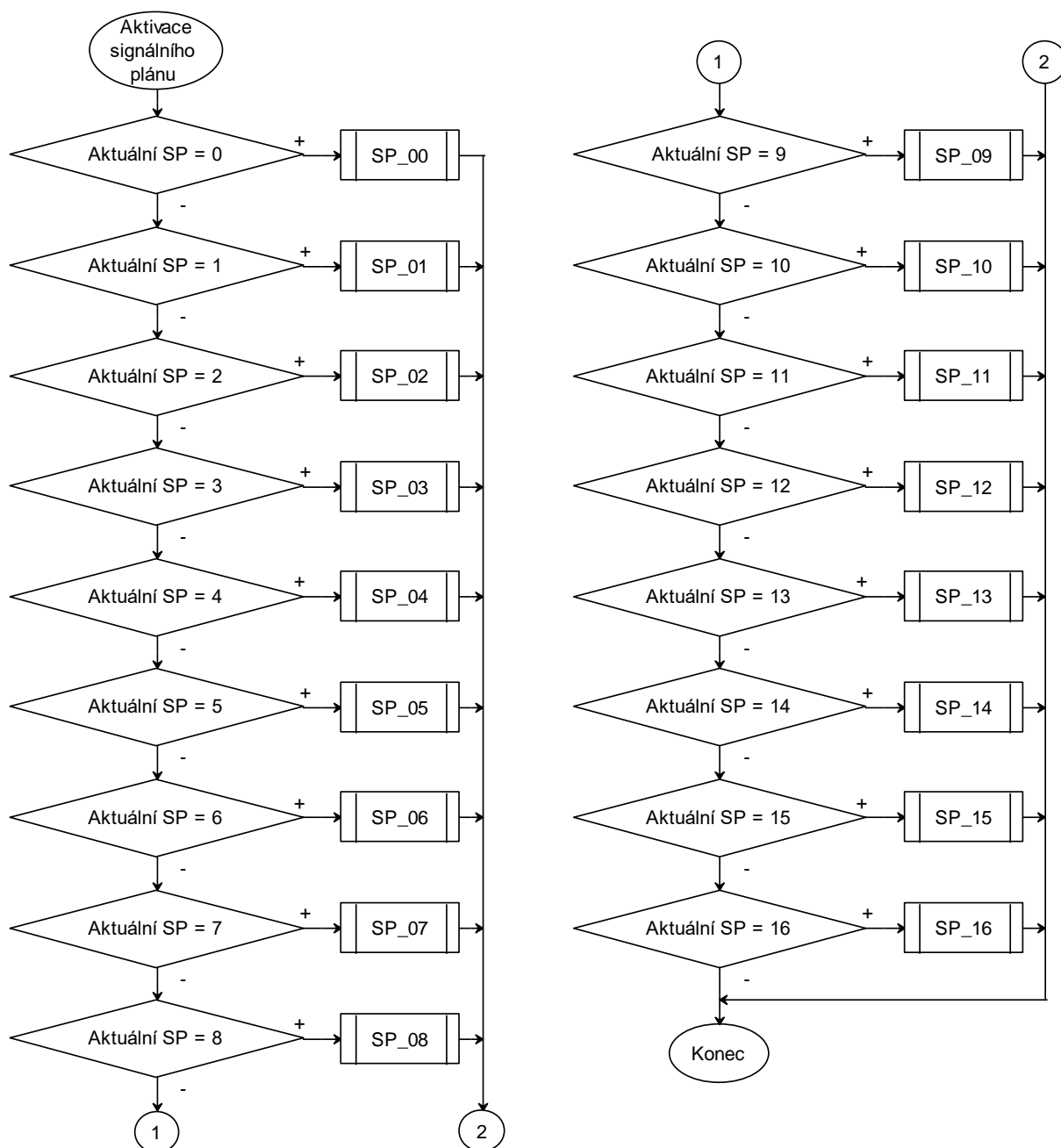
Algoritmus volby vhodného signálního plánu je zachycen na vývojovém diagramu na Obr. 26. Tento algoritmus je velmi jednoduchý a přesto přesný. Předchozí algoritmus vyhodnotí, zda je vhodné řízení spustit či naopak na základě obsazenosti v hlavním směru. Díky tomu, lze provádět výběr signálního plánu pouze na základě naměřených intenzit. Proto v tomto vývojovém diagramu jsou vždy na levé straně podmínky s intervalem intenzit, pro které je aktivován signální plán vpravo od podmínky. V tomto algoritmu dochází pouze k výběru signálního plánu na základě naměřených dat z hlavního směru. Vybraný signální plán může být dále upraven s ohledem na případnou frontu na přivaděči. K aktivaci dochází až v následujícím algoritmu aktivace signálního plánu.



Obr. 26: Algoritmus volby signálního plánu

### 3.5.3 Algoritmus aktivace signálního plánu

Na následujícím Obr. 27 je zobrazen vývojový diagram algoritmu aktivace signálního plánu. Z předchozích algoritmů dojde k návrhu vhodného signálního plánu. Na základě tohoto návrhu algoritmus aktivace zvolí jeden z přednastavených signálních plánů a spustí daný podprogram. Proces zobrazení návěstí dle zvoleného signálního plánu je zachycen algoritmem signálního plánu.

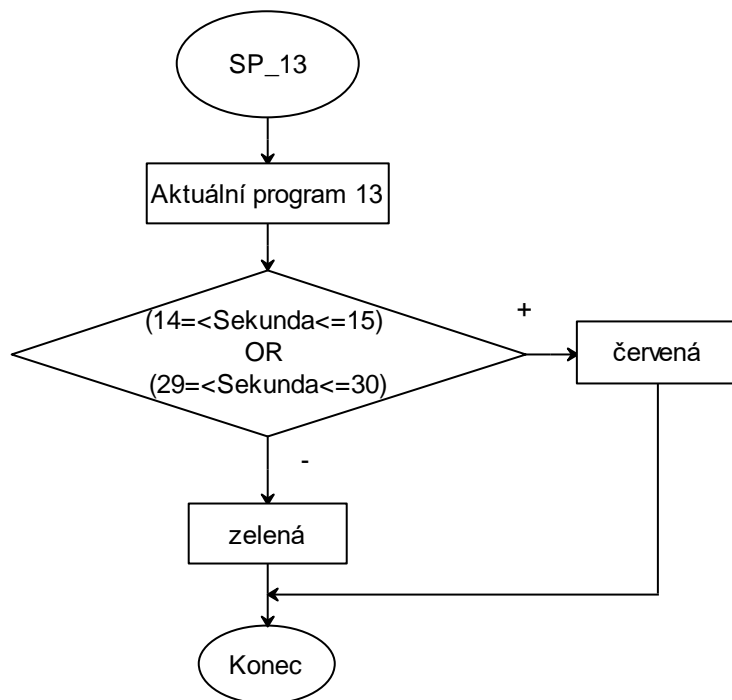


Obr. 27: Algoritmus aktivace signálního plánu



### 3.5.4 Algoritmus signálního plánu

Na Obr. 28 je uveden vývojový diagram algoritmu signálního plánu SP\_13. V první řadě dojde k uložení aktuálního signálního plánu do proměnné. Dále následuje rozhodování dle aktuální sekundy cyklu. Pokud je sekunda cyklu 14, 15, 29 nebo 30 je zobrazená červená návěst, není-li tomu tak, je zobrazena návěst zelená dle Obr. 24. Tento algoritmus je vytvořen pro všechny signální plány. Liší se pouze v uložení jiné hodnoty do proměnné a v časových intervalech pro rozsvícení příslušné návěsti, jinak jsou totožné.



Obr. 28: Algoritmus signálního plánu SP\_13

## 4 Vytvoření simulačního modelu

Vytváření mikrosimulačního modelu probíhalo v prostředí PTV VISSIM 7. Navržené algoritmy řízení byly implementovány do modelu pomocí prostředí VISVAP 2.16. Před samotným začátkem vytváření modelu je třeba získat potřebná dopravně-inženýrská data. V tomto případě se jednalo především o intenzity vozidel na hlavní a vedlejší komunikaci

a skladbu dopravního proudu. Všechna tato data byla získána z webových stránek ŘSD a jsou uvedena v kapitole 3.1.

Základem simulačního modelu je mapový podklad dané situace. Jako mapový podklad byl v tomto případě použit obrázek ve formátu \*.png. Následně došlo k sestavení dopravní sítě v dané lokalitě pomocí linek (links) a jejich spojnic (connectors). Na vytvořenou síť umístit rychlostní limity (desired speed decision), směřování vozidel (vehicle routes). Pokračovalo vložení vstupů vozidel (vehicle inputs) s definovanými parametry (intenzita, skladba, rychlost,...) a prvky pro měření dob jízdy vozidel (vehicle travel times). Jelikož bude v simulačním modelu použito řízení vytvořené v aplikaci VISVAP, je nutné vložit řadič (signal controller). K tomuto řadiči budou vztaženy detektory (detectors) a návěsti (signal heads). Náhled na vytvořenou dopravní síť osazenou všemi výše zmíněnými prvky je na Obr. 29. Mikrosimulační model se nachází v příloze B.3.



Obr. 29: Náhled na síť osazenou prvky

Následujícím krokem po vytvoření dopravní sítě je navržení logiky řízení v prostředí VISVAP 2.16. Vytváření logiky v tomto prostředí je velmi rychlé a intuitivní. Řízení se navrhuje pomocí vývojových diagramů. Mezi základní prvky těchto diagramů je konec (terminus), tvrzení (statement), podmínka (condition), podprogram (subroutine). Všechny prvky se propojují pomocí linek (line).

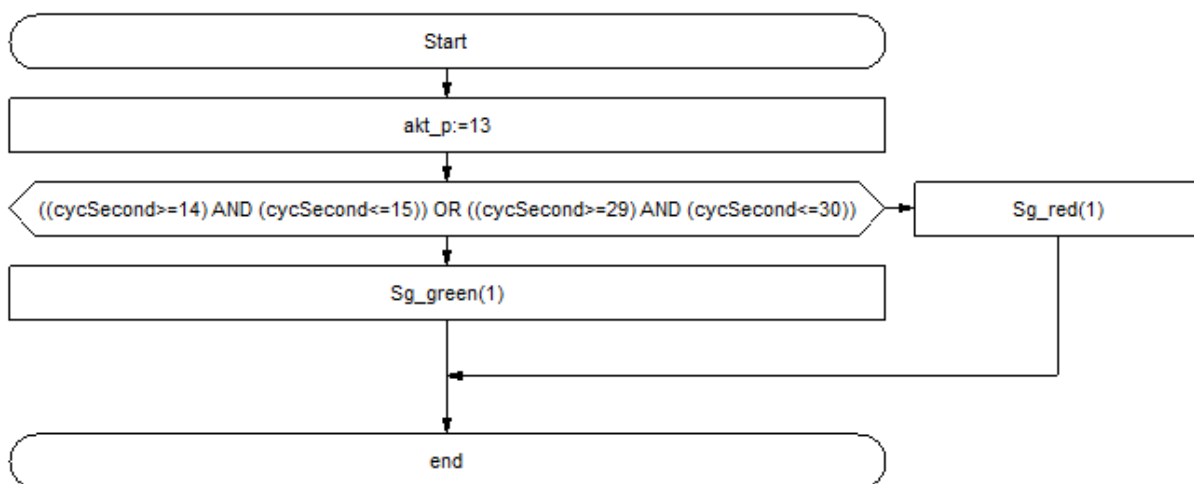
Řízení bylo navrženo dle algoritmů z kapitoly 3.5. Celé řízení navržené v prostředí VISVAP funguje následovně. Na začátku programu je podmínka inicializace systému, pokud není inicializován, dosadí se do této inicializační proměnné hodnota 1 a je aktivován SP 16. Následně se porovná aktuální hodnota cyklu s délkou cyklu. Je-li aktuální sekunda cyklu větší nebo rovna délce cyklu, pokračuje program pravou větví, pokud je sekunda cyklu menší, pokračuje se větví levou. Levá větev zahrnuje načtení obsazenosti a rychlosti po spojení hlavního a vedlejšího proudu. To je použito pro vyhodnocení simulace. Dále inkrementuje aktuální sekundu cyklu. Pravá větev obsahuje načtení intenzity a obsazenosti v hlavním směru, obsazenosti kongesčních detektorů, nastavení sekundy cyklu na hodnotu 1 a uložení aktuální hodnoty SP jako předchozí, jelikož aktuální SP bude zvolen opět následnou volbou.

Následná podmínka, zda proměnná RMC (zapnutí a vypnutí řízení) je rovna 0, je použita pro možnost vypnutí a zapnutí systému. Je-li hodnota RMC rovna 0, systém přejde do stavu

vypnuto (SP 16 – blikavá žlutá), není-li tomu tak, následuje sada podmínek pro volbu signálního plánu. Podmínky obsahují vždy limitní hodnotu obsazenosti a intenzity naměřené v hlavním směru. Podle toho, která z podmínek je vyhodnocena pozitivně, dojde k uložení čísla signálního plánu do proměnné aktuálního SP. Po této sadě podmínek je zavedeno řízení fronty na přivaděči. První podmínka obsahuje hranici obsazenosti vzdálenějšího kongesčního detektoru, pokud je překročena, dojde k nastavení aktuálního SP na hodnotu 15 nebo 16 v závislosti na signální plán v předešlém cyklu. Další podmínka obsahuje hranici bližšího kongesčního detektoru, která pokud je překročena, dojde ke zvýšení hodnoty aktuálního SP o 2.

Dále dochází k nastavení hodnoty sekundy cyklu simulace a následně k aktivaci signálního plánu dle hodnoty uložené v proměnné aktuálního SP. Následné příkazy obsahují pouze zobrazení hodnot jednotlivých proměnných do okna, které je zobrazeno v prostředí VISSIM během simulace. Řízení navržené v prostředí VISVAP je umístěno v elektronické příloze B.4 a také v tištěné příloze A.2.

Na následujícím Obr. 30 je uveden program v prostředí VISVAP pro zobrazení signálního plánu 13. Nejprve dojde k uložení hodnoty aktuálního SP do proměnné. Dále je porovnána aktuální sekunda cyklu s mezními hodnotami pro rozsvícení signálu stůj (červená) dle signálního plánu na Obr. 24. Pokud je aktuální sekunda cyklu v rozmezí pro splnění podmínky, je rozsvícena červená, pokud není v těchto mezích, je rozsvícena červená. Program je obdobný pro ostatní signální plány. Ostatní signální plány jsou uloženy v elektronické příloze B.4.



Obr. 30: Zobrazení SP\_13

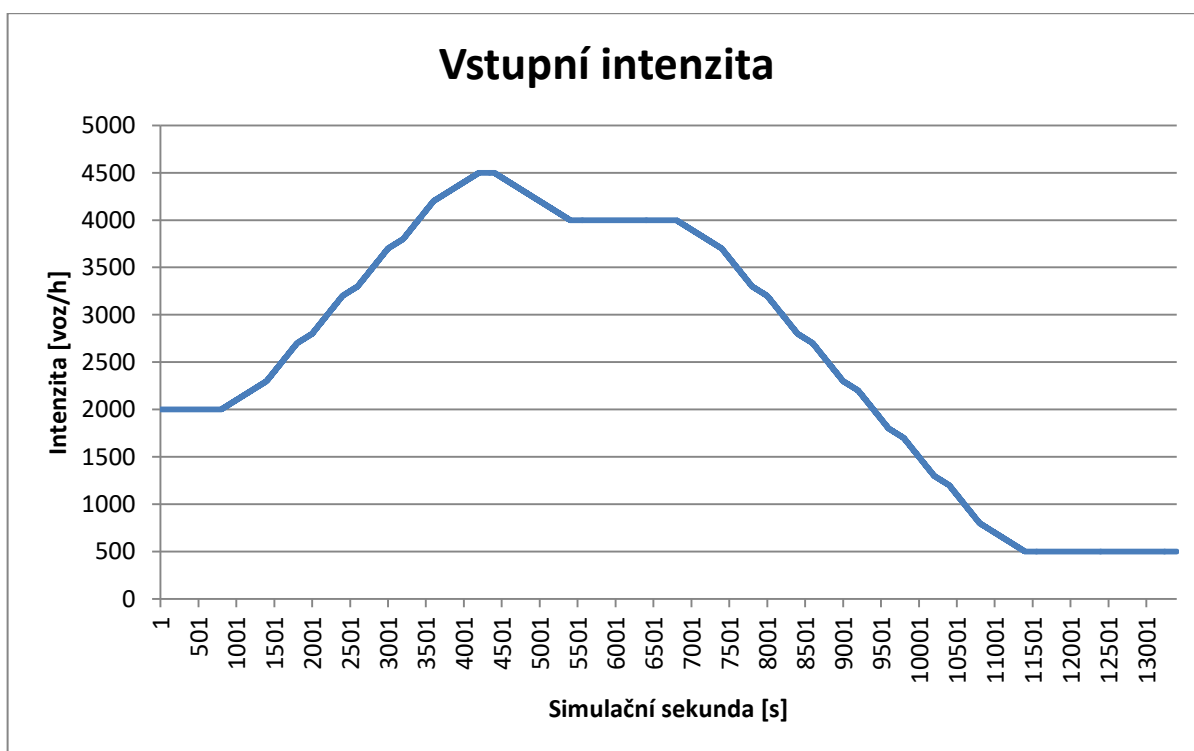
## 4.1 Simulace bez řídicího systému

Simulace bez řízení probíhala po nastavení proměnné RMC na hodnotu 0, čím je vynechána volba signálních plánů a na SSZ je zobrazena trvale blikavá žlutá, kterou vozidla projíždějí bez zastavení či zpomalení. Tato simulace proběhla pro dvě vstupní křivky intenzit (testovací data a data Praha). Během všech simulací byla hodnota intenzity vozidel z vedlejšího směru nastavena na 600 voz/h.

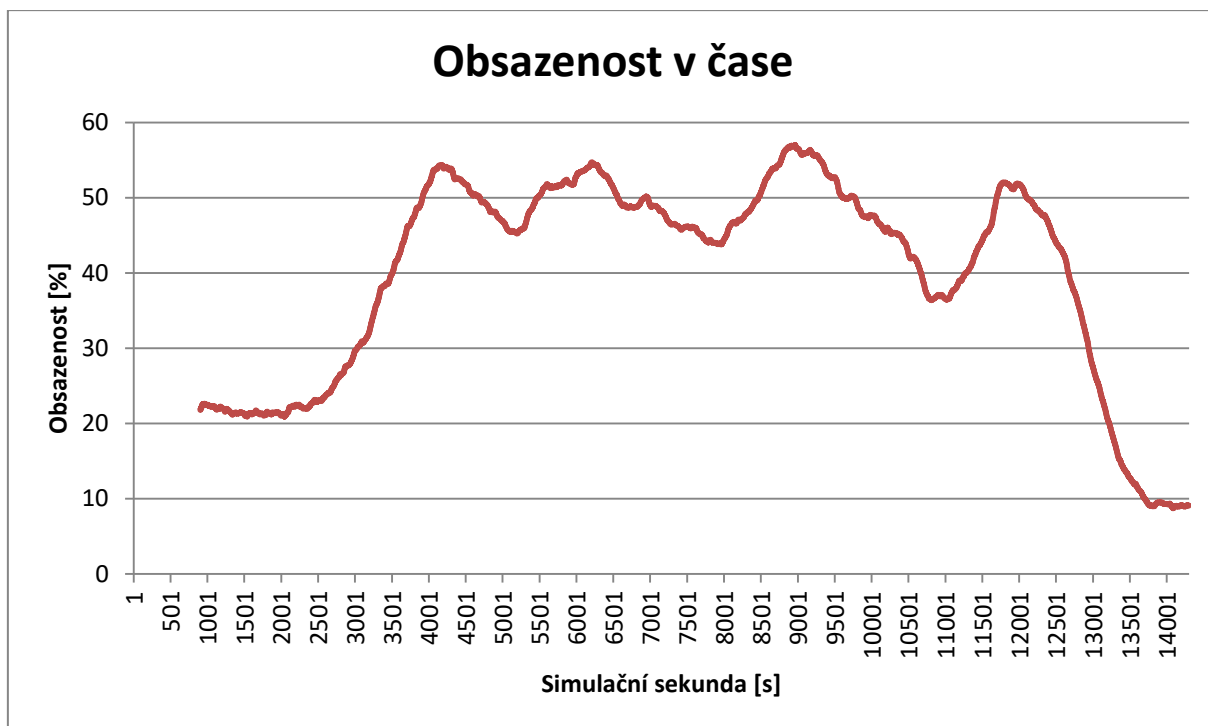
### 4.1.1 Testovací data

Pro testování byl vytvořen časový průběh intenzit začínající na intenzitě 2000 voz/h, který dále pokračuje přes vrchol 4500 voz/h a končí na hodnotě 500 voz/h. Tento průběh byl pro testování zvolen z důvodu zkoušení řízení i při vysokých intenzitách v hlavním směru. Saturace hlavního směru se nachází dle modelů uvedených v kapitole 3.3. Právě kolem intenzity vozidel 4500 voz/h. Průběh intenzity na dálnici je uveden na Obr. 31. Simulace těchto testovacích dat probíhala po dobu 4 hodin.

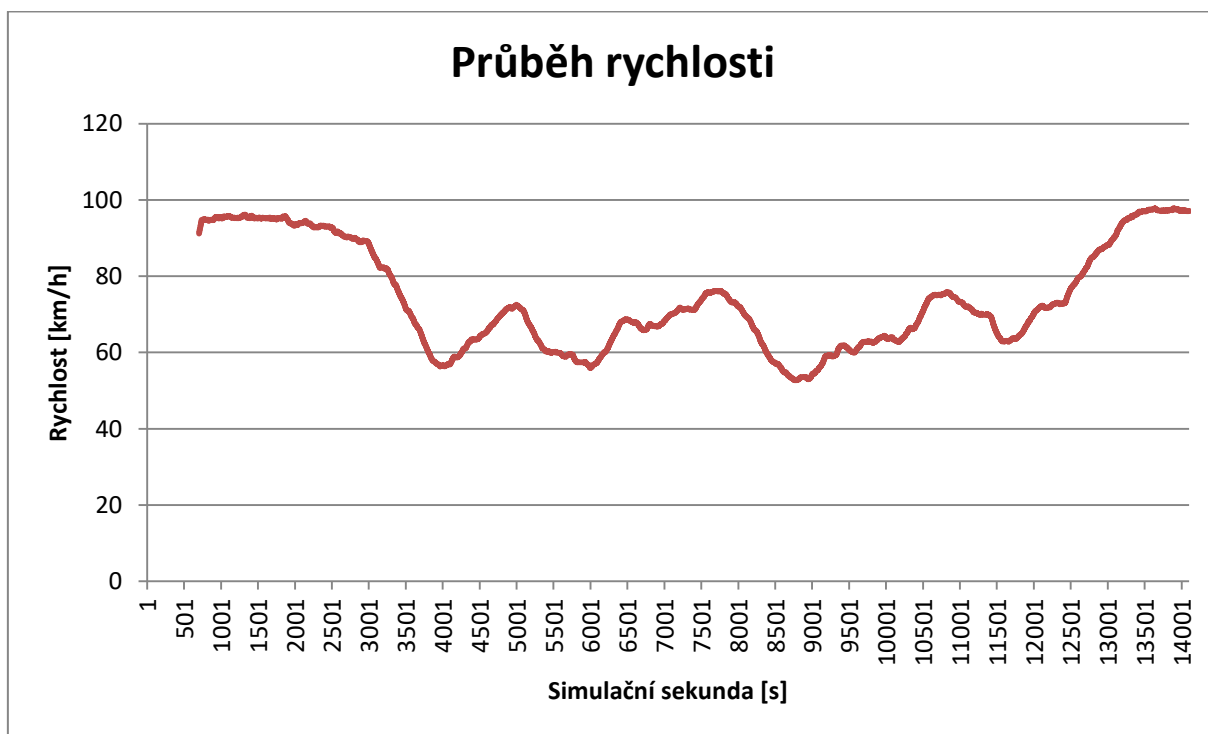
Výsledná průměrná obsazenost vyšla 38,31 %, průměrná rychlost byla 75,25 km/h. Během simulace projelo v hlavním směru 11 531 vozidel s průměrnou dobou jízdy 37,67 s a ve vedlejším směru 2334 vozidel s průměrnou dobou jízdy 160,76 s. Výsledné průběhy obsazenosti a intenzity jsou uvedeny na Obr. 32 a Obr. 33.



Obr. 31: Testovací průběh vstupní intenzity



Obr. 32: Průběh obsazenosti po spojení obou směrů bez řízení s použitím testovacích dat



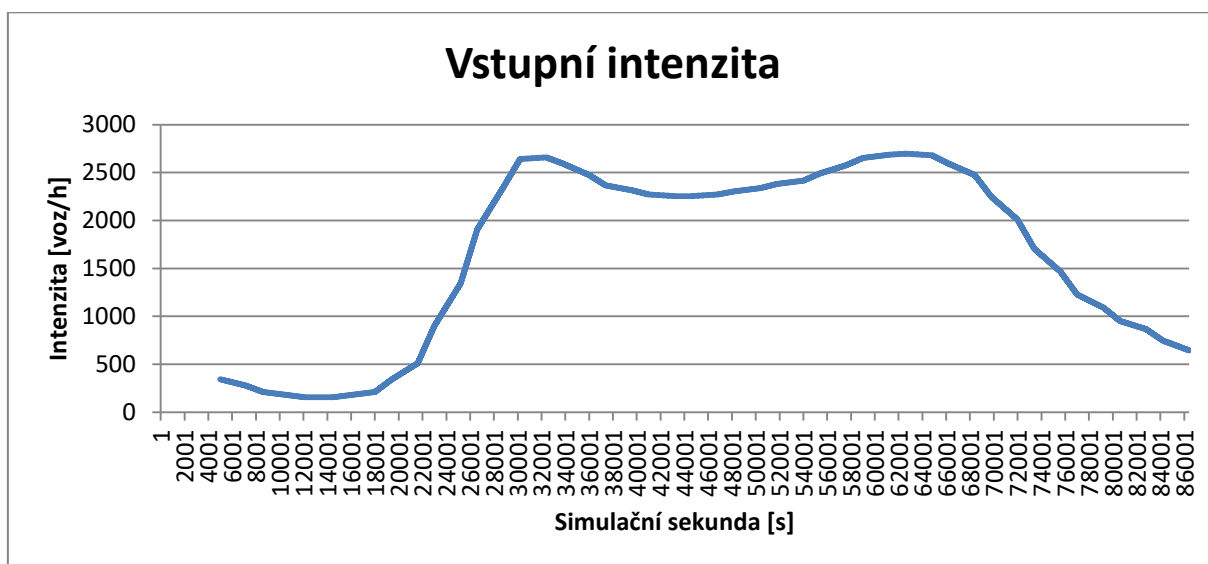
Obr. 33: Průběh rychlosti po spojení obou směrů bez řízení s použitím testovacích dat

#### 4.1.2 Data Praha

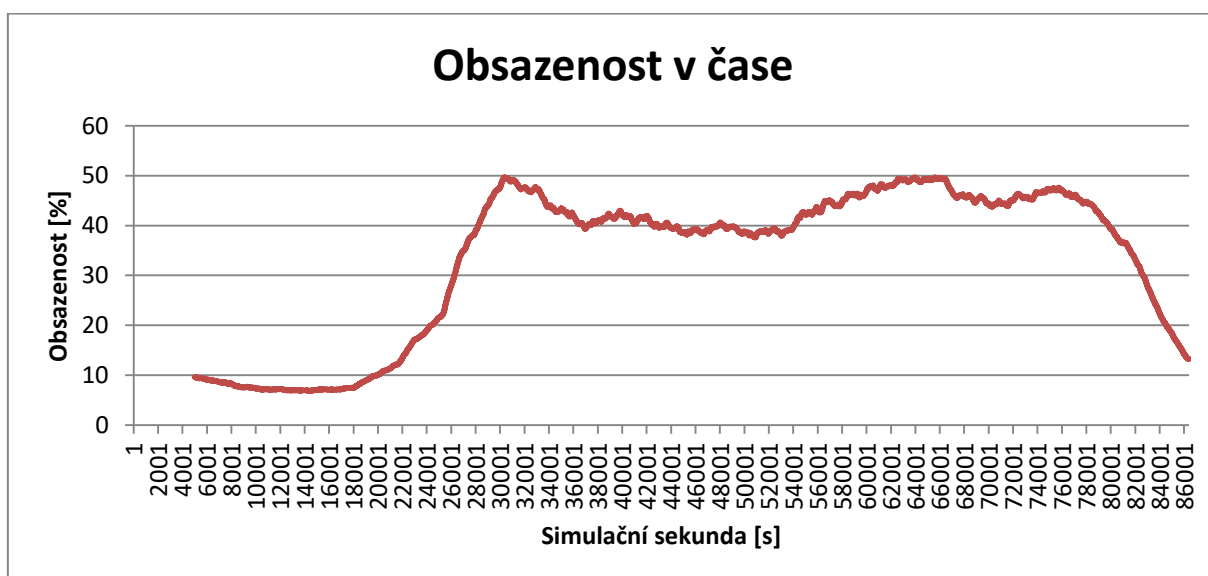
Pro tuto část simulace byla použita křivka průběhu intenzit z Ročenky TSK 2015 [20]. Daný průběh intenzity, je zde uveden jako procentuální podíl z celého dne, proto bylo jednoduché jej přepočítat na zvolený úsek podle RPDI daného úseku. Vzhledem ke stáří RPDI, který je

z roku 2010, bylo potřebné tuto hodnotu upravit, jelikož při vložení průběhu intenzit přepočteného z RPDI 2010 nemá smysl řízení implementovat, protože by se ani neaktivovalo. Hodnota RPDI 2010 byla tedy výsledně vynásobena koeficientem 1,5 a vstupní průběh intenzity je uveden na Obr. 34. Jelikož tato data pokrývají celý denní průběh, doba simulace byla také 24 hodin.

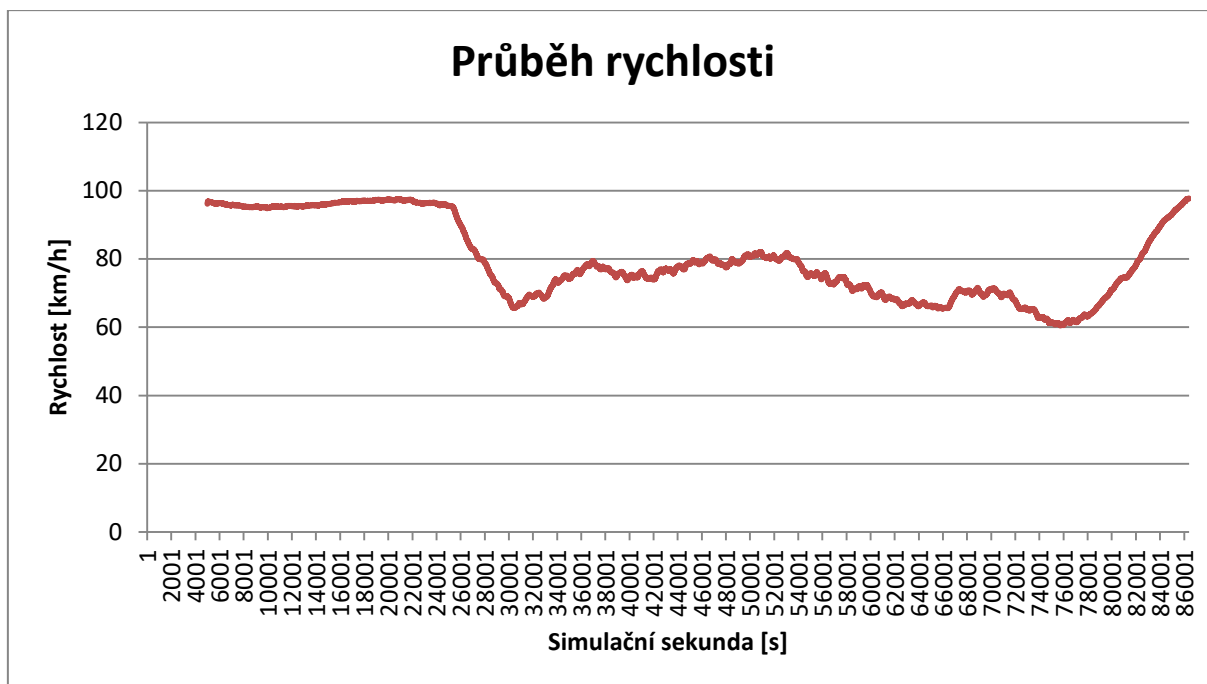
Výsledná průměrná obsazenost vyšla 32,25 %, průměrná rychlost byla 80,61 km/h. Během simulace projelo v hlavním směru 58 164 vozidel s průměrnou dobou jízdy 29,90 s a ve vedlejším směru 14 099 vozidel s průměrnou dobou jízdy 179,38 s. Výsledné průběhy obsazenosti a intenzity jsou uvedeny na Obr. 35 a Obr. 36.



Obr. 34: Vstupní průběh intenzit data Praha



Obr. 35: Průběh obsazenosti po spojení obou směrů bez řízení s použitím průběhu dat Praha



Obr. 36: Průběh rychlosti po spojení obou směrů bez řízení s použitím průběhu dat Praha

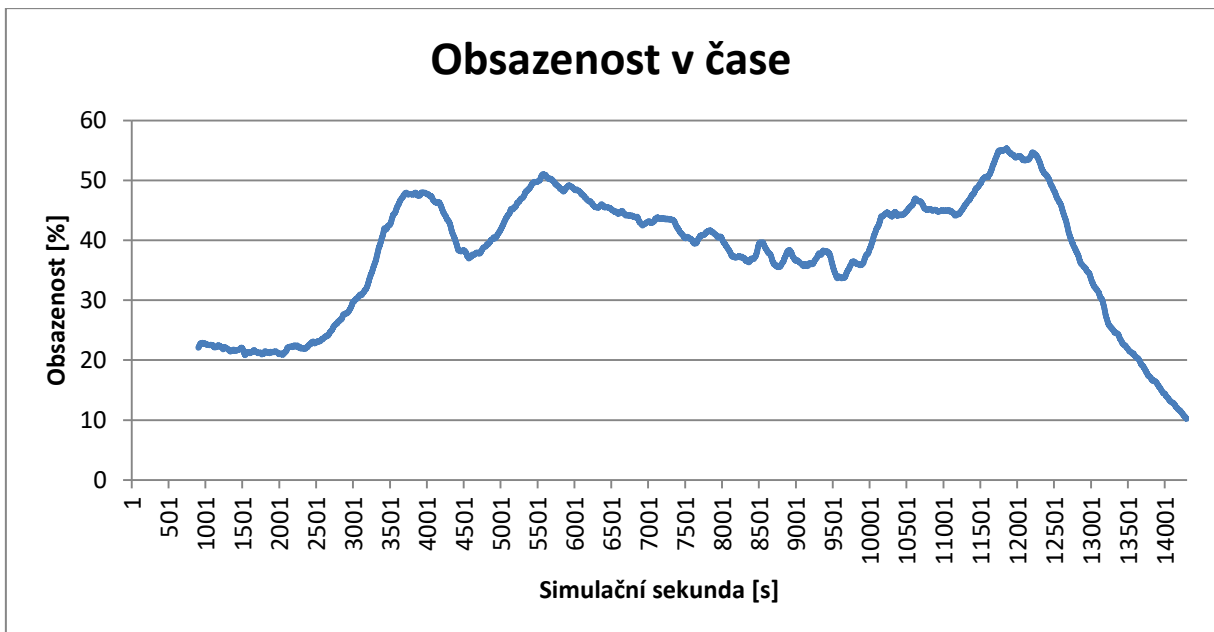
## 4.2 Simulace s použitím řídicího systému RMC

Simulace se spuštěným řízením, čehož bylo dosaženo nastavením proměnné RMC na hodnotu 1, proběhla rovněž pro dvě vstupní křivky intenzit. Během všech simulací byla hodnota intenzity vozidel z vedlejšího směru nastavena na 600 voz/h.

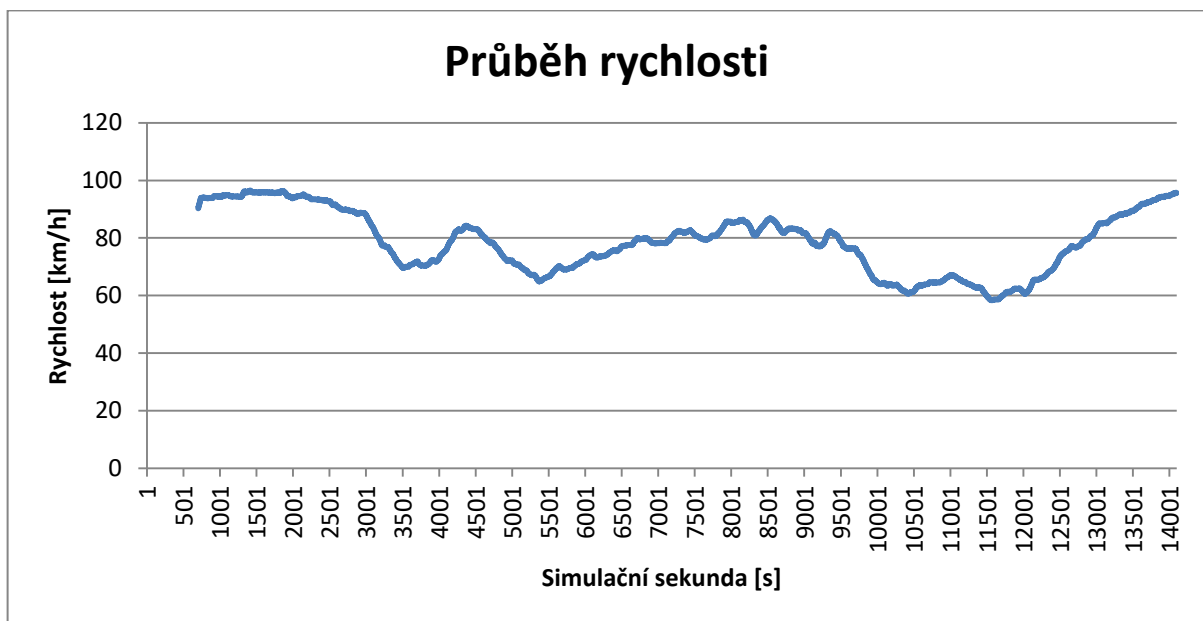
### 4.2.1 Testovací data

Testovací data byla použita stejná jako v kapitole 4.1.1 a jejich průběh je zobrazen na Obr. 31. Výsledná průměrná obsazenost vyšla 36,06 %, průměrná rychlost byla 79,53 km/h. Během simulace projelo v hlavním směru 11 531 vozidel s průměrnou dobou jízdy 27,50 s a ve vedlejším směru 2332 vozidel s průměrnou dobou jízdy 177,57 s. Výsledné průběhy obsazenosti a intenzity jsou uvedeny na Obr. 37 a Obr. 38.





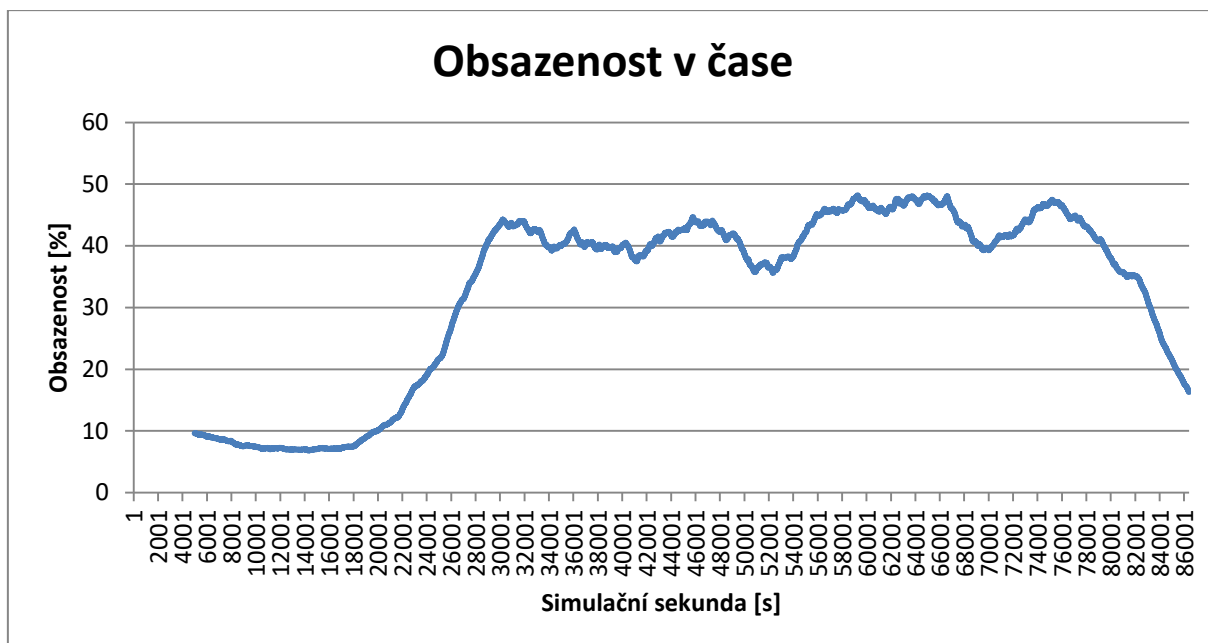
Obr. 37: Průběh obsazenosti po spojení obou směrů s řízením s použitím testovacích dat



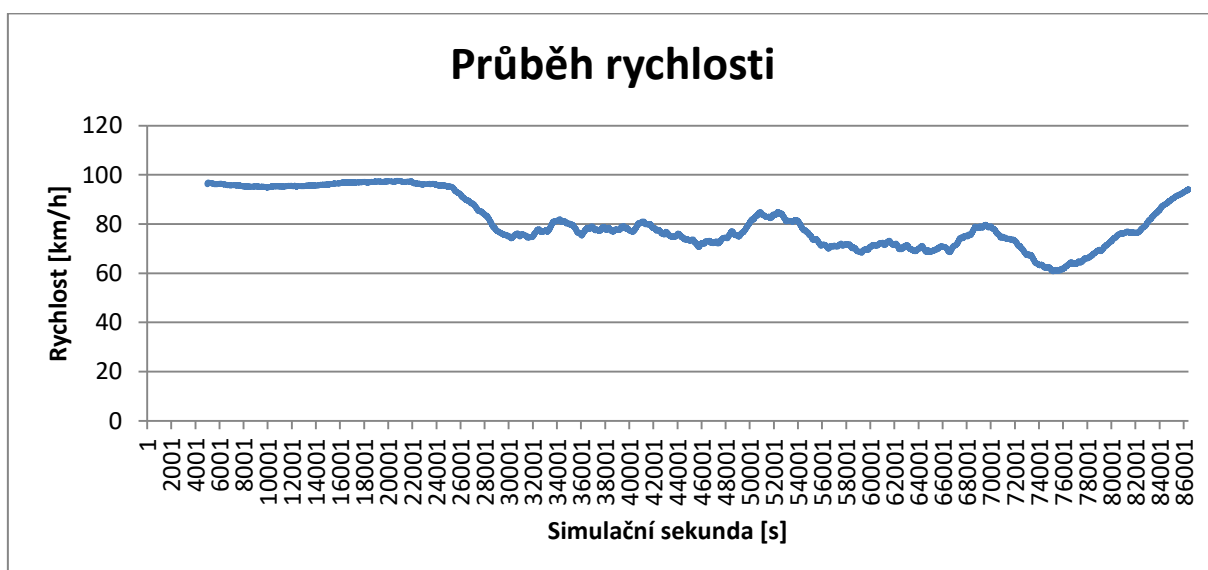
Obr. 38: Průběh rychlosti po spojení obou směrů s řízením s použitím testovacích dat

#### 4.2.2 Data Praha

Vstupní data byla použita stejná jako v kapitole 4.1.2 a jejich průběh je zobrazen na Obr. 34: Vstupní průběh intenzit data Praha Obr. 34. Výsledná průměrná obsazenost vyšla 31,48 %, průměrná rychlost byla 81,85 km/h. Během simulace projelo v hlavním směru 58 164 vozidel s průměrnou dobou jízdy 28,60 s a ve vedlejší směru 14 096 vozidel s průměrnou dobou jízdy 180,89 s. Výsledné průběhy obsazenosti a intenzity jsou uvedeny na Obr. 39 a Obr. 40.



Obr. 39: Průběh obsazenosti po spojení obou směrů s řízením s použitím průběhu dat Praha



Obr. 40: Průběh rychlosti po spojení obou směrů s řízením s použitím průběhu dat Praha

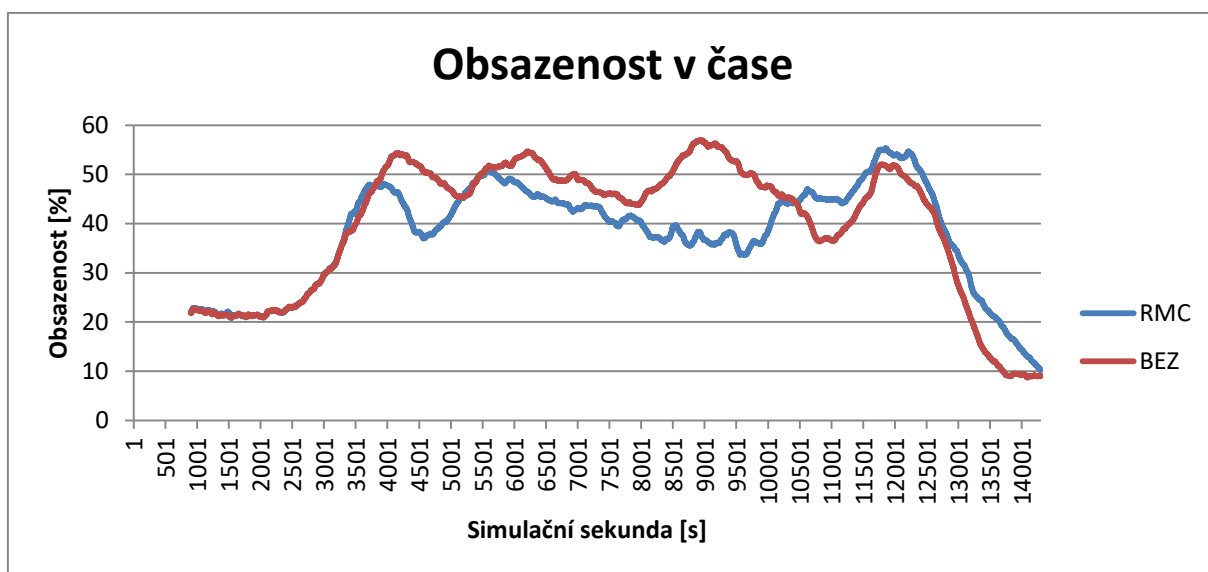
### 4.3 Porovnání výsledků s RMC a bez RMC

V této kapitole budou porovnány výsledky ze simulací s řízením RMC a bez něj. Porovnání proběhne opět na obou typech vstupních dat.

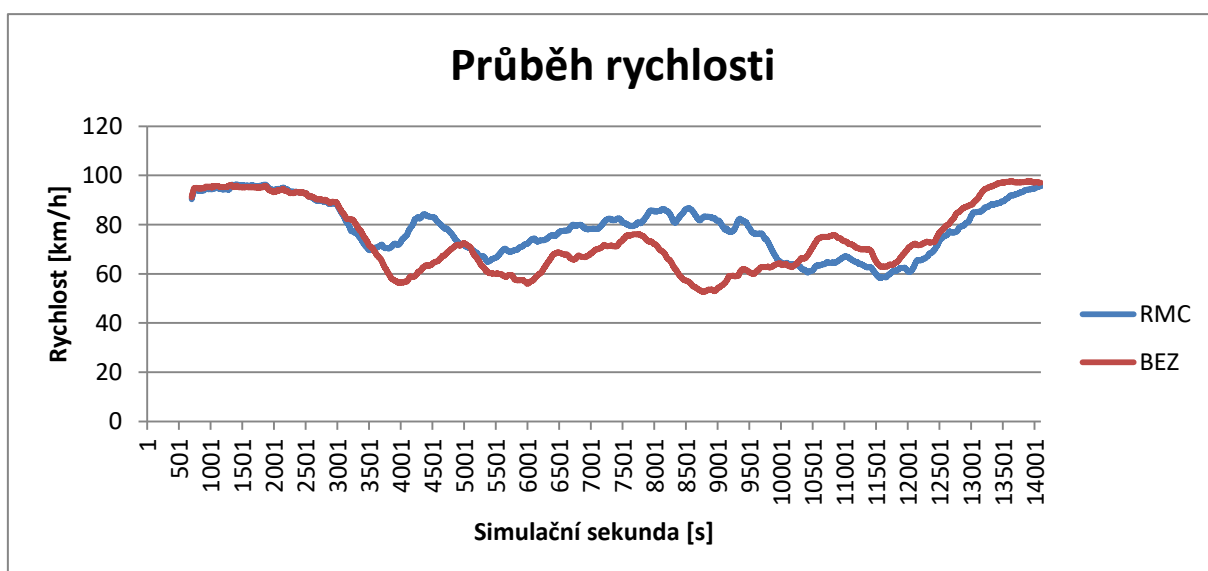
#### 4.3.1 Testovací data

V následujících dvou grafech uvedených na Obr. 41 a Obr. 42 jsou porovnány průběhy obsazenosti a rychlosti s řízením RMC a bez něj. Křivka s řízením je označena jako RMC a bez řízení jako BEZ. Z průběhů je vidět, že při vyšší obsazenosti řízení lépe dávkuje vozidla

z přípojné rampy, proto je obsazenost nižší a rychlost vyšší než bez řízení. Na testovacích datech došlo vlivem řízení ke snížení průměrné obsazenosti o 2,25 %, zvýšení průměrné rychlosti o 4,29 km/h. Důležité je porovnání cestovních dob, kde v hlavním směru došlo ke snížení o 10,17 s a ve vedlejší směru ke zvýšení o 16,82 s. Zvýšení cestovních dob z vedlejšího směru je dáno tím, že navržený systém se snaží především udržet průjezdný hlavní směr. Po vynásobení cestovních dob s počty vozidel v jednotlivých směrech dostaneme výsledek, že celková úspora času je 21,77 VH (vozohodin). Vstupní i výstupní data a grafy jsou uvedeny v elektronické příloze B.5.



Obr. 41: Průběh obsazenosti po spojení obou směrů porovnání s použitím testovacích dat



Obr. 42: Průběh rychlosti po spojení obou směrů porovnání s použitím testovacích dat

### **4.3.2 Data Praha**

V následujících dvou grafech uvedených na Obr. 41 a Obr. 42 jsou porovnány průběhy obsazenosti a rychlosti s řízením RMC a bez něj. Křivka s řízením je označena jako RMC a bez řízení jako BEZ. Z průběhů je vidět, že při vyšší obsazenosti řízení lépe dávkuje vozidla z přípojné rampy, proto je obsazenost nižší a rychlost vyšší než bez řízení. Na průběhu intenzit typickým pro Prahu došlo vlivem řízení ke snížení průměrné obsazenosti o 0,78 %, zvýšení průměrné rychlosti o 1,23 km/h. Důležité je porovnání cestovních dob, kde v hlavním směru došlo ke snížení o 1,30 s a ve vedlejší směru o 1,51 s. Zvýšení cestovních dob z vedlejšího směru je dáno tím, že navržený systém se snaží především udržet průjezdný hlavní směr. Po vynásobení cestovních dob s počty vozidel v jednotlivých směrech dostaneme výsledek, že celková úspora času je 15,18 VH. Vstupní i výstupní data a grafy jsou uvedeny v elektronické příloze B.5.

### **4.4 Ověření a kalibrace limitů řízení**

V předchozí části došlo k porovnání výsledků řízení na základě vstupních dat. Těmto vyhodnocením předcházela kalibrace parametrů řízení. Možností jak kalibrovat navržený systém je více. Kalibrovat lze limity obsazenosti jak v hlavním směru, tak i na kongesčních detektorech ve směru vedlejší. Tyto hodnoty se pro oba typy vstupních dat osvědčili jako vhodné. Další možností je změna limitů intenzity pro volbu signálních plánů. Není třeba měnit limity intenzit u všech podmínek, jelikož by to bylo příliš pracné. Při kalibraci docházelo k opravování těchto hodnot pomocí odečtení či přičtení určité hodnoty intenzity k naměřené intenzitě v hlavním směru, tím docházelo k posouvání limitů. Pro testovací data vycházely výsledky nejlépe po odečtení od naměřené intenzity 100 voz/h. Pro pražský denní průběh byly výsledky nejlepší pro přičtení hodnoty 100 voz/h.

## 5 Implementace na řídicí systémy

Pro aplikaci algoritmů na řídicí systémy bude využita laboratoř řídicích systému na Fakultě dopravní ČVUT. Cílem implementace na řídicí systémy je vyzkoušet správnou funkci navržených algoritmů v automatickém provozu. K implementaci byly zvoleny všechny algoritmy zmíněné v kapitole 3.5. Jedná se o algoritmy, které jsou rovněž obsaženy v řízení mikrosimulačního modelu. Programování algoritmů na programovatelný automat (PLC) je provedeno z toho důvodu, že tento prvek by mohl být použit přímo v provozu jako řadič RMC.

### 5.1 Hardware

Vybavení laboratoře zahrnuje osobní počítače, síť a programovatelné automaty (PLC). Osobní počítače jsou propojeny navzájem sítí Ethernet. Počítače komunikují s PLC pomocí sítě DH 485. Automaty součástí laboratoře jsou výrobkem společnosti Allen Bradley, která nyní spadá do celku Rockwell Automation. Pro testování byl využit model SLC-500 s procesorem typu 1747-L531 a 8 kB paměti. Vstupní veličiny jsou zadávány pomocí vnitřních softwarových proměnných automatu v online režimu přes aplikaci RSLogix500. Výstupní veličiny (návesti na SSZ) jsou zobrazeny pomocí výstupu PLC na návěstidlo umístěné na modelu křižovatky, který je zahrnut ve vybavení laboratoře.

### 5.2 Konfigurace

Pro konfiguraci a následnou implementaci je použit software RSLogix500 dodávaný výrobcem PLC. K implementaci není potřeba žádný vstupní modul, jelikož vstupní parametry jsou suplovány vnitřními proměnnými. Pro znázornění výstupu je využit modul s výstupem 240 V AC. Z tohoto modulu jsou použity pouze 3 porty pro rozsvícení signálů (červená, žlutá, zelená) na SSZ umístěném na modelu křižovatky. Jsou využity vnitřní proměnné celočíselné (Integer) a binární (Binary). Celočíselné proměnné začínají písmenem N a binární písmenem B. Dále je využit jeden časovač, pro tvorbu signálního plánu a doby cyklu. V uvedené tabulce Tab. 8 jsou vypsané všechny proměnné použité v programu.

Tab. 8: Použité proměnné v programu

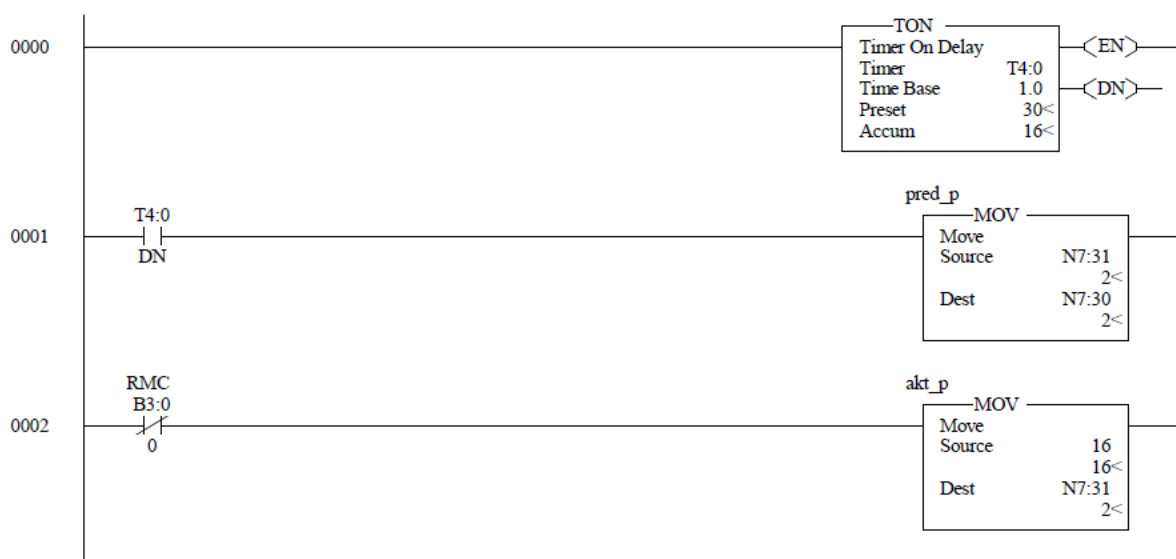
Proměnná	Označení	Popis
<b>B3:0/0</b>	RMC	Vypnutí a zapnutí řízení
<b>B3:0/1</b>	red	Spouštěcí bit výstupu červená
<b>B3:0/2</b>	yellow	Spouštěcí bit výstupu žlutá
<b>B3:0/3</b>	green	Spouštěcí bit výstupu zelená
<b>N7:30</b>	pred_p	Předchozí SP
<b>N7:31</b>	akt_p	Aktuální SP
<b>N7:32</b>	q_det1	Intenzita hlavního proudu
<b>N7:33</b>	o_det1	Obsazenost hlavního proudu
<b>N7:34</b>	o_det2	Obsazenost bližšího kongesčního detektoru
<b>N7:35</b>	o_det3	Obsazenost vzdálenějšího kongesčního detektoru
<b>N7:36</b>	prac_prog	Pracovní proměnná
<b>O:2/0</b>	red	Výstup červená
<b>O:2/1</b>	yellow	Výstup žlutá
<b>O:2/2</b>	green	Výstup zelená
<b>T4:0/ACC</b>		Akumulátor časovače
<b>T4:0/DN</b>		Done bit časovače

### 5.3 Implementace algoritmů

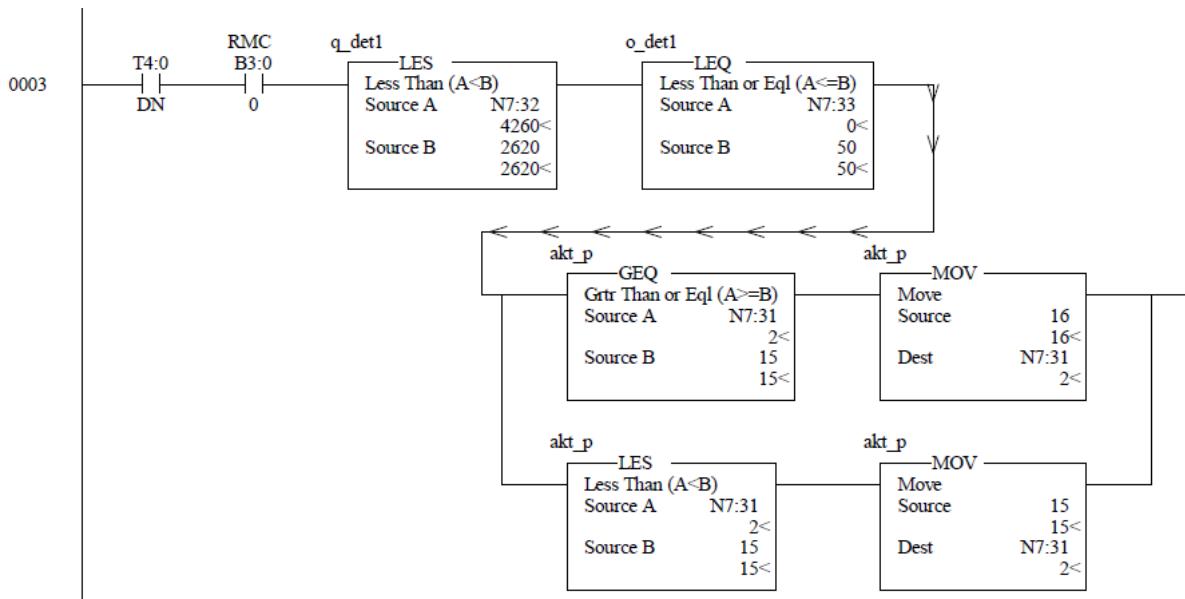
V prostředí RSLogix500 jsou zvolené algoritmy naprogramovány pomocí jazyku liniových schémat. Tento programovací jazyk je vzhledem k jeho struktuře vhodný pro návrh nejen těchto algoritmů, ale i většiny řídicích algoritmů. Jazyk liniových schémat je založen na kontaktních schématech z elektrotechniky a je jim také podobný. Program je strukturován do linií, které tvoří tzv. žebřík. V levé části linie se nacházejí různé podmínky pro aktivaci příkazů. Pokud jsou tyto podmínky splněny, dojde k aktivaci příkazu na pravé straně dané linie. Nejsou-li podmínky splněny, přejde procesor na linii následující. Když procesor přejde k poslední linii (konec programu), začíná se opět od linie první. Celý proces se cyklicky opakuje.

Implementovaný program pracuje následovně. V první linii (linie č. 0) je aktivován časovač T4:0, který je nastaven na 30 s a časovou základnu 1 s. To znamená, že vždy běží od 0 do 30 a každou sekundu se zvyšuje hodnota akumulátoru (ACC) až do 30, potom se nastaví done bit (DN), který na konci programu časovač vyresetuje a běží znovu od začátku. Hodnota v akumulátoru slouží jako aktuální sekunda cyklu. Ve druhé linii (linie č. 1) se uloží hodnota aktuálního signálního plánu jako předchozí. To se děje jen jednou za dobu cyklu, proto je

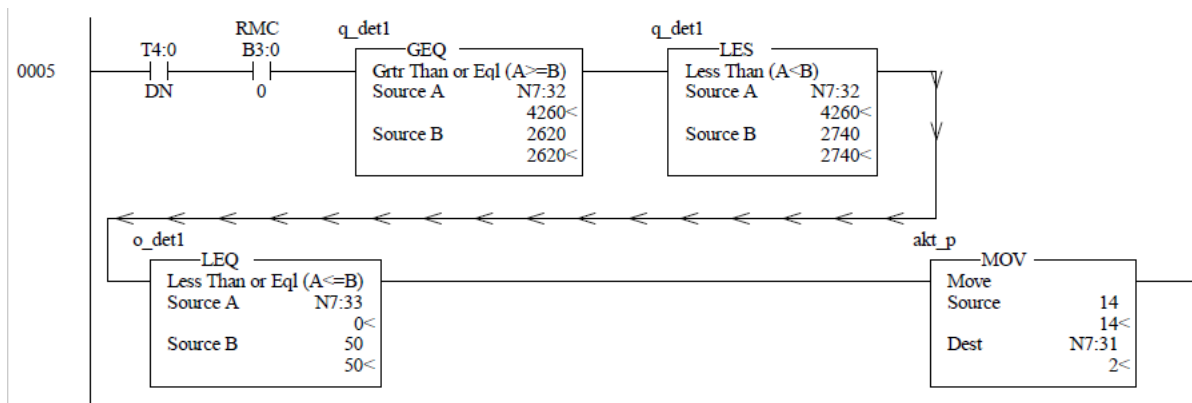
na levé straně podmínka pro aktivaci od DN časovače. V linii č. 2 dochází k volbě SP 16 (blikavá žlutá), je-li systém RMC vypnut. Tyto 3 části programu jsou zobrazeny na Obr. 43. Linie 3, uvedená na Obr. 44, je použita z důvodu volby SP 15 nebo SP 16 s ohledem na předchozí SP a za podmínek intenzity a obsazenosti hlavního směru, zapnutého řízení a konce cyklu (nastaví DN na 1). U veškerého rozhodování volby SP je následně implementována podmínka konce cyklu, jelikož není žádané neustále měnit SP, ale pouze na konci každého cyklu. V případě vypnutého systému není třeba volit SP, to je ošetřeno podmínkou bitu RMC (zapnutí či vypnutí systému). Na linii 4 je podmínka pro volbu SP 0. Ta nastane, pokud intenzita a obsazenost splňují dané limity. Linie 5 – 18 obsahují volbu SP na základě toho, zda se intenzita hlavního proudu nachází v uvedených mezích. Část kódu zachycující volbu SP je zobrazena na Obr. 45. V liniích 19, 20 a 21 je uvedeno řízení fronty. Linie 19 se aktivuje, pokud obsazenost vzdálenějšího kongesčního detektoru je větší než mezní hodnota. Linie 20 je aktivována při větší než mezní obsazenosti bližšího kongesčního detektoru a zvolí SP s číslem o 2 vyšším, aby bylo dosaženo rychlejšího vypouštění vozidel. V následující linii se tato úprava volby SP zohlední.



Obr. 43: Aktivace časovače, uložení předchozího programu a vypnutí řízení



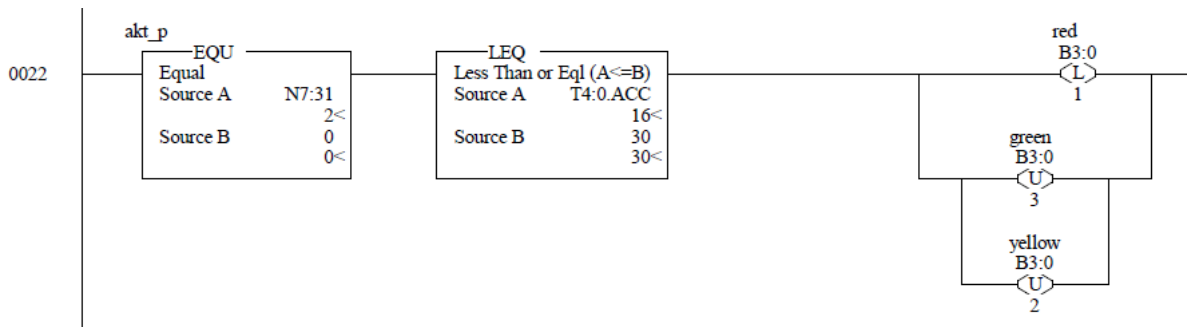
Obr. 44: Volba SP 15 nebo 16



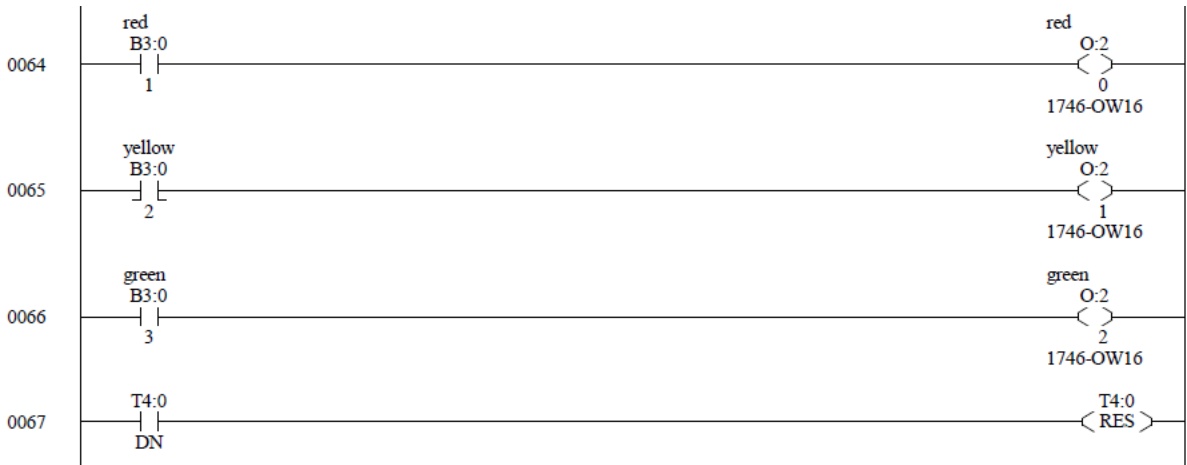
Obr. 45: Volba signálního plánu 14

Další částí programu je na základě volby SP ve správných sekundách cyklu aktivovat jednotlivé návěsti na SSZ. Tento proces je zachycen v liniích 22 – 63 a struktura pro SP 0 uvedena na Obr. 46. Na levé straně jsou podmínky, zda se aktuální sekunda cyklu (hodnota akumulátoru časovače) nachází v rozmezí pro nastavení spouštěcího bitu správného signálu na hodnotu 1. Na liniích 64 – 66 jsou na levé straně kontakty spouštěcích bitů jednotlivých signálů a na straně pravé, po aktivaci těchto bitů, dochází k samotné aktivaci výstupu, ke kterému je připojen příslušný signál návěstidla. Na poslední linii 67 je řešeno restartování časovače po uplynutí 30 s bitem DN. Zobrazení signálů na SSZ a resetování časovače je uvedeno na Obr. 47. Celý kód programu je obsažen v tištěné příloze A.3a elektronické příloze B.2.





Obr. 46: Aktivace signálního plánu 0



Obr. 47: Zobrazení signálů na SSZ a reset časovače

## 5.4 Testování

Testování probíhalo po nahrání a spuštění programu na PLC. V online módu je možné sledovat veškeré změny proměnných i výstupů přímo na PC. Pro dosažení všech možných stavů bylo nutné zadávat různé hodnoty intenzity a obsazenosti v hlavním směru, obsazenosti kongesčních detektorů a možnost vypnutí a zapnutí systému. V proměnných programu docházelo na základě různých vstupních dat ke změnám signálního plánu. To bylo možné sledovat i na SSZ na modelu křižovatky.

Výsledkem testování bylo ověření správné funkce navržených algoritmů i správné převedení algoritmů do prostředí liniových schémat, která se využívají pro programování PLC. Otestovány byly všechny navržené algoritmy s pozitivním výsledkem jejich funkčnosti.

## 6 Analýza spolehlivosti funkce navržené aplikace

Tato kapitola je zaměřena na příčiny, následky a řešení různých poruch navrženého systému. Poruchy mohou nastat na detektorech, akčních členech, řadiči, dopravní ústředně nebo na jejich vzájemné komunikaci. V krizových situacích může zasáhnout dispečer z dopravní ústředny. Systém RMC může dispečer vzdáleně vypnout, spustit nebo zvolit aktuální signální plán. Volbou aktuálního SP je možné uzavřít vjezd na dálnici po určitou dobu např. při průjezdu složek IZS po dálnici. Každá operace dispečera je protokolována z důvodu případného vyšetřování.

### 6.1 Detektory a komunikace s řadičem

Poruchy na detektorech a jejich komunikaci s řadičem RMC mohou být fatální, záleží ovšem, na kterém z detektorů porucha nastala.

#### 6.1.1 Detektory

Porucha indukčních smyček nastává nejčastěji v případě jejího mechanického poškození, které může být způsobeno změnou stavu povrchu vozovky. Další z příčin může být výpadek napájení. Dojde-li k poruše, projeví se tím, že z detektoru nedostáváme žádná data. Je potřebné rozlišit, jestli nedostáváme data z důvodu velice nízké intenzity nebo kvůli poškození nebo výpadku napájení. Pokud by se jednalo o pravý jízdní pruh na dálnici nebo o jeden z detektorů vedlejšího směru a po dobu delší než 30 minut by byla naměřená intenzita nulová, pravděpodobně by se jednalo o poruchu indukční smyčky vzhledem k charakteru vybrané komunikace. Nastala-li by porucha na jednom z detektorů na dálnici, nemělo by smysl udržovat systém zapnutý, jelikož každých 30 s mění signální plán dle těchto naměřených dat. V tomto případě by přešel systém RMC do stavu vypnuto (blikavá žlutá) a dále by byl informován dispečer o poruše. Do doby zjištění poruchy detektorů na dálnici (30 minut) nedojde k blokaci vjezdu vozidel z přípojného směru, spíše vypouští více vozidel než je optimální, to je dáno řídicí logikou. V dalším případě by mohlo dojít k poruše detektorů na přivaděči. Pokud by nastala porucha pouze na jednom ze dvou detektorů, systém by mohl fungovat dále se zhoršeným řízením fronty na přivaděči. Proto je nutné rovněž informovat dispečera o této poruše, jelikož by bylo vhodné, aby na tuto situaci dohlížel a v případě nevhodného řízení provedl některý z akčních zásahů.

### **6.1.2 Komunikace detektoru s řadičem**

Selhání komunikace může nastat na straně detektorů, řadiče nebo na přenosovém médiu. Vzhledem k navržené architektuře by médium pro přenos dat z detektoru bylo metalické. Metalické vedení bývá nejčastěji porušeno mechanicky (např. překopnutí). Pokud dojde k selhání komunikace do řadiče RMC, neprijdou žádná data z detektorů. V případě poruchy, která by byla detekovaná stejně jako porucha detektoru, dojde k odeslání informace o poruše dispečerovi a dle detektoru, se kterým byla ztracena komunikace, dojde k následným opatřením uvedeným v kapitole 6.1.1.

## **6.2 Řadič**

Vzhledem k tomu, že tento člen byl zvolen jako redundantní systém, nemělo by k jeho poruše dojít. Pokud by došlo k poruše procesoru nebo některých periférií, tento stav by byl zaznamenán hlídací periférií (Watchdog) automaticky. Další možností výpadku řadiče je výpadek napájení. Z toho důvodu je vhodné použití záložního zdroje energie, kterým by mohl být řadič napájen do vyřešení poruchy. Pokud by došlo k detekci nefunkčního řadiče, celý systém se automaticky vypne, aby nedocházelo k nahodilému zobrazování návěstí na SSZ. Dále by o této situaci byl informován dispečer.

## **6.3 Akční členy a komunikace s řadičem**

Poruchy akčních členů nebo komunikace mezi akčními členy a řadičem jsou nepříjemné, jelikož nedochází k přenášení informace o řízení k řidičům.

### **6.3.1 Akční členy**

Výpadek akčních členů v podobě návěstidel může nastat nejčastěji vlivem prasklého vlákna žárovky jednoho nebo více signálů na SSZ. Prasknutí žárovek všech signálů je indikováno pomocí proudových obvodů žárovek. Je možné eliminovat výpadek akčního členu použitím dvouvláknových žárovek, kdy při přerušení jednoho vlákna dojde k přepnutí na vlákno druhé a informování dispečera. Dojde-li i k porušení vlákna druhého a to na obou návěstidlech umístěných u stop čáry, je vhodné systém vypnout a na místo vyslat servisního technika. Pokud by na jednom návěstidle došlo k takové poruše, že by nesvítil pouze jeden signál, je možné systém provozovat dále, jelikož jsou zde umístěna návěstidla dvě. Zároveň je nezbytné poruchu co nejdříve odstranit.

### **6.3.2 Komunikace akčních členů s řadičem**

Vzhledem k navržené architektuře by komunikace SSZ s řadičem RMC probíhala po metalickém vedení. Po tomto vedení by docházelo přímo k rozsvícení jednotlivých signálů. Výpadek komunikace by mohl být zapříčiněn pouze přerušením vedení nebo závadou na výstupním modulu řadiče. Výpadek komunikace by byl detekován proudovým obvodem žárovek jako v předchozím případě. V obou případech je žádané systém vypnout, jelikož při tomto stavu, by na SSZ nesvítily žádné signály. Dále je nutné informovat dispečera o závadě.

## **6.4 Dopravní ústředna a komunikace s řadičem**

Porucha dopravní ústředny nebo komunikace s dopravní ústřednou není pro navržený systém velkou závadou, jelikož je schopen pracovat zcela automaticky. Z dopravní ústředny je možné systém RMC sice ovládat a dostávat od něj aktuální dopravní data, nicméně na jeho funkci za běžných podmínek nemá vliv.

### **6.4.1 Dopravní ústředna**

Spektrum příčin, které by znamenaly poruchu ústředny, je velice široké. Mohlo by se jednat např. o: technickou závadu, vliv přírodních živlů, teroristický útok, sabotáž a mnohé další. Výpadek ústředny by byl v první řadě rozpoznán dispečery na ústředně. Dále by bylo možné zjistit poruchu dopravní ústředny nebo komunikaci s ní z řadiče RMC.

### **6.4.2 Komunikace dopravní ústředny s řadičem**

Komunikace mezi ústřednou a řadičem probíhá dle navržené architektury po optických kabelech. Přerušení komunikace by mohlo nastat vlivem poruchy na vysílací či přijímací části nebo na samostatném přenosovém médiu. Porucha komunikace je indikována tím, že nedochází k pravidelnému příjmu dat z řadiče na ústředně. Závažnost poruchy závisí na využití topologii sítě. Z pohledu bezpečnosti se jeví jako vhodná varianta topologie typu kruh, která je využívána i na páteřních telekomunikačních a datových sítích. O ztrátě komunikace s řadičem je nutné opět varovat dispečera. Systém RMC by mohl být provozován dále v automatickém režimu s možností zásahu dispečera pouze místně přímo u řadiče pomocí místního ovládní.

## Závěr

Cílem diplomové práce bylo získání zkušeností s řídicími systémy, vytvoření mikrosimulačního modelu, návrh funkčních algoritmů, implementace algoritmů do řízení modelu a na řídicí systémy. Vybraným řídicím systémem byl programovatelný automat PLC. Jedním z cílů bylo také seznámení s různými prostředky detekce parametrů dopravního proudu a prostředky pro zobrazení akčních veličin řidičům vozidel. Dílčím cílem bylo porovnání modelu stávající situace (bez řízení) a modelu s implementovaným řízením RMC. Dalším dílčím cílem bylo analyzovat spolehlivost funkce navrženého systému řízení. Všechny zmíněné cíle diplomové práce byly splněny.

Teoretická část diplomové práce byla zaměřena na seznámení s problematikou a popisem principu funkce řízení na vjezdu. V této části rovněž proběhla analýza různých dopravních detektorů vhodných pro využití v systému RMC. Dále zde došlo k seznámení s akčními členy. Získány byly také informace o řízení na vjezdu z různých světových implementací.

Praktická část v první řadě zahrnovala zvolení vhodné lokality. Ve zvolené lokalitě byly provedeny potřebné úpravy pro možnost nasazení systému RMC. Nutnými úpravami pro požadovanou funkci systému byla instalace indukčních smyček, umístění návěstidel SSZ na přípojné rampě a úprava dopravního značení. Zjištěním parametrů hlavní komunikace mohla být nasimulována data pro tvorbu modelů. Po vytvoření modelů dopravy byly na jejich základě stanoveny parametry pro řízení. Pro navrhovaný systém řízení byly sestaveny jednotlivé algoritmy pro správnou funkci systému. Dále byl vytvořen mikrosimulační model lokality. Na tomto modelu došlo k simulaci stávajícího stavu bez řízení a výhledového stavu, ve kterém byly implementovány navržené algoritmy řízení. Data ze simulací byla vzájemně porovnána a vyhodnocena. Následně byly navržené algoritmy implementovány na prostředí programovatelných automatů prostřednictvím jazyka liniových schémat. Dále proběhlo testování naprogramovaných algoritmů v automatickém režimu přímo na programovatelném automatu v online módu. Analýza spolehlivosti funkce navrženého systému zahrnovala zkoumání příčin, následku i řešení v případě zjistitelných poruch, které by během chodu systému mohly případně nastat.

Navržený systém využívá k řízení vjezdu na dálnici pouze světelné signalizační zařízení. Systém by bylo vhodné doplnit o detekci průjezdu vozidel na signál stůj (červená), což zvýší míru respektování tohoto signálu řidiči. Parametry řízení stanovené simulací a následnou kalibrací nejsou pevně dané. V praxi by byly upraveny během zkušebního provozu. Vzhledem

k výsledkům simulací na základě dvou průběhů vstupních dat je zřejmé, že navržený systém je schopný plnit funkci i za velmi vysokých intenzit na dálnici. Tím pádem je vhodný i do budoucnosti s ohledem na růst dopravy. Při porovnání systému RMC se stávajícím stavem na testovacích datech došlo ke snížení průměrné obsazenosti o 2,25 %, zvýšení průměrné rychlosti o 4,28 km/h a celkové úspoře 21,77 VH za 4 h simulace. Horší bylo porovnání při použití pražského denního průběhu, kde došlo ke snížení průměrné obsazenosti o 0,78 %, zvýšení průměrné rychlosti o 1,23 km/h a celkové úspoře 15,18 VH za 24 h simulace.

## Seznam použitých zdrojů

### Knihy

- [1] PŘIBYL, P.: Inteligentní dopravní systémy a dopravní telematika. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. 184 s. ISBN 80-01-03122-5.
- [2] PŘIBYL, P. Svítek, M: Inteligentní dopravní systémy. Praha: BEN -technická literatura, 2001, 543 s. ISBN 80-7300-029-6.
- [3] TICHÝ, Tomáš. Řídicí systémy dopravy – Dopravní telematika. Praha, 2004. ČVUT v Praze Fakulta dopravní.
- [4] KRAUS, Karel, Zdeněk PLIŠKA a Pavel PŘIBYL. Technické podmínky 182 - Dopravní telematika na pozemních komunikacích. První. Praha: ELTODO EG,a.s., Novodvorská 14, 142 01 Praha 4, 2006. ISBN 80-239-8237-0.
- [5] BELINGER, Jindřich. Návrh systému pro liniové řízení dopravy. Praha, 2015. Bakalářská práce. FD ČVUT.
- [6] PTV Vissim 7: User manual. 4/24/2015 EN. Karlsruhe, Germany: PTV, 2015.
- [7] VISVAP 2.16: User manual. Karlsruhe, Germany: PTV, 2012.

### Internetové zdroje

- [8] Ramp Metering: A Proven, Cost-Effective Operational Strategy—A Primer. United States Department of Transportation - Federal Highway Administration: Office of operation [online]. 2014 [cit. 2015-12-14]. Dostupné z: <http://www.ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop14020/sec1.htm>
- [9] Prezentace výsledků sčítání dopravy 2010. Celostátní sčítání dopravy 2010 [online]. ŘSD ČR, 2010 [cit. 2016-12-08]. Dostupné z: <http://scitani2010.rsd.cz/pages/map/default.aspx>
- [10] AŽD PRAHA S.R.O. Systémy pro silniční dopravu: Liniové řízení [online]. [cit. 2015-03-31]. Dostupné z: <http://www.azd.cz/admin/files/Dokumenty/pdf/Produkty/Silnicni/Liniove-rizeni.pdf>

- [11] PŘIBYL, Ondřej. Měření a zpracování dat: Detektory zasahující do vozovky, úvod do detekce [online]. [cit. 2015-03-17]. Dostupné z:  
<http://zolotarev.fd.cvut.cz/mzd/ctrl.php?act=show,section,63>
- [12] AF-CITIPLAN S.R.O. Dopravní průzkumy [online]. 2010 [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: <http://www.af-cityplan.cz/pruzkumy.html>
- [13] Impact [online]. 2014 [cit. 2017-02-13]. Dostupné z: <http://www.igj.ro>
- [14] Evaluating Ramp Metering and Variable Speed Limits to Reduce Crash Potential on Congested Freeways using Micro-Simulation [online]. B. Tech Civil Engineering, Indian Institute of Technology Delhi, India, 2005 [cit. 2017-03-08].
- [15] Quantifying Effects of Ramp Metering on Freeway Safety [online]. Orlando, FL 32816, USA, 2005 [cit. 2017-03-08]. University of Central Florida.
- [16] KŘIVDA, a FRYČ. Teorie dopravního proudu: Dynamické charakteristiky [online]. [cit. 2015-06-22]. Dostupné z: <http://kds.vsb.cz/ord/tdp-dynamicke.htm>
- [17] SCARIZA, Joseph. Evaluation of Coordinated and Local Ramp Metering Algorithms using Microscopic Traffic Simulation [online]. 2003 [cit. 2017-03-22]. Dostupné z: [https://its.mit.edu/sites/default/files/documents/scariza\\_thesis.pdf](https://its.mit.edu/sites/default/files/documents/scariza_thesis.pdf). Massachusetts Institute of Technology.
- [18] Ceskedalnice.cz. Ceskedalnice.cz [online]. 2017 [cit. 2017-03-29]. Dostupné z: <http://www.ceskedalnice.cz/image/mapa-velka.png>
- [19] Mapy.cz [online]. 2017 [cit. 2017-03-29]. Dostupné z: <https://mapy.cz/zakladni?x=14.2210235&y=50.1503553&z=14&l=0>
- [20] Ročenka dopravy Praha 2015 [online]. In: . Praha: Technická správa komunikací hlavního města Prahy, s. 82 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.tsk-praha.cz/static/webbooks/Rocenka2015CZ/index.html>



## Seznam obrázků

Obr. 1: Schéma základních fyzikálních vazeb [4].....	13
Obr. 2: Funkční architektura RMC.....	14
Obr. 3: Fyzická architektura RMC .....	15
Obr. 4: Typická konfigurace RMC [4].....	17
Obr. 5: Princip narušení indukční smyčky [11].....	19
Obr. 6: Změna frekvence při průjezdu vozidla [11]. .....	20
Obr. 7: Záznam videodetekce [12] .....	21
Obr. 8: Tříbarevné návěstidlo [13] .....	22
Obr. 9: Lokální výsledky implementace RMC v USA [8].....	26
Obr. 10: Průběh obsazenosti před a po aplikaci RMC [8].....	27
Obr. 11: Princip řešení [8] .....	30
Obr. 12 : Dvoudimenzionální model [16] .....	31
Obr. 13: Algoritmus zapínání a vypínání RMC [17].....	34
Obr. 14: Algoritmus volby délky cyklu RMC [17] .....	35
Obr. 15: Algoritmus řízení fronty RMC [17] .....	36
Obr. 16: Označení zvoleného úseku [18] .....	37
Obr. 17: Situace [19] .....	38
Obr. 18: Mapa intenzit [9] .....	39
Obr. 19: Navržená funkční architektura RMC .....	40
Obr. 20: Navržená fyzická architektura RMC.....	41
Obr. 21: Simulace dat pro modely dopravy v prostředí PTV VISSIM 7 .....	43
Obr. 22: Model dopravy intenzita - rychlost .....	43
Obr. 23: Model dopravy intenzita – obsazenost.....	44
Obr. 24: Signální plán.....	46
Obr. 25: Navržený algoritmus vypnutí a zapnutí RMC .....	48
Obr. 26: Algoritmus volby signálního plánu .....	50
Obr. 27: Algoritmus aktivace signálního plánu.....	51
Obr. 28: Algoritmus signálního plánu SP_13.....	52
Obr. 29: Náhled na síť osazenou prvky .....	54
Obr. 30: Zobrazení SP_13 .....	55
Obr. 31: Testovací průběh vstupní intenzity .....	56
Obr. 32: Průběh obsazenosti po spojení obou směrů bez řízení s použitím testovacích dat ....	57

Obr. 33: Průběh rychlosti po spojení obou směrů bez řízení s použitím testovacích dat.....	57
Obr. 34: Vstupní průběh intenzit data Praha .....	58
Obr. 35: Průběh obsazenosti po spojení obou směrů bez řízení s použitím průběhu dat Praha	58
Obr. 36: Průběh rychlosti po spojení obou směrů bez řízení s použitím průběhu dat Praha....	59
Obr. 37: Průběh obsazenosti po spojení obou směrů s řízením s použitím testovacích dat .....	60
Obr. 38: Průběh rychlosti po spojení obou směrů s řízením s použitím testovacích dat.....	60
Obr. 39: Průběh obsazenosti po spojení obou směrů s řízením s použitím průběhu dat Praha	61
Obr. 40: Průběh rychlosti po spojení obou směrů s řízením s použitím průběhu dat Praha .....	61
Obr. 41: Průběh obsazenosti po spojení obou směrů porovnání s použitím testovacích dat....	62
Obr. 42: Průběh rychlosti po spojení obou směrů porovnání s použitím testovacích dat .....	62
Obr. 43: Aktivace časovače, uložení předchozího programu a vypnutí řízení.....	66
Obr. 44: Volba SP 15 nebo 16.....	67
Obr. 45: Volba signálního plánu 14.....	67
Obr. 46: Aktivace signálního plánu 0 .....	68
Obr. 47: Zobrazení signálů na SSZ a reset časovače.....	68

## Seznam tabulek

Tab. 1: Informační architektura RMC .....	14
Tab. 2: Rozdělení detektorů [10].....	18
Tab. 3: Hodnocení indukčních smyček [10].....	20
Tab. 4: Hodnocení videodetekce [10].....	21
Tab. 5: Shrnutí RMC přístupů [8] .....	29
Tab. 6: Navržená informační architektura RMC .....	40
Tab. 7: Pravidla řízení .....	45
Tab. 8: Použité proměnné v programu .....	65

## Seznam rovnic

1) Rovnice algoritmu požadované kapacity.....	31
2) Rovnice zpětnovazebního RMC – obsazenost.....	32
3) Rovnice zpětnovazebního RMC – doba zelené.....	32
4) Rovnice modelu intenzita – rychlost.....	44
5) Rovnice modelu intenzita – rychlost (dosazené koeficienty).....	44
6) Rovnice modelu intenzita – obsazenost.....	44
7) Rovnice modelu intenzita – obsazenost (dosazené koeficienty).....	44

## Seznam příloh

### Tištěné:

- A.1 Schéma situace
- A.2 Řízení VISVAP
- A.3 Program PLC RSLogix500

### Elektronické:

- B.1 Modely dopravy (Modely dopravy.xlsx)
- B.2 Program PLC, projekt RSLogix500 (DP.rss)
- B.3 Mikrosimulační model, projekt VISSIM (d7\_bustehrad\_rmc.inpx)
- B.4 Řízení VISVAP (rizeni.vv, rizeni.vap, signaly.pua, SP\_00.vv až SP\_16.vv, SP\_00.vap až SP\_16.vap)
- B.5 Vyhodnocení testovacích dat (Vyhodnocení\_test.xlsx)
- B.6 Vyhodnocení dat Praha (Vyhodnocení\_praha.xlsx)

Přílohy jsou součástí přiloženého CD.