

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

Fakulta chemickej a potravinárskej technológie

Evidenčné číslo: FCHPT-5415-61587

Využitie optimalizácie na zlepšenie dopravnej situácie

Bakalárska práca

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

Fakulta chemickej a potravinárskej technológie

Evidenčné číslo: FCHPT-5415-61587

Využitie optimalizácie na zlepšenie dopravnej situácie

Bakalárska práca

Študijný program: automatizácia, informatizácia a manažment v chémii a potravinárstve

Číslo študijného odboru: 2621

Názov študijného odboru: 5.2.14. automatizácia, 5.2.52. priemyselné inžinierstvo

Školiace pracovisko: Ústav informatizácie, automatizácie a matematiky

Vedúci záverečnej práce: doc. Ing. Michal Kvasnica, PhD.

Bratislava 2015

Martina Kollárová



ZADANIE BAKALÁRSKEJ PRÁCE

Študentka: **Martina Kollárová**
ID študenta: 61587
Študijný program: automatizácia, informatizácia a manažment v chémii a potravinárstve
Kombinácia študijných odborov: 5.2.14. automatizácia, 5.2.52. priemyselné inžinierstvo
Vedúci práce: doc. Ing. Michal Kvasnica, PhD.

Názov práce: **Využitie optimalizácie na zlepšenie dopravnej situácie**

Špecifikácia zadania:

Cieľom práce je navrhnuť a simulačne overiť optimalizačný prístup na zníženie zaťaženia cestnej siete v mestách s cieľom redukovať dopravné zápchy. Metóda bude založená na predikcii zaťaženia sektorov cestnej siete v čase s využitím princípov prediktívneho riadenia.

Úlohy:

- * výber vhodnej časti cestnej siete na optimalizáciu
- * návrh a implementácia optimalizačného problému, ktorý zistí vhodný profil zaťaženia cestnej siete
- * zber dát o aktuálnej dopravnej situácii na zvolenom dopravnom úseku
- * zhodnotenie kvality dosiahnutých výsledkov

Rozsah práce: 40

Riešenie zadania práce od: 16. 02. 2015

Dátum odovzdania práce: 24. 05. 2015

L. S.

Martina Kollárová
študentka

prof. Ing. Miroslav Fikar, DrSc.
vedúci pracoviska

prof. Ing. Miroslav Fikar, DrSc.
garant študijného programu

Podakovanie

Touto cestou chcem úprimne poďakovať môjmu školiteľovi, doc. Ing. Michalovi Kvasnicovi, PhD. za odbornú pomoc, trpezlivosť, pochopenie problematiky prediktívneho riadenia, cenné rady pri vytváraní optimalizačného problému a usmernenie pri tvorbe jednotlivých častí záverečnej práce. Osobitná vďaka patrí všetkým, ktorí boli ochotní a pomohli mi so zberom dát potrebných na riešenie optimalizačného problému.

Martina Kollárová

Bratislava, 2015

Abstrakt

Cieľom práce bolo navrhnúť optimálne riadenie na zníženie dopravných zápch na Račianskej ulici v Bratislave. V práci bola opísaná súčasná situácia a načrtáva ako sa s dopravnými zápchami vyrovnávajú mestá v zahraničí. V prvej časti záverečnej práce bol podľa teoretického podkladu vytvorený matematický model reálnej situácie. Ďalej bol podľa princípov prediktívneho riadenia navrhnutý optimalizačný problém. Optimalizácia mala robiť minimálne zásahy do aktuálnej dopravy, tak aby boli splnené ohraničenia na maximálnu obsadenosť jednotlivých sektorov. Optimalizačný problém bol vyriešený v MATLAB-e s použitím riešiteľa GUROBI. Výsledky zobrazovali situácie s konštantnou a premenlivou rýchlosťou v predikčnom horizonte.

Kľúčové slová:

Prediktívne riadenie; Optimalizácia dopravy; Dopravné zápchy.

Abstract

The goal of this thesis is to develop an optimal control algorithm to reduce traffic jams in the Račianska street in Bratislava. The thesis describes the current situation and outlines how other cities cope with traffic jams. Then, principles of model predictive control are outlined which serve as a basis to formulate the mathematical optimization problem to reduce traffic jams. The optimization determines the minimal corrections to the current traffic flow such that constraints on the maximal occupancy of individual traffic sectors are fulfilled. The thesis also reports real traffic data measured in distinct places of the selected traffic corridor. These data are fed into the optimization problem, which is formulated in MATLAB. Results of the optimization procedure are then interpreted and conclusions are drawn.

Keywords:

Model Predictive Control; Traffic optimization; Traffic jams.

Obsah

Zoznam obrázkov	3
Zoznam tabuliek	5
Úvod	7
1 Súčasný stav	9
1.1 Zahraníčie vs. Slovensko	11
1.1.1 Zahraníčie	11
1.1.2 Slovensko	13
2 Prediktívne riadenie	15
2.1 Prvky prediktívneho riadenia	16
2.1.1 Princípy	16
2.2 Model systému	17
2.3 Matematické vyjadrenie	19
2.3.1 Normy	20
3 Matematická formulácia problému	23
3.1 Matematický model	25
3.2 Účelová funkcia	27
3.2.1 Ohraničenia	28

4	Experimentálna časť	31
4.1	Zber dát	31
4.1.1	Namerané hodnoty	37
4.1.2	Reálna situácia	40
4.2	Riešenie v MATLAB-e	47
4.2.1	Výsledky	49
4.2.2	Rozšírenia	55
5	Implementácia do budúcnosti	67
	Záver	71
	Literatúra	73

Zoznam obrázkov

1.1	Kolóna na Račianskej ulici	10
1.2	Intenzity MHD v Bratislave.	11
1.3	Aplikácia Semaforey Bratislava	13
2.1	Schéma prediktívneho riadenia.	17
2.2	Grafická ukážka noriem: vľavo je 1 - norma, v strede 2 - norma a napravo ∞ - norma.	21
3.1	Schéma Račianskej ulice.	24
4.1	Aplikácia na počítanie áut v MATLAB-e.	32
4.2	Úsek: Pekná cesta - Nobelova.	35
4.3	Úsek: Nobelova - Sliáčska.	36
4.4	Úsek: Sliáčska - Jarošova.	36
4.5	Namerané údaje z Račianskej ulice.	38
4.6	Namerané údaje z Peknej cesty.	38
4.7	Namerané údaje z Nobelovej.	40
4.8	Namerané údaje zo Sliáčskej.	40
4.9	Obsadenosť sektora S_1 , ak sa všetky autá dostanú zo sektora do 5 minút.	41
4.10	Obsadenosť sektora S_2 , ak sa všetky autá dostanú zo sektora do 5 minút.	43

4.11 Obsadenosť sektora S_3 , ak sa všetky autá dostanú zo sektora do 5 minút.	43
4.12 Obsadenosť sektora S_1 , ak sa všetky autá nedostanú zo sektora do 5 minút.	44
4.13 Obsadenosť sektora S_2 , ak sa všetky autá nedostanú zo sektora do 5 minút.	44
4.14 Obsadenosť sektora S_3 , ak sa všetky autá dostanú zo sektora do 5 minút.	45
4.15 Optimálne riešenie akčných zásahov na vstupe z Račianskej ulice. . .	50
4.16 Optimálne riešenie akčných zásahov na vstupe z Peknej cesty. . . .	51
4.17 Optimálne riešenie akčných zásahov na vstupe z Nobelovej.	52
4.18 Optimálne riešenie akčných zásahov na vstupe zo Sliačskej ulice. . .	52
4.19 Križovatka na Račianskej so Sliačskou.	53
4.20 Optimálna obsadenosť sektora S_1	53
4.21 Optimálna obsadenosť sektora S_2	55
4.22 Optimálna obsadenosť sektora S_3	55
4.23 Optimálna obsadenosť sektora S_1 pri premenlivej rýchlosti.	59
4.24 Optimálna obsadenosť sektora S_2 pri premenlivej rýchlosti.	60
4.25 Optimálna obsadenosť sektora S_3 pri premenlivej rýchlosti.	61
4.26 Optimálne riešenie akčných zásahov na vstupe z Račianskej ulice pri premenlivej rýchlosti.	62
4.27 Optimálne riešenie akčných zásahov na vstupe z Peknej cesty pri premenlivej rýchlosti.	62
4.28 Optimálne riešenie akčných zásahov na vstupe z Nobelovej ulice pri premenlivej rýchlosti.	63
4.29 Optimálne riešenie akčných zásahov na vstupe zo Sliačskej ulice pri premenlivej rýchlosti.	64

<i>Zoznam obrázkov</i>	3
5.1 Súčasný stav na Račianskej ulici.	67
5.2 Optimálna vyťaženosť Račianskej ulice.	68

Zoznam tabuliek

4.1	Zber dát.	33
4.2	Priemerné namerané časy úsekov v rôznych dopravných situáciách. .	34
4.3	Dáta z Magistrátu.	34
4.4	Zozbierané dáta.	34
4.5	Tabuľka nameraných údajov.	39
4.6	Reálna situácia, ak všetky autá vyjdú za 5 minút.	42
4.7	Reálna situácia, ak všetky autá nevyjdú za 5 minút.	46
4.8	Optimálne rozmiestnenie áut.	54
4.9	Optimálne rozmiestnenie áut s premenlivou rýchlosťou.	65

Úvod

Automatické riadenie sa dlho vyvíjalo ako súčasť rôznych oblastí vedy a techniky. V súčasnosti sú takmer všetky procesy zautomatizované. Tieto princípy sa uplatňujú v rôznych technických systémoch (doprava, laboratórne zariadenia, energetika, medicína, ...). Realizuje sa tu obmedzenie ľudského zásahu, či zvýšenie bezpečnosti pri práci.

Optimalizácia je súbor postupov, ktoré sa snažia dosiahnuť zlepšenie aktuálneho stavu výrobného, či nevýrobného procesov. Nepretržité optimalizovanie prináša znížovanie nákladov, šetrenie času a efektívnosť práce. Optimalizácia je spojená so všednou činnosťou, ktorú vykonávame vedome alebo podvedome. Cieľom optimalizovania je nájsť najlepšie možné riešenie (optimálne). Najnázornejšie je, vysvetliť to na praktickom príklade.

V práci budeme hľadať optimálne riešenie jednotlivých vstupných prúdov áut do systému, ktorým je Račianska ulica, za predpokladu splnenia daných ohraňení. Prúdy áut budeme vpúšťať pomocou semaforov. Systém je rozdelený do troch sektorov, ktoré sú ohraňené maximálnou kapacitou, navyše ďalej predpokladáme, že nemôžeme dovoliť, aby do systému vchádzal záporný počet áut. Na základe týchto úvah sme sa rozhodli, že na riešenie problému využijeme neustále sa rozvíjajúce prediktívne riadenie.

Prediktívne riadenie vzniklo v sedemdesiatych rokoch dvadsiateho storočia. Prvé systémy riadené pomocou MPC (Model Predictive Control) boli veľmi po-

malé, pretože potrebovali veľkú výpočtovú náročnosť. Rozvoj výpočtovej techniky v posledných rokoch zamietli tieto nedostatky. V súčasnosti je neobmedzený priestor pre využitie MPC, od relatívne jednoduchých procesov s rýchlou dynamikou až po veľmi zložité, vrátane systémov s dlhými časmi oneskoreniami. Výraz „prediktívne riadenie“ označuje rôznorodosť riadiacich metód, ktoré explicitným spôsobom využívajú model procesu na získanie riadiaceho signálu minimalizáciou účelovej funkcie. Ako z názvu vyplýva, MPC sa dokáže pozerať do budúcnosti a berie do úvahy nielen súčasný, ale i budúci stav. Poľahky si poradí s väčším množstvom vstupných, stavových a výstupných veličín. Prirodzeným spôsobom včlení kladnú spätnú väzbu na kompenzáciu merateľných porúch.

Kapitola 1

Súčasný stav

S narastajúcim počtom áut na cestách často dochádza ku kolónam. Cesty, ktoré boli vybudované v predchádzajúcich desaťročiach nestačia pokrývať dnešnú intenzitu dopravy. Podľa štatistiky firmy TomTom [1] patrí Bratislave 129. priečka z celkových 218 najzapchatejších miest na Zemi.

Dopravná zápcha je stav na pozemných komunikáciách charakterizovaný spomalením rýchlosti, predĺžením jazdných časov a kolónami vozidiel. Spomínaný stav ciest sa opakuje každý deň počas pracovného týždňa takmer v celej Bratislave. Kritická situácia nastáva najmä v rannej špičke, keď sa mnoho ľudí potrebuje dopraviť do práce a škôl do centra mesta. Avšak podobné, i keď trochu miernejšie okolnosti sú aj poobede, keď sa všetci presúvajú naspäť domov. V bakalárskej práci sa budeme zaoberať optimalizovaním dopravnej situácie na Račianskej ulici medzi ulicami Pekná cesta a Jarošova. Podľa celoštátneho sčítania dopravy v roku 2010 prešlo po tejto komunikácii každý deň vyše 93 500 áut. Keďže odvtedy tieto čísla určite narástli, niet pochyb, že táto ulica nespĺňa kapacitné požiadavky na presúvajúce sa dopravné prostriedky.

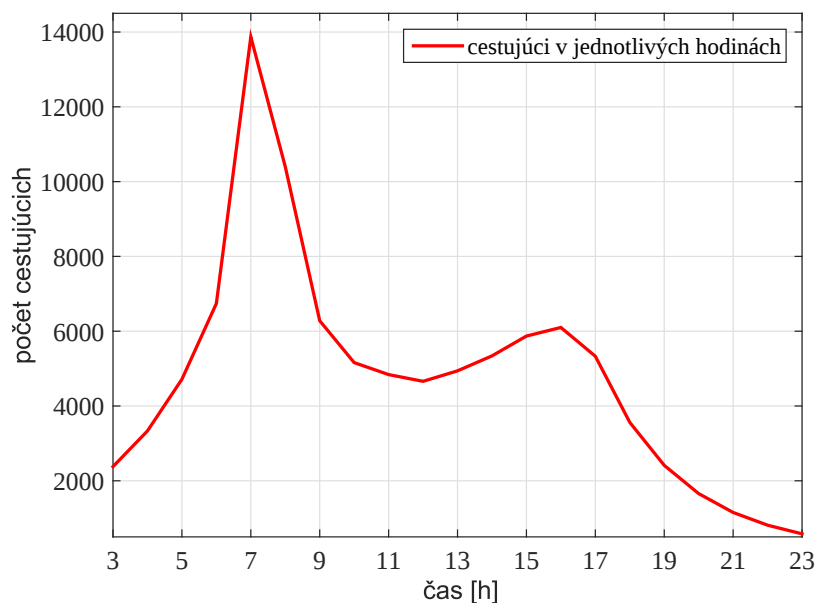
Jedným z dôvodov na výber daného úseku bola spomínaná štatistika, ale i neustále sa rozvíjajúca urbanizácia medzi Račianskym mýtom a Račou. Každým rokom pribúdajú nové sídliská a tým pádom aj počet áut, ktoré sa pochybujú po



Obr. 1.1: Kolóna na Račianskej ulici

tejto ceste. Dopravný podnik Bratislava (DPB) poukazuje na dvojnásobný vzrast cestujúcich prepravujúcich sa v mestskej hromadnej doprave (MHD) počas rannej špičky. Denná štatistika električkovej dopravy v Bratislave získaná zo zdroja [2] je vykreslená na obrázku 1.2.

Z grafu vyplýva, že najväčšia intenzita je v raňajších hodinách. V poobedných hodinách sa počet cestujúcich mierne zvýši, ibaže nie nárazovo. Táto štatistika síce platí pre električkovú dopravu, avšak môžeme uvažovať podobnú situáciu aj pre automobilovú. Ľudia sa najčastejšie premiestňujú práve autami, pretože to je najpohodlnejší spôsob dopravy. Zápchy vznikajú aj práve z toho dôvodu, že v takmer každom aute sedí len jeden človek, pričom auto je päť miestne.



Obr. 1.2: Intenzity MHD v Bratislave.

1.1 Zahraničie vs. Slovensko

Problémy s nedostatočnou kapacitou ciest je v každom väčšom meste vo svete. Každý štát ich rieši v rámci svojich možností. Alternatíva je napríklad rozšírenie už existujúcich ciest, avšak takáto alternatíva je drahá, časovo náročná a je to len krátkodobé riešenie. S narastajúcou kapacitou ciest priamo úmerne rastie aj počet áut, ktoré po nej prejdú a počase sa budú znova tvoriť kolóny. Schodnejšou možnosťou ako zvládnuť tento problém je nájst optimálne riešenie už existujúcich systémov.

1.1.1 Zahraničie

Mnohé mestá v zahraničí majú rôzne sankcie proti nadmernému počtu áut v ich centrách. Poplatok alebo daň zaplatená užívateľom cestnej premávky je implementovaná počas dopravnej špičky, aby sa odbremenila doprava. Namiesto použitia áut

môžu ľudia využiť mestskú hromadnú dopravu (MHD). Zavedenie takýchto opatrení podľa zdroja [3] priaznivo prispieva k znižovaniu kolón, dopravných nehôd, či výfukových plynov.

Paríž

V marci 2015 Paríž nekompromisne zareagoval na prudký nárast znečistenia ovzdušia, kvôli čomu smog zahalil Eiffelovu vežu. Jeden deň mohli v meste jazdiť autá s nepárnymi evidenčnými číslami a druhý deň s párnymi číslami. Výnimku s povolením vjazdu tvorili elektromobily, hybridy, aj autá vezúce aspoň tri osoby. Kompenzáciou pre ostatných vodičov je bezplatná MHD, či požičanie mestských bicyklov. Podľa starostu dieslové autá spôsobujú množstvo ochorení a úmrtí v Paríži, rozhodli sa tento problém riešiť radikálne. Do roku 2020 plánujú úplne zakázať vjazd do mesta vozidlám s dieslovým motorom.

Miláno

V Miláne sa najskôr zamerali na zníženie znečistenia ovzdušia a skvalitnenie životného prostredia. Najprv aplikovali program Ecopass, ktorý predstavoval poplatky za znečistenie, čo viedlo k zvýšeniu ekologických áut v meste. Po týchto opatreniach sa síce zlepšila kvalita ovzdušia, ale problém s dopravným preťažením sa nevyriešil. V roku 2012 bol Ecopass nahradený projektom s názvom oblasť C. Oblasť C spája spoplatňovanie dopravy a nízko emisnú zónu, kde je zakázaný vjazd vysoko znečisťujúcim vozidlám.

Štokholm

Mesto Štokholm na základe kamerového systému zabudovaného na všetkých vstupných cestách detekuje autá idúce do mesta. Vjazd do mesta je spoplatnený počas najhustejšej premávky a následne príde majiteľom auta účet. Cieľom takýchto po-

platkov nie je naplnenie mestskej pokladne, ale zmena správania obyvateľov. Po zavedení kamerového systému sa podarilo znížiť objem dopravy. Pozitívnymi dôsledkami sú väčšia priepustnosť ciest, lepší reakčný čas pohotovostných vozidiel, úspory na benzíne, i zlepšenie kvality ovzdušia.

1.1.2 Slovensko

Na Slovensku zatiaľ žiadne poplatky za vstup do mesta nie sú, ale čo nie je teraz, o pár rokov to môže byť realita. Ak sa vodiči v mestách ocitnú v kolóne, musia byť veľmi trpezliví, aby sa dopravili do stanoveného cieľa. Avšak aj Slováci sú vynaliezaví a hľadajú rôzne riešenia krízových situácií. Tím vývojárov vytvoril aplikáciu do mobilného telefónu pod názvom Semaforey Bratislava [4], ktorá funguje na princípe odpočítavania zmeny farby na semafore, čo vedie k plynulejšej premávke v meste. Názornú ukážku demonštruje obrázok 1.3. Aplikácia funguje na sekundu presne, avšak zatiaľ je vytvorená len pre niektoré bratislavské križovatky a je dostupná len pre operačný systém Android. Podobné systémy sú priamo súčasťou semaforov v mnohých zahraničných krajinách ako napríklad v Maďarsku, Rusku, či v Turecku.



Obr. 1.3: Aplikácia Semaforey Bratislava

Kapitola 2

Prediktívne riadenie

V práci budeme riešiť problematiku plynulej dopravy pomocou optimalizácie založenej na prediktívnom riadení. Takéto ponímanie dovoľí vziať do úvahy makroskopické dynamické správanie prúdu vozidiel. Spomenutý koncept môže získať najvhodnejší spôsob úpravy existujúcej situácie s cieľom minimalizovať zápchy.

Keďže sa prediktívne riadenie začalo naplno rozvíjať v posledných desaťročiach, zaraďujeme ho k moderným spôsobom riadenia [5]. MPC (Model Predictive Control) algoritmy sa od seba odlišujú modelom použitým na predstavenie procesu a riešením účelovej funkcie, ktorú je potrebné minimalizovať. MPC je schopné fungovať v dlhších časových intervaloch takmer bez akýchkoľvek zásahov.

Výhodou prediktívneho riadenia oproti bežným metódam je predvídavosť budúcich stavov systému a jednoduchá implementácia pre viacero vstupov, výstupov i stavov v systéme [6]. V praxi sa stretávame s ohraničeniami, s ktorými MPC nemá žiadny problém a vie si nimi hravo poradiť. Ako príklad môžeme uviesť ohraničenia na akčný zásah prietoku kvapaliny v zásobníku, či maximálne obmedzenie na stavovú veličinu. Tú predstavuje výška hladiny, ktorá nesmie prekročiť maximálnu povolenú výšku v zásobníku kvapaliny [7]. Pre MPC je veľmi dôležité poznať presný matematický model reálneho objektu, čo patrí medzi jeho nevýhody. Pod matematickým modelom si budeme predstavovať systém opísaný algebrickými, di-

ferenciálnymi rovnicami, ktoré opisujú správanie sa riadeného systému. Použitie modelu je potrebné na vypočítanie predikovaného výstupu v budúcich okamihoch.

2.1 Prvky prediktívneho riadenia

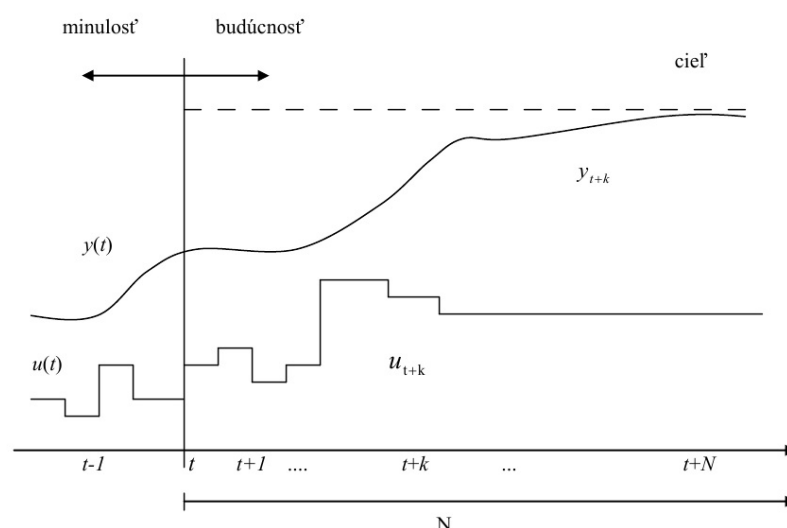
Medzi základné prvky prediktívneho riadenia patria: účelová funkcia, model, ohraňenia a predikčný horizont. Zámerom MPC je minimalizácia účelovej funkcie na vymedzenom predikčnom horizonte. Realizovaný je len prvý akčný zásah a celý postup minimalizácie sa opakuje v ďalšej perióde vzorkovania.

2.1.1 Princípy

Budúce výstupy pre zvolený časový interval N , nazývame predikčný horizont. Výstupy sú predikované v každom časovom okamihu t . Veličinu k voláme periódou vzorkovania a označuje veľkosť krokov horizontu. Výstupy $\hat{y}(t + k|t)$, pre $k = 1, \dots, N$ závisia od minulých vstupov a výstupov, od budúcich signálov $u(t + k|t)$, $k = 0, \dots, N - 1$. Tieto signály predstavujú optimalizované premenné, ktorých najvýhodnejšie hodnoty chceme získať. Množina nasledujúcich signálov je optimalizovaná podľa určeného kritéria a zároveň sa má čo najbližšie približovať k referencii, ktorá môže byť zároveň požadovanou hodnotou. Riadiaci signál $u(t|t)$ je zaslaný do procesu, z ktorého je vypočítaný výstup $y(t + 1)$ a ten je zároveň vstupom pre ďalší krok. Tento postup predstavuje, že na aktuálnej situácii stanovíme budúce správanie na horizonte. Avšak do úvahy berieme len prvý krok a ostatné nás nezaujímajú. Uvedeným spôsobom vytvárame zakaždým novú optimalizáciu a daný postup opakujeme v každej perióde vzorkovania. Grafická reprezentácia prediktívneho riadenia je na obrázku [2.1](#).

Keďže nie je zjednotený zápis prediktívneho riadenia, v rôznej literatúre sa môžeme stretnúť s odlišnými zápsmi, ale ich význam je rovnaký. V predchádza-

júcom texte sme použili dlhú formuláciu riadenia. Zápis $\hat{y}(t+k|t)$ je ekvivalentný s y_{t+k} a interpretujeme ho ako výstup v k -tom kroku predikcie, ktorá bola inicializovaná počiatočnou podmienkou nameranou v čase t . Ďalej budeme používať skrátenú formu zápisu prediktívneho riadenia pre jej jednoduchosť.



Obr. 2.1: Schéma prediktívneho riadenia.

2.2 Model systému

Na kvalitné predpovedanie budúcich výstupov je potrebné mať k dispozícii dostatočne kvalitný matematický model riadeného systému. Najjednoduchšou alternatívou je použiť lineárne, časovo nepremennivé matematické modely, pretože sú presnejšie a nevyžadujú veľa času stráveného riešením optimalizačného problému. Práve kvôli týmto dôvodom sa im budeme ďalej venovať.

Stavové modely sú matematické modely fyzikálneho systému, definujeme ich za pomoci vstupných, stavových a výstupných veličín. Umožňujú opísať systémy so zložitou vnútornou štruktúrou, využívajú maticové počty. Riadený systém je

opísaný spojitým modelom:

$$\dot{x} = \tilde{A}x(t) + \tilde{B}u(t) + \tilde{E}d(t) \quad (2.1)$$

kde $x(t)$ je vektor stavov v čase t , $u(t)$ je vektor akčných zásahov a $d(t)$ je vektor nameraných porúch.

Spojité model (2.1) prevedieme na diskretný pomocou diskretizácie so zvolenou periódou vzorkovania Δt :

$$\dot{x} \approx \frac{x(t + \Delta t) - x(t)}{\Delta t} = \tilde{A}x(t) + \tilde{B}u(t) + \tilde{E}d(t) \quad (2.2a)$$

$$x(t + \Delta t) = Ax(t) + Bu(t) + Ed(t) \quad (2.2b)$$

Všeobecne sa diskretný model zapisuje:

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + Ed_k \quad (2.3a)$$

$$y_k = Cx_k + Du_k \quad (2.3b)$$

$$x_0 = x(t) \quad (2.3c)$$

x je stavový vektor, d je vektor porúch, y vektor výstupov, u je akčný zásah (vektor vstupov). A je matica opisujúca interakciu stavov, B je matica určujúca vplyv akčných zásahov na stavy, E zachytáva vplyv porúch, C je matica výstupu, D je matica opisujúca vzťah medzi vstupmi a výstupmi (často býva nulová). Premenná k označuje periódu vzorkovania, rovnica (2.3c) označuje začiatočnú podmienku, teda stav v ktorom je systém na začiatku.

2.3 Matematické vyjadrenie

Všeobecný matematický zápis prediktívneho riadenia s nenulovou referenciou môžeme zapísať napríklad ako stavovú reguláciu:

$$\min \sum_{k=0}^{N-1} (\|Q_x(x_{t+k} - x_{\text{ref}})\|_p + \|Q_u(u_{t+k} - u_{\text{ref}})\|_p) \quad (2.4a)$$

$$s.t. \ x_{t+k+1} = Ax_{t+k} + Bu_{t+k}, \ k = 0, \dots, N-1 \quad (2.4b)$$

$$x_t = x(t) \quad (2.4c)$$

$$x_{t+k} \in \mathbb{X}, \ k = 0, \dots, N-1 \quad (2.4d)$$

$$u_{t+k} \in \mathbb{U}, \ k = 0, \dots, N-1 \quad (2.4e)$$

alebo podobne vyzerujúcu reguláciu výstupov:

$$\min \sum_{k=0}^{N-1} (\|Q_y(y_{t+k} - y_{\text{ref}})\|_p + \|Q_u(u_{t+k} - u_{\text{ref}})\|_p) \quad (2.5a)$$

$$s.t. \ x_{t+k+1} = Ax_{t+k} + Bu_{t+k}, \ k = 0, \dots, N-1 \quad (2.5b)$$

$$y_{t+k} = Cx_{t+k} + Du_{t+k}, \ k = 0, \dots, N-1 \quad (2.5c)$$

$$x_t = x(t) \quad (2.5d)$$

$$x_{t+k} \in \mathbb{X}, \ k = 0, \dots, N-1 \quad (2.5e)$$

$$u_{t+k} \in \mathbb{U}, \ k = 0, \dots, N-1 \quad (2.5f)$$

$$y_{t+k} \in \mathbb{Y}, \ k = 0, \dots, N-1 \quad (2.5g)$$

Účelová funkcia je vyjadrená normami, ktoré predstavujú vzdialenosť predpovedaných stavov x_{t+k} a vstupov u_{t+k} od referenčného bodu. Q_x , Q_u sú váhové matice, parameter p určuje stupeň normy, konštanta N označuje predikčný horizont a k počet predikčných krokov. Rovnice (2.4b) a (2.5b) nazývame predikčnými rovnicami. Ohraničenia pre stavy sú vyjadrené v (2.4d) a (2.5e), pre vstupy v

(2.4e) a (2.5f) a pre výstupy v (2.5g). Všetky podmienky vrátane účelovej funkcie sa opakujú N-krát, až na tú, ktorá predstavuje začiatočnú podmienku (2.5d), ktorá označuje stav systému na začiatku optimalizácie.

2.3.1 Normy

Pomocou normy môžeme priradiť každému nenulovému vektoru nezáporné reálne číslo. Norma je nulová, ak sú dva body v priestore rovnaké. Všeobecne ich môžeme zapísať ako p-normu

$$\|x\|_p = \left(\sum_{i=1}^n |x_i|^p \right)^{1/p} \quad (2.6)$$

Na množine n -rozmerných reálnych vektorov definujeme euklidovskú normu vektora $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ nasledovne: $\|x\| = \sqrt{(x_1^2 + \dots + x_n^2)}$. Euklidovské normy teda vyjadrujú vzdialenosť dvoch bodov v určitom priestore. Dosadením čísla 2 do rovnice (2.6) vzniká 2-norma vektora x . Dva norma dáva sumu jednotlivých prvkov umocnených na druhú, ktoré sú pod druhou odmocninou. Označuje najkratšiu vzdialenosť bodu x od začiatku súradnicovej sústavy, čo vyplýva z Pytagorovej vety.

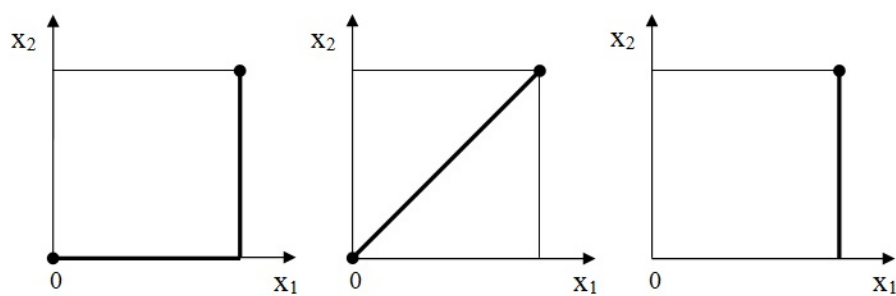
$$\|x\|_2 = \left(\sum_{i=1}^n |x_i|^2 \right)^{1/2} \quad (2.7)$$

Najčastejšie používané sú jedna a nekonečno norma. Grafické stvárnenie noriem je na obrázku 2.2. Jedna norma vektora x je suma absolútnych hodnôt vektora x

$$\|x\|_1 = \sum_i |x_i| \quad (2.8)$$

Špeciálnou normou je nekonečno norma, ktorá sa udáva ako maximálna hodnota súradníc

$$\|x\|_{\infty} = \max_i |x_i| \quad (2.9)$$



Obr. 2.2: Grafická ukážka noriem: vľavo je 1 - norma, v strede 2 - norma a napravo ∞ - norma.

Kapitola 3

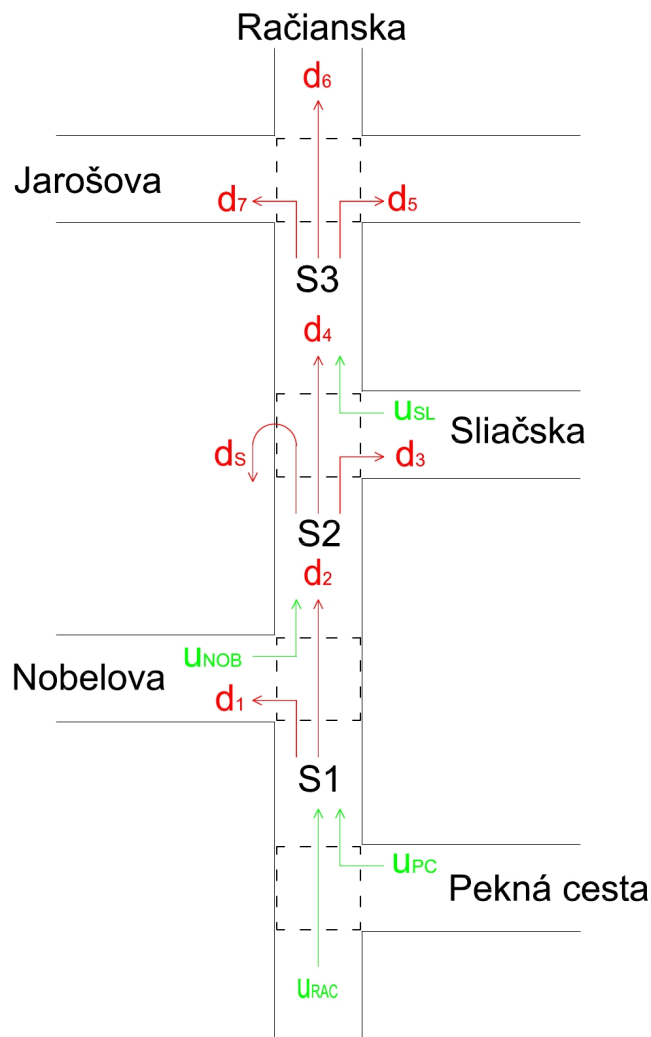
Matematická formulácia problému

Na dopravu platia rovnaké dynamické vlastnosti ako pre nestla čiteľné kvapaliny, čo znamená, že zápcha vzniká vtedy, keď autá pritekajú rýchlejšie ako stíhajú odtekať. Vozidlá ju spôsobujú, ak musia zastaviť, spomaliť či odbočiť. Keď zastane prvé auto, všetky ostatné za ním musia takisto zastaviť a dochádza k neželanej akumulácii. K spomaleniu na cestách prispievajú aj ľudské reflexy potrebné pri rozbehu.

Cieľom bakalárskej práce je navrhnúť riešenie na odbremenenie dopravy pozdĺž Račianskej ulici za súčasnej situácie, teda bez rozširovania ciest či zmeny organizácii dopravy. Úlohou je teda zoptimalizovať vstupné toky vozidiel do vybraných úsekov podľa obr. 3.1 medzi Peknou cestou a Jarošovou ulicou. Prípadne motivovať ľudí, aby využili túto trasu mimo rannej špičky.

Východiskom je tvorba dopravného modelu v danom úseku, pomocou ktorého možno vytvoriť alternatívne návrhy a úpravy premávky. Základom modelovania je čo najvernejšie simulovať vzájomné ovplyvňovanie sa a pohyb áut na cestnej komunikácii. Výhodou simulácie dopravy je možnosť nahliadnuť do existujúceho systému bez jeho narušenia ako napríklad rôznymi dopravnými prieskumami. S po-

užitím vhodného softvéru môžeme modelovať a simulovať stále rozsiahlejšie siete. Výsledkom sú ľahko pochopiteľné výsledky pre širokú verejnosť, ktoré môžeme aplikovať do reálneho prostredia. Existujú aj určité nevýhody modelovania dopravy. Môžeme zostaviť presný model situácie na cestách, avšak bez potrebných údajov o zaťažnosti je takmer nepoužiteľný. Každý deň je dopravná situácia iná, avšak môžeme predpokladať, že na malom úseku je takmer rovnaká.



Obr. 3.1: Schéma Račianskej ulice.

3.1 Matematický model

Odvodený model pozostáva z matematického modelu, ktorý sa využíva na riadenie budúceho výstupu zo systému s využitím aktuálnych informácií. V našom systéme sú tri stavové veličiny (S_1, S_2 a S_3), kde S_1 je úsek medzi Peknou cestou a Nobelovou, S_2 je časť Nobelova - Sliáčska ulica, S_3 je úsek medzi Sliáčskou a Jarosovou ulicu. Stavové veličiny reprezentujú množstvo áut v jednotlivých sektoroch, pre ďalšie úvahy je potrebné klasifikovať vstupné veličiny. Budeme rozlišovať tie, čo vieme ovládať, ktoré nazývame akčné zásahy ($u_{\text{RAC}}, u_{\text{PC}}, u_{\text{NOB}}, u_{\text{SL}}$), kde u_{RAC} reprezentuje množstvo áut vstupujúcich do 1. sektoru z Račianskej ulice, u_{PC} je taktiež vstupom do 1. sektoru avšak z Peknej cesty, u_{NOB} sú autá vstupujúce do 2. sektoru z Nobelovej a u_{SL} je vstupným prúdom do sektoru 3 zo Sliáčskej ulice. Ostatné veličiny, ktoré ovládať nedokážeme, sú poruchy ($d_1 - d_7, d_S$), pričom d_S reprezentuje autá, ktoré sa otáčajú do protismeru. Model v spojitom čase môžeme opísať nasledovne:

$$\dot{S}_1 = u_{\text{RAC}} + u_{\text{PC}} - d_1 - d_2 \quad (3.1a)$$

$$\dot{S}_2 = u_{\text{NOB}} + d_2 - d_3 - d_4 - d_S \quad (3.1b)$$

$$\dot{S}_3 = u_{\text{SL}} + d_4 - d_5 - d_6 - d_7 \quad (3.1c)$$

Tento model predstavuje základné akumulčné rovnice, ktoré vyjadrujú rozdiel medzi vstupmi a výstupmi do/z jednotlivých sektorov. Na základe predchádzajúcich

rovníc zapíšeme maticový tvar modelu v spojitom čase:

$$\begin{bmatrix} \dot{S}_1 \\ \dot{S}_2 \\ \dot{S}_3 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} u_{\text{RAC}} \\ u_{\text{PC}} \\ u_{\text{NOB}} \\ u_{\text{SL}} \end{bmatrix} + E \begin{bmatrix} d_2 \\ d_1 \\ d_4 \\ d_8 \\ d_3 \\ d_6 \\ d_7 \\ d_5 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Dosadením do všeobecného tvaru podľa (2.3a) dostaneme nasledujúce matice stavového opisu:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad E = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Keďže MPC formulácia (2.4) pracuje s modelom v diskretnom čase je potrebné dané matice pretransformovať do diskretného času. Diskrétny model má podobný tvar ako v rovnici (2.2a):

$$\dot{S} \approx \frac{S(t + \Delta t) - S(t)}{\Delta t} = \tilde{A}S(t) + \tilde{B}u(t) + \tilde{E}d(t) \quad (3.4a)$$

$$S(t + \Delta t) = \Delta t \tilde{A}S(t) + \Delta t \tilde{B}u(t) + \Delta t \tilde{E}d(t) + S(t) \quad (3.4b)$$

$$S(t + \Delta t) = (I + \Delta t \tilde{A})S(t) + \Delta t \tilde{B}u(t) + \Delta t \tilde{E}d(t) \quad (3.4c)$$

$$S(t + \Delta t) = AS(t) + Bu(t) + Ed(t) \quad (3.4d)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \Delta t & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Delta t \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$E = \begin{bmatrix} -\Delta t & -\Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \Delta t & 0 & -\Delta t & -\Delta t & -\Delta t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 & -\Delta t & -\Delta t & -\Delta t \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Experimentálne sme zistili pomery, v akých sa prerozdeľujú autá vychádzajúce zo sektorov. Vypočítané pomery sme dosadili do nasledujúcich podmienok:

$$d_1 = 0.24S_1 \quad d_2 = 0.76S_1 \quad (3.7a)$$

$$d_3 = 0.24S_2 \quad d_4 = 0.68S_2 \quad d_5 = 0.08S_2 \quad (3.7b)$$

$$d_6 = 0.05S_3 \quad d_7 = 0.5S_3 \quad d_8 = 0.45S_3 \quad (3.7c)$$

3.2 Účelová funkcia

Na riešenie optimalizačného problému zavedieme MPC tak, aby ho bolo možné vyriešiť v každej perióde vzorkovania. Použili sme účelovú funkciu, ktorej zodpovedá kritérium jedna normy (2.8), čo znamená, že minimalizujeme rozdiel medzi aktuálnymi vstupmi od konkrétnej referencie. Matematickú rovnicu prediktívneho riadenia môžeme napísať v nasledujúcom tvare:

$$\min \sum_{k=0}^{N-1} \|V_k(u_k - r_k)\|_1 + \|Q_s y_k\|_1 \quad (3.8a)$$

$$s.t. \quad S_{k+1} = AS_k + Bu_k + Ed_k, \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (3.8b)$$

$$0 \leq S_k \leq S_{max} \quad (3.8c)$$

$$S_0 = S(t) \quad (3.8d)$$

Účelová funkcia predstavuje rozdiel medzi reálnym tokom áut a optimalizovaným, pričom jedna norma nám hovorí, že do úvahy berieme hodnotu rozdielu vstupu od referencie, bez ohľadu na či je záporná alebo nie. Konštanta N predstavuje predikčný horizont, na základe obrázku 1.2 sme ho zvolili od 6:00 do 10:00, pretože v tomto intervale dosahuje doprava najväčšiu intenzitu. Keďže zvolená perióda vzorkovania bola $\Delta = 5$ minút, hodnota predikčného horizontu bola stanovená na $N = 48$. Premenná k označuje krok predikčného horizontu. Optimalizovaná premenná je u , referenciu označujeme r , vzhľadom na ňu optimalizujeme u . Referencia predstavuje reálne namerané toky áut v jednotlivých periódach vzorkovania. V nazývame váhovými koeficientmi, ktoré udávajú väčšiu dôležitosť v určených 5-minutovkách. Q_s je váhová matica. Penalizácia y_k značí mäkké ohraničenie, ktoré dovoľuje porušiť ohraničenie na maximálnu kapacitu sektorov. Bližšie sa týmto ohraničeniam budeme venovať v kapitole 4.2.2. Rovnica (3.8b) sa označuje ako rovnica predikcie, tieto podmienky sa opakujú v každej perióde vzorkovania, zatiaľ čo (3.8d) je začiatočná podmienka a neopakuje sa. Symboly v zátvorkách predstavujú krok v aktuálnom čase a dolné indexy sú budúci alebo predikovaný krok.

3.2.1 Ohraničenia

Ohraničenia predstavujú rovince (3.8b), (3.8d). Avšak musíme zadať aj obmedzenia pre maximálnu kapacitu sektorov

$$0 \leq S_n \leq S_{n, \max} \quad (3.9)$$

kde $n = 1, 2, 3$. Maximálnu kapacitu sektorov sme určili z dĺžky jednotlivých sektorov a priemer dĺžky jedného auta.

Dĺžky sektorov v metroch sú:

$$S_1 = 1100 \quad S_2 = 1700 \quad S_3 = 400 \quad (3.10)$$

Priemernú dĺžku jedného auta aj s rozstupom od vozidla pred a za ním sme zvolili na 9m. V každom sektore sú dva jazdné pruhy. Na základe týchto predpokladov je najväčšia obsadenosť sektorov vypočítaná nasledovne:

$$S_{1, \max} = \frac{1100}{9} 2 = 244 \quad (3.11a)$$

$$S_{2, \max} = \frac{1700}{9} 2 = 377 \quad (3.11b)$$

$$S_{3, \max} = \frac{400}{9} 2 = 89 \quad (3.11c)$$

Do jednotlivých sektorov nemôžeme vpustiť záporný počet áut a takisto z nich nesmieme vypustiť viac áut ako ich tam momentálne je. Túto podmienku môžeme vyjadriť podľa obrázku 3.1 nasledujúcimi vzťahmi:

$$0 \leq d_1 + d_2 \leq S_1 \quad (3.12)$$

$$0 \leq d_3 + d_4 + d_8 \leq S_2 \quad (3.13)$$

$$0 \leq d_5 + d_6 + d_7 \leq S_3 \quad (3.14)$$

Pre všetky poruchové a vstupné veličiny platí, že sú nezáporné, nemôžeme predpokladať záporné počty áut.

$$u_{PC}, u_{RAC}, u_{NOB}, u_{SL} \geq 0 \quad (3.15)$$

$$d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6, d_7, d_8 \geq 0 \quad (3.16)$$

Kapitola 4

Experimentálna časť

4.1 Zber dát

V bakalárskej práci sa zaoberáme reálnou dopravnou situáciou, ktorá nastáva každý deň počas týždňa po celej dĺžke Račianskej ulice. Na overenie nami vytvoreného optimalizačného problému sme potrebovali získať reálne dáta, ktoré sme následne vyhodnocovali. Obrázok 3.1 znázorňuje 3 križovatky so vstupnými prúdmi, z týchto križovatiek sme zozbierali dáta v rôznych dňoch. Na pripomenutie, dáta sme zbierali od šiestej do desiatej hodiny, kumulovane v 5 minútových intervaloch. Každé stanovište sme si museli prísť obhliadnuť už pred šiestou hodinou rannou, aby sme zhodnotili odkiaľ sa budú najlepšie sledovať prichádzajúce autá. Rozpis meraní, ktoré sme uskutočnili v apríli sa nachádza v tabuľke 4.1. Keďže je každý deň i týždeň špecifický, nazbierané dáta sa nedajú presne implementovať na každý za sebou idúci deň. Avšak môžeme tvrdiť, že situácia jednotlivých dní sa opakuje každý týždeň. Výsledky merania môžu byť mierne skreslené aj tým, že nám zakaždým pomáhal so zberom niekto iný. Poprípade nám niektoré údaje z niektorých okamihov unikli a tak sme ich extrapolovali z predchádzajúcich a nasledujúcich časových intervalov.

Naša metóda na počítanie sa vyvíjala v čase, po každom meraní sme boli

skúsenejší a nachádzali sme stále vhodnejšie spôsoby rátania. Po niekoľkých zapisovaniach na papier sa ako najúčinnnejšia pomôcka na rátanie áut sa osvedčil skript napísaný v MATLAB-e. Ukážka aplikácie je na obrázku 4.1. V aplikácii sú vytvorené počítadlá pre jednotlivé prúdy, každým ťuknutím do prednastavených kláves sa zvýši počet o 1, prípadne o 10. Ak sme sa pomýlili a zarátali auto do zlej kolónky, využili sme klávesy na odčítanie áut. Po každých piatich minútach sa všetky počítadlá vynulovali a údaje sa uložili do textového súboru. Obmedzujúcim faktorom tejto aplikácie je nutnosť mať k dispozícii notebook s dlhou výdržou batérie, keďže potrebuje pracovať nepretržite 4 hodiny.



Obr. 4.1: Aplikácia na počítanie áut v MATLAB-e.

V modelovej situácii sme predpokladali, že pri zápche bude väčší počet pritekajúcich áut do systému. Avšak pri zbieraní reálnych dát sme zistili, že to tak nie je. Pozorovaním bolo zistené, že čím je premávka intenzívnejšia, autá idú pomalšie a nestihnú všetky vyjsť zo sektora do piatich minút. Tým pádom sa sektory plnia a vzniká dopravná zápcha, čo je neželaný stav, pretože do sektorov nemôžu prichádzať ďalšie autá. Čiže z optimalizácie by vyšlo, že je všetko v poriadku a nič

Tabuľka 4.1: Zber dát.

Deň	Dátum	Miesto
streda	8.4.2015	Nobelova
streda	15.4.2015	Sliačska
pondelok	20.4.2015	Nobelova
utorok	21.4.2015	Pekná cesta
piatok	24.4.2015	Sliačska
pondelok	27.4.2015	Sliačska

netreba vylepšovať, čomu nezodpovedá realita. Podľa priemernej rýchlosti áut sme označili dopravné situácie nasledujúcimi farbami: zelená - plynulá, žltá - zhustená a červená - veľmi pomalá premávka.

Na základe týchto situácií a experimentálnym meraním sme zistili koeficienty, ktorými musíme prenásobiť počty zmeraných dát, aby sme sa priblížili k reálnej situácii. Meranie na získanie exaktných koeficientov sme zrealizovali viackrát, tým, že sme zmerali za aký čas sa nám podarí prejsť každým úsekom. Z nameraných časov sme urobili priemerný, za bázu bola zvolená žltá situácia, síce predstavuje zhustenú premávku, ale je stále dostatočne plynulá. V tabuľke sú uvedené namerané časy. Spôsob výpočtu bol nasledovný:

$$\text{koeficient} \quad \text{červenej} = \frac{\text{červená}}{\text{žltá}} \quad (4.1a)$$

$$\text{koeficient} \quad \text{zelenej} = \frac{\text{zelená}}{\text{žltá}} \quad (4.1b)$$

Na križovatke Račianska a Pekná cesta je nainštalovaná kamera, z ktorej sme sa snažili získať údaje. Po mailovej komunikácii s Magistrátom Bratislavy sme získali údaje nielen zo spomínanej križovatky, ale zo všetkých kde sa nachádzajú semaforey v optimalizovanom úseku. Počty áut získavajú pomocou senzorov umiestnených na semaforoch. Autá sú zrátané v hodinových intervaloch a v každom jazdnom pruhu osobitne. Údaje o intenzite sú z roku 2013, avšak už vtedy bola

Tabuľka 4.2: Priemerné namerané časy úsekov v rôznych dopravných situáciách.

Situácia	Úsek	Čas [s]	Koeficient
zelená	S_1	117	0.16
	S_2	127	0.13
	S_3	53	0.29
žltá	S_1	290	-
	S_2	338	-
	S_3	92	-
červená	S_1	754	2.6
	S_2	946	2.8
	S_3	184	1.4

Račianska ulica preplnená, takže ich môžeme predpokladať, že sú veľmi podobné ako v roku 2015. Naše dáta sme porovnali s údajmi z Magistrátu v tabuľkách 4.3 a 4.4 aj graficky.

Tabuľka 4.3: Dáta z Magistrátu.

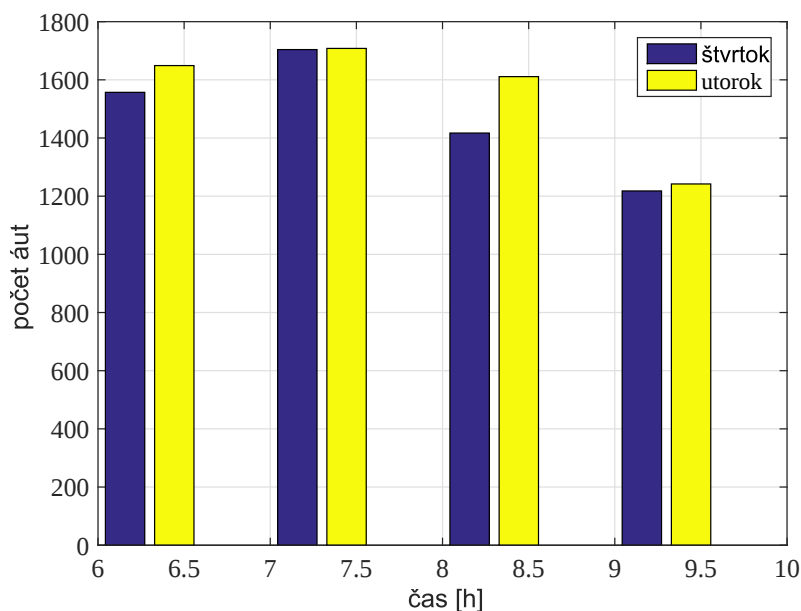
Úsek	Deň	počet áut za hodinu			
		6:00 - 7:00	7:00 - 8:00	8:00 - 9:00	9:00 - 10:00
PC - NOB	štvrtok	1557	1704	1417	1218
NOB - SL	utorok	1338	1515	1422	1382

Tabuľka 4.4: Zozbierané dáta.

Úsek	Deň	počet áut za hodinu			
		6:00 - 7:00	7:00 - 8:00	8:00 - 9:00	9:00 - 10:00
PC - NOB	utorok	1649	1708	1611	1242
NOB - SL	pondelok	1606	1617	1578	1309
NOB - SL	streda	1606	1617	1678	1309
SL - JAR	pondelok	1403	1385	1332	1241
SL - JAR	streda	1449	1451	1466	1299
SL - JAR	piatok	1469	1409	1476	1144

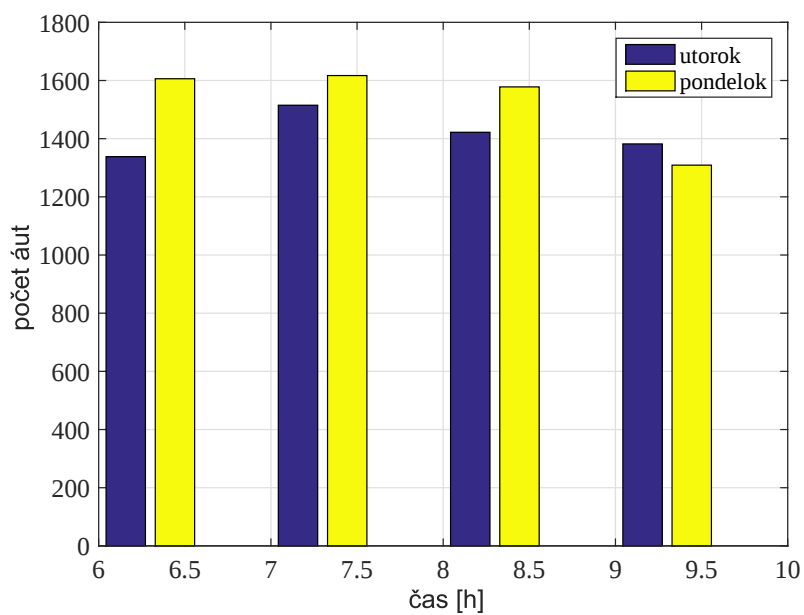
Pre názornejšiu ukážku sme zobrazili celkový počet áut, ktorý prejde cez Račiansku ulicu v daných úsekoch. Medzi údajmi z magistrátu chýba križovatka Račianska a Sliacská, pretože na tejto križovatke nie sú žiadne semaforey. Aby sme získali čo najpresnejšie informácie o situácii v tomto úseku, uskutočnili sme tu

zber dát v rôznych dňoch, urobili sme z nich priemer, ktorý sme využili na riešenie optimalizačnej úlohy.



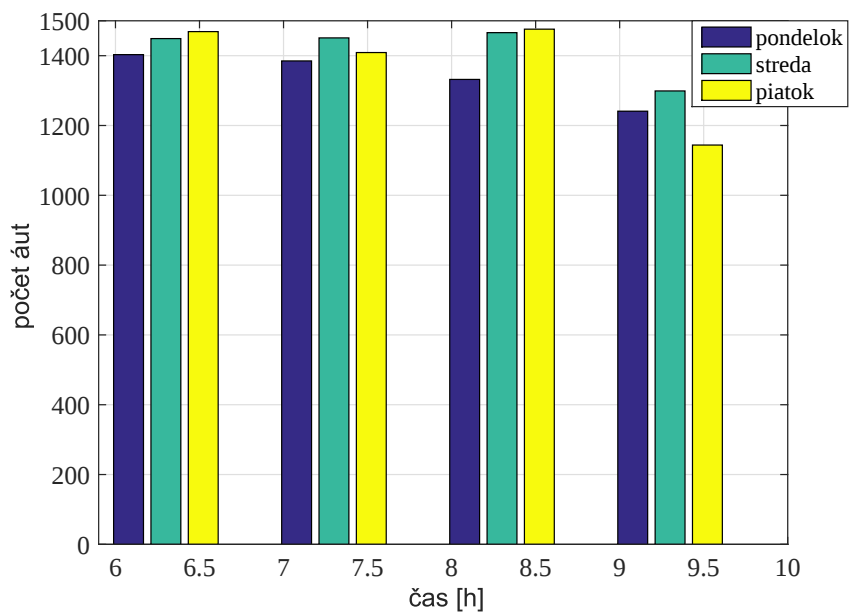
Obr. 4.2: Úsek: Pekná cesta - Nobelova.

Modrou farbou na obr. 4.2 a 4.3 sú znázornené údaje z Magistrátu Bratislavy a žltou nami zozbierané dáta. Porovnaním môžeme zhodnotiť, že oproti roku 2013 sa počty áut, ktoré prechádzajú týmto úsekom vo veľkej miere nelíšia. Rozdiely v stĺpcoch môžu byť spôsobené rôznymi pozorovacími dňami, ročným obdobím, počasím, psychickým rozpoložením vodiča. Počasie značne ovplyvňuje situáciu na cestách, ak prší alebo sneží, ľudia jazdia opatrnejšie, šoférovanie prispôbujú šmyklavej vozovke, čo znamená zníženie rýchlosti. Ak idú autá pomalšie, sektory sa zaplňajú rýchlejšie, čo zapríčiňuje zápchy. Na obrázku 4.4 sú vykreslené počty áut, ktoré sme namerali v rôznych dňoch počas týždňa. Hodnoty v grafe počas jednotlivých hodín v rôznych dňoch sú takmer totožné, z čoho vyplýva, že situácia v danom úseku je kritická každý deň. V každom úseku je najviac pohybujúcich sa áut medzi siedmou a ôsmou hodinou, väčšina ľudí sa totiž presúva do



Obr. 4.3: Úsek: Nobelova - Sliáčska.

práce či škôl práve v tomto čase.



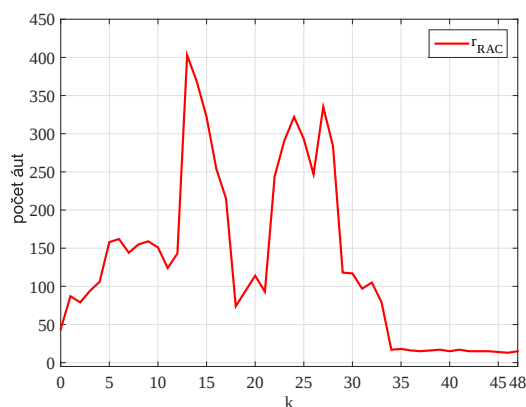
Obr. 4.4: Úsek: Sliáčska - Jarošova.

4.1.1 Namerané hodnoty

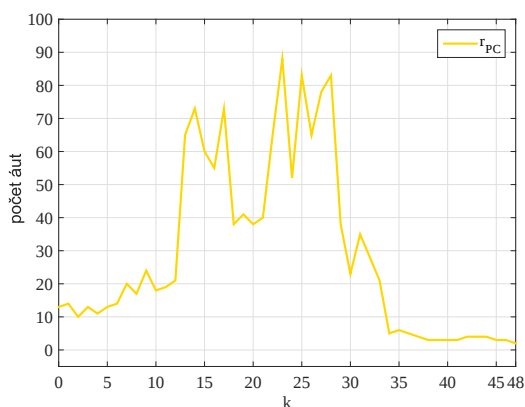
Doteraz sme porovnávali počet prejdenných áut vybranými úsekmi v hodinových intervaloch. Na rozdiel od Magistrátu my sme vedeli exaktne porovnať naše dáta s ich, pretože sa dajú jednoducho sčítať 5-minutovky a získame množstvo prechádzajúcich áut za hodinu v daných úsekoch. Avšak Magistrát by ich údaje nevedel rozdeliť na 5-minutovky, pretože za každých päť minút neprejde rovnaký počet áut cez sektory, čo zamedzuje detailnejšie porovnanie. Nami zozbierané dáta vieme detailnejšie spracovať, pretože menší časový interval presnejšie opisuje reálnu dopravnú situáciu, aj napriek tomu, že sme optimalizačný problém riešili s priemernými hodnotami z rôznych dní v týždni. Vykreslené dáta sme navýšili koeficientom pre červenú fázu a pre zelenú sme ich znížili podľa tabuľky koeficientov 4.2. Zvýšenie hodnoty áut bolo potrebné, aby sme simulačne vytvorili zápchu. Reálne pri zbere dát sme síce videli kolóny, ale pri počte prejdenných áut za 5 minút to zrejme nebolo, pretože za zvolený časový interval sa všetky autá nedokázali dostať von zo sektoru.

Obrázok 4.5 znázorňuje autá, ktoré vstupujú do sektoru S_1 z Račianskej ulice. Tento vstup predstavuje najväčšie počty áut, pretože sa autá pripájajú z hlavnej cesty v dvoch pruhov, v ktorých ďalej pokračujú. Podľa hodnôt z grafu môžeme zhodnotiť, že zápcha vzniká nárazovo najprv okolo siedmej, medzi 7:15 až 7:30 počet prichádzajúcich áut výrazne klesne. Zhustená premávka nastáva znova pred ôsmou a trvá takmer do pol deviatej. Vstup do S_1 je takisto z Peknej cesty, ktorý opisuje 4.6. Rovnako ako v predchádzajúcej situácii aj tu začína zápcha už pred ôsmou hodinou, avšak do sektora prichádza značne menej áut. Pekná cesta je vedľajšia ulica, pripájajúce autá prechádzajú aj cez električkovú trať, čo spomaľuje pripájajúce sa autá.

Do sektora S_2 prichádzajú vozidlá z Nobelovej a z S_1 , tento sektor je najdlhší a vstup doňho riadia semaforey, takže sa naplňa pomalšie ako ostatné sektory.



Obr. 4.5: Namerané údaje z Račianskej ulice.



Obr. 4.6: Namerané údaje z Peknej cesty.

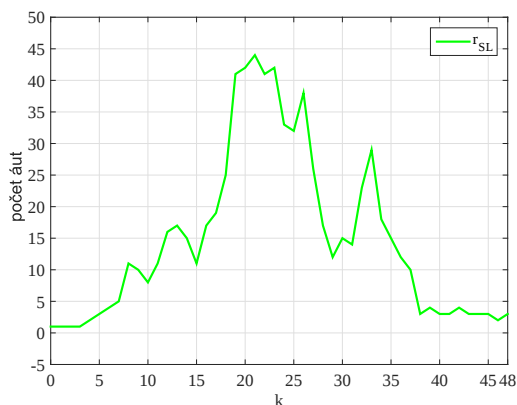
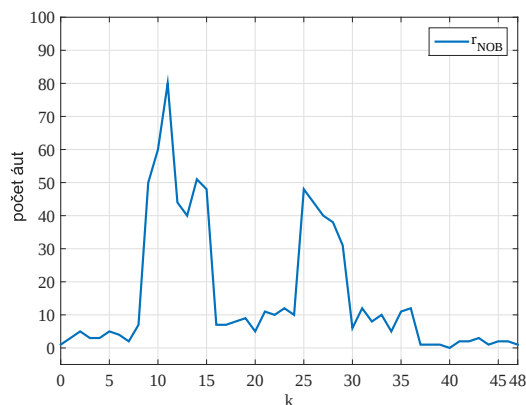
Priebeh pripájajúcich sa áut z Nobelovej je na obrázku 4.7. Táto ulica nie je taká frekventovaná a teda sa ani veľa áut do sektora nepripája. Avšak aj tu vidno podobný vývoj ako v predchádzajúcich situáciách, ale autá pribúdajú nárazovejšie a v menších počtoch. Vrchol premávky z Nobelovej nastáva o 6:50 a postupne klesá takmer na minimum, kým o 8:00 znova stúpne na 40 áut za jednu periódu.

Vykreslený priebeh rannej dopravy zo Sliačskej ulice do S_3 predstavuje obrázok 4.8. Tejto križovatke sme venovali najviac pozornosti, pretože je špecifická tým, že ju neriadia žiadne semaforey. Krivka zobrazená na grafe má mierne odlišný charakter ako ostatné. Počty áut narastajú plynulejšie. Maximum dosahujú o 7:35, zatiaľ čo z Nobelovej sa v tomto čase pripájalo najmenej áut. Priemerný rozsah 37 áut sa udržiava až do 8:10, na 15minút klesne a okolo 8:45 autá pribudnú.

Z výsledkov sme vyčítali, že dopravné zápchy vznikajú približne 15 - 20 minút pred celou hodinou. Môžeme to interpretovať, tak že, najviac ľudí sa presúva do zamestnania medzi 7:00 a 8:00. Ak by išli tesne po celej hodine predišli by kolónam a doprava by bola plynulejšia. Namerané číselné hodnoty opísaných grafov sú v tabuľke nameraných údajov 4.5.

Tabuľka 4.5: Tabuľka nameraných údajov.

k	čas	u_{PC}	u_{RAC}	u_{NOB}	u_{SL}
1	6:00	13	44	1	1
2	6:05	14	87	3	1
3	6:10	10	79	5	1
4	6:15	13	94	3	1
5	6:20	11	106	3	2
6	6:25	13	158	5	3
7	6:30	14	162	4	4
8	6:35	20	144	2	5
9	6:40	17	155	7	11
10	6:45	24	159	50	10
11	6:50	18	151	60	8
12	6:55	19	124	80	11
13	7:00	21	143	44	16
14	7:05	65	403	40	17
15	7:10	73	368	51	15
16	7:15	60	322	48	11
17	7:20	55	254	7	17
18	7:25	73	215	7	19
19	7:30	38	74	8	25
20	7:35	41	94	9	41
21	7:40	38	114	5	42
22	7:45	40	93	11	44
23	7:50	65	244	10	41
24	7:55	88	291	12	42
25	8:00	52	322	10	33
26	8:05	83	293	48	32
27	8:10	65	247	44	38
28	8:15	78	335	40	26
29	8:20	83	284	38	17
30	8:25	38	118	31	12
31	8:30	23	117	6	15
32	8:35	35	97	12	14
33	8:40	28	105	8	23
34	8:45	21	79	10	29
35	8:50	5	17	5	18
36	8:55	6	18	11	15
37	9:00	5	16	12	12
38	9:05	4	15	1	10
39	9:10	3	16	1	3
40	9:15	3	17	1	4
41	9:20	3	15	0	3
42	9:25	3	17	2	2
43	9:30	4	15	2	4
44	9:35	4	15	3	3
45	9:40	4	15	1	3
46	9:45	3	14	2	3
47	9:50	3	13	2	1
48	9:55	2	15	1	3

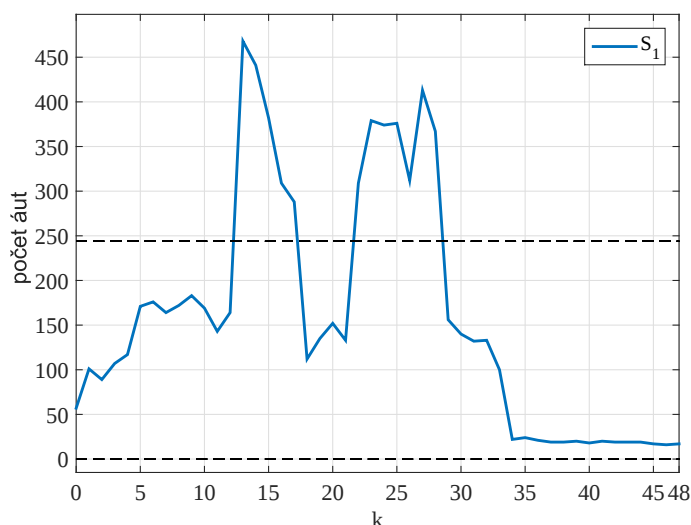


Obr. 4.7: Namerané údaje z Nobelovej. Obr. 4.8: Namerané údaje zo Sliacskej.

4.1.2 Reálna situácia

Situácia znázorňujúca obsadenosť sektorov, so splnením podmienky, že sa všetky autá dostanú von zo sektorov do piatich minút, je zobrazená na nasledujúcich obrázkoch.

- Do prvého sektora sa pripájajú autá z dvoch rôznych ciest, konkrétne z Račianskej ulice a Peknej cesty. Z priebehu na grafe vidno, že sa tento úsek naplní o 7:10 a počet áut ďaleko prevyšuje zvolenú maximálnu kapacitu až do 7:30. Počas ďalších 20-tich minútach množstvo áut v sektore klesne a znova pred ôsmou hodinou sa naplní, čo znamená, že vznikne zápcha, ktorá trvá do 8:30. V ďalších časových intervaloch už žiadne kolóny nevznikajú, počet áut v sektore postupne klesá.
- Ak zoberieme do úvahy podmienku, ktorú sme opísali v úvode tejto kapitoly, v sektore S_2 nevznikne počas celého predikčného horizontu žiadna zápcha. Objavuje sa tu len zhustená premávka, čo znamená, že je spomalená a tvoria sa kolóny, ale situácia nie je kritická.



Obr. 4.9: Obsadenosť sektora S_1 , ak sa všetky autá dostanú zo sektora do 5 minút.

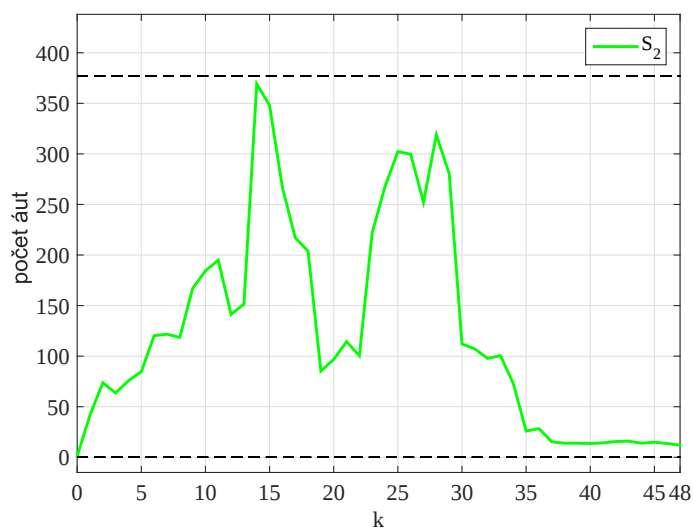
- V poslednom úseku sa vytvorí vyše dvojhodinová zápcha. Tento stav je zapríčinený tým, že veľké množstvo áut sa snaží dostať do tak krátkeho úseku, čiže je stále plný. Avšak nemal by to byť až taký problém, ak sa všetkým autám podarí dostať von do piatich minút.

V predchádzajúcej analýze sme uvažovali splnenie predpokladu, že sa všetky autá dostanú zo sektorov preč do piatich minút. Avšak toto tvrdenie nie je pravdivé, ak sa vytvorí dopravná zápcha, pretože autá sa pohybujú veľmi pomaly a nestihnú prejsť na koniec za zvolený časový interval. Ak zoberieme do úvahy túto podmienku, situácie v jednotlivých sektoroch sú nasledovné.

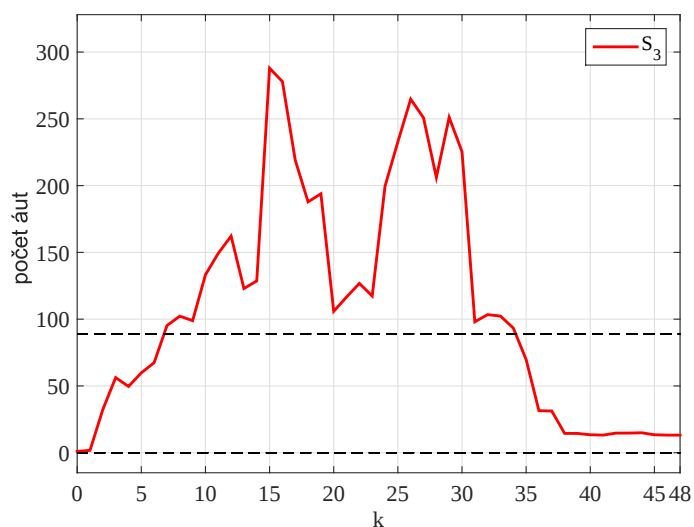
- Priebeh na obrázku 4.12 je podobný ako na predchádzajúcom 4.9, lenže tentokrát je pri dopravných zápchach väčšie množstvo áut v sektore. V čase najväčšej zápchy je v tomto sektore až 558 áut, pričom nesmieme zabúdať, že kvôli názornejšej ukážky sme vstupné údaje vynásobili koeficientami podľa tabuľky 4.2. Z čoho vyplýva, že reálna akumulácia áut v sektore je menšia.

Tabuľka 4.6: Reálna situácia, ak všetky autá vyjdú za 5 minút.

k	čas	S_1	S_2	S_3	u_{PC}	u_{RAC}	u_{NOB}	u_{SL}
1	6:00	0	0	0	13	44	1	1
2	6:05	57	1	1	14	87	3	1
3	6:10	101	42	2	10	79	5	1
4	6:15	89	74	32	13	94	3	1
5	6:20	107	64	56	11	106	3	2
6	6:25	117	76	50	13	158	5	3
7	6:30	171	85	60	14	162	4	4
8	6:35	176	120	67	20	144	2	5
9	6:40	164	122	95	17	155	7	11
10	6:45	172	119	102	24	159	50	10
11	6:50	183	167	99	18	151	60	8
12	6:55	169	184	133	19	124	80	11
13	7:00	143	195	149	21	143	44	16
14	7:05	164	141	162	65	403	40	17
15	7:10	468	152	123	73	368	51	15
16	7:15	441	369	129	60	322	48	11
17	7:20	382	348	288	55	254	7	17
18	7:25	309	267	278	73	215	7	19
19	7:30	288	217	219	38	74	8	25
20	7:35	112	204	188	41	94	9	41
21	7:40	135	85	194	38	114	5	42
22	7:45	152	97	106	40	93	11	44
23	7:50	133	114	117	65	244	10	41
24	7:55	309	100	127	88	291	12	42
25	8:00	379	222	117	52	322	10	33
26	8:05	374	268	200	83	293	48	32
27	8:10	376	302	233	65	247	44	38
28	8:15	312	300	265	78	335	40	26
29	8:20	413	252	251	83	284	38	17
30	8:25	367	319	206	38	118	31	12
31	8:30	156	281	251	23	117	6	15
32	8:35	140	112	225	35	97	12	14
33	8:40	132	107	98	28	105	8	23
34	8:45	133	98	103	21	79	10	29
35	8:50	100	100	102	5	17	5	18
36	8:55	22	73	93	6	18	11	15
37	9:00	24	26	70	5	16	12	12
38	9:05	21	28	31	4	15	1	10
39	9:10	19	15	31	3	16	1	3
40	9:15	19	14	14	3	17	1	4
41	9:20	20	14	14	3	15	0	3
42	9:25	18	14	13	3	17	2	3
43	9:30	20	14	13	4	15	2	4
44	9:35	19	16	15	4	15	3	3
45	9:40	19	16	15	4	15	1	3
46	9:45	19	14	15	3	14	2	3
47	9:50	17	15	13	3	13	2	2
48	9:55	16	14	13	2	15	1	3

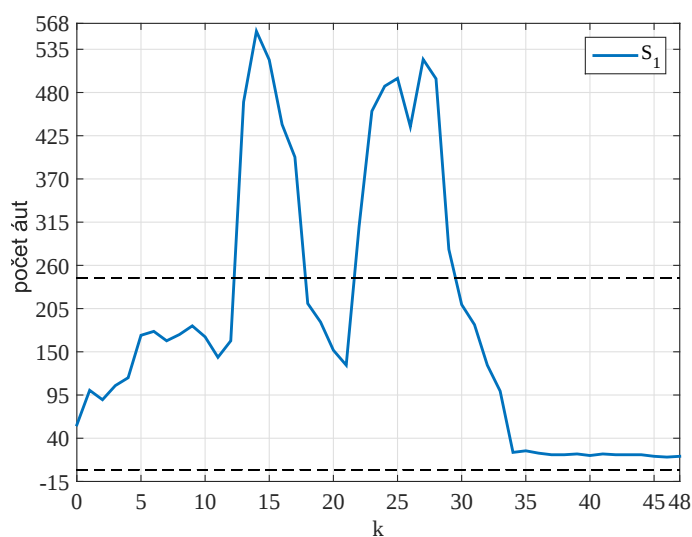


Obr. 4.10: Obsadenosť sektora S_2 , ak sa všetky autá dostanú zo sektora do 5 minút.

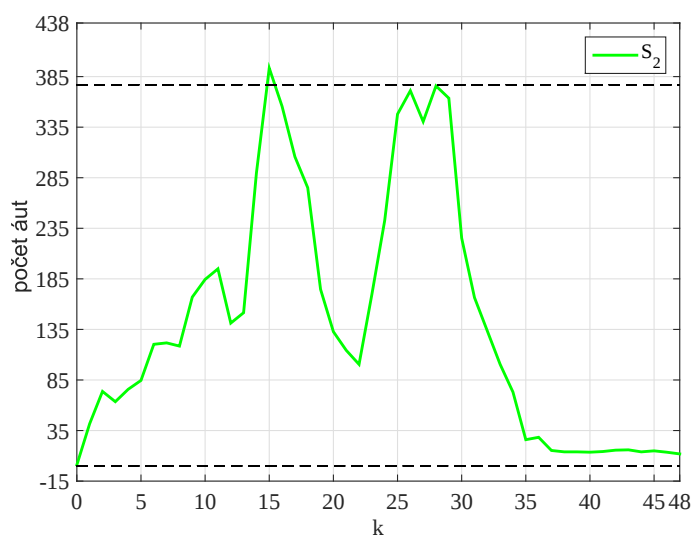


Obr. 4.11: Obsadenosť sektora S_3 , ak sa všetky autá dostanú zo sektora do 5 minút.

- V druhom sektore na rozdiel od situácie, keď sa dostali všetky autá preč zo sektora vnika taktiež zápcha, lenže trvá len jednu 5-minutovku a to v čase 7:20. Zhustená premávka je v dvoch väčších časových intervaloch, teda okolo 7:15 - 7:40 a 8:10 - 8:40.



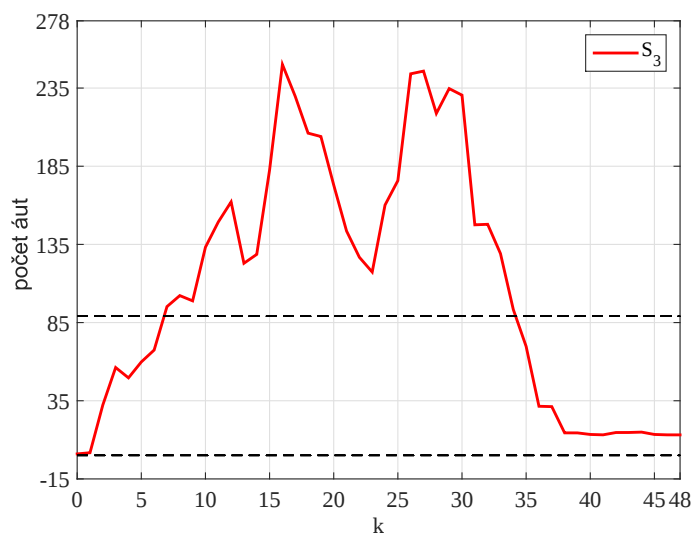
Obr. 4.12: Obsadenosť sektora S_1 , ak sa všetky autá nedostanú zo sektora do 5 minút.



Obr. 4.13: Obsadenosť sektora S_2 , ak sa všetky autá nedostanú zo sektora do 5 minút.

- Obrázok 4.14 znázorňuje obsadenosť sektora S_3 . V tomto sektore sa vždy bude tvoriť dopravná zápchka z toho dôvodu, že má len 400m. V predošlom opise situácie sme spomínali, že vzhľadom na jeho dĺžku sa zakaždým dostanú

preč všetky autá do piatich minút, takže to platí aj v tomto prípade, aj keď podmienka, ktorú sme uviedli vyššie hovorí niečo iné. Napriek tomu, je na grafe vyobrazená dopravná zápcha, ktorá trvá od 6:40 do 9:00.



Obr. 4.14: Obsadenosť sektora S_3 , ak sa všetky autá dostanú zo sektora do 5 minút.

Tabuľka 4.7: Reálna situácia, ak všetky autá nevyjdú za 5 minút.

k	čas	S_1	S_2	S_3	u_{PC}	u_{RAC}	u_{NOB}	u_{SL}
1	6:00	0	0	0	13	44	1	1
2	6:05	57	1	1	14	87	3	1
3	6:10	101	42	2	10	79	5	1
4	6:15	89	74	32	13	94	3	1
5	6:20	107	64	56	11	106	3	2
6	6:25	117	76	50	13	158	5	3
7	6:30	171	85	60	14	162	4	4
8	6:35	176	120	67	20	144	2	5
9	6:40	164	122	95	17	155	7	11
10	6:45	172	119	102	24	159	50	10
11	6:50	183	167	99	18	151	60	8
12	6:55	169	184	133	19	124	80	11
13	7:00	143	195	149	21	143	44	16
14	7:05	164	141	162	65	403	40	17
15	7:10	468	152	123	73	368	51	15
16	7:15	558	290	129	60	322	48	11
17	7:20	522	393	183	55	254	7	17
18	7:25	439	356	250	73	215	7	19
19	7:30	398	306	230	38	74	8	25
20	7:35	211	275	206	41	94	9	41
21	7:40	188	175	204	38	114	5	42
22	7:45	152	133	173	40	93	11	44
23	7:50	133	114	144	65	244	10	41
24	7:55	309	100	127	88	291	12	42
25	8:00	456	170	117	52	322	10	33
26	8:05	488	243	160	83	293	48	32
27	8:10	498	348	176	65	247	44	38
28	8:15	437	371	244	78	335	40	26
29	8:20	522	341	246	83	284	38	17
30	8:25	498	376	219	38	118	31	12
31	8:30	280	364	235	23	117	6	15
32	8:35	210	225	230	35	97	12	14
33	8:40	185	166	148	28	105	8	23
34	8:45	133	133	148	21	79	10	29
35	8:50	100	100	129	5	17	5	18
36	8:55	22	73	93	6	18	11	15
37	9:00	24	26	70	5	16	12	12
38	9:05	21	28	31	4	15	1	10
39	9:10	19	15	31	3	16	1	3
40	9:15	19	14	14	3	17	1	4
41	9:20	20	14	14	3	15	0	3
42	9:25	18	14	13	3	17	2	3
43	9:30	20	14	13	4	15	2	4
44	9:35	19	16	15	4	15	3	3
45	9:40	19	16	15	4	15	1	3
46	9:45	19	14	15	3	14	2	3
47	9:50	17	15	13	3	13	2	2
48	9:55	16	14	13	2	15	1	3

4.2 Riešenie v MATLAB-e

Na riešenie optimalizačného problému sme pracovali v užívateľskom prostredí MATLAB-u s použitím toolboxu YALMIP. Tento toolbox sa používa na riešenie konvexných i nekonvexných optimalizačných problémov. Využíva syntax zhodnú s MATLAB-om, čím umožňuje jednoduchú implementáciu optimalizačného problému.

Našou úlohou je zistiť, akým spôsobom je možné modifikovať vstupné toky áut do sektorov tak, aby nedošlo k ich zahlteniu. Pričom chceme, aby zásahy boli v zmysle účelovej funkcie čo najmenej inektívne, čiže chceme v čo najmenšej miere zasahovať do aktuálnej dopravnej situácie. Ďalší predpoklad je, nech optimalizácia len prerozdelí existujúce toky áut do iných 5-minutoviek a množstvo áut za celý časový horizont ostane zachovné. Túto podmienku opisuje rovnica $\sum r_k = \sum u_k$.

V skripte *mpc_traffic.m* sme zadefinovali optimalizačný problém. Najprv sme si zadefinovali matice v diskretnom čase podľa (3.3) a podobne sme vytvorili matice z ostatných ohrazení, ktoré sa nachádzajú v podkapitole 3.2.1.

```
N = 48;
V = ones(1, N);
V(24:36) = 100;
Qs = 1e6; % vaha na doplnkove premenne
```

Konštanta N predstavuje predikčný horizont, ktorý sme si zvolili na 4 hodiny po 5 minút. V sú časovo premenlivé váhové koeficienty. Predstavujú väčšiu prioritu zvoleným päťminútovkám. Váhu sme si zvolili od kroku 24 do 36, čo je v čase medzi 8:00 - 9:00, chceme čo najmenej modifikovať reálnu situáciu.

```
% rozmery matic
ns = size(A, 2);
```

```

nu = size(B, 2);
nd = size(E, 2);
assert(size(R, 2) == N);
assert(size(R, 1) == nu);

% optimalizovane premenne
S = sdpvar(nx, N+1, 'full');
U = sdpvar(nu, N, 'full'); % U = [u0, u1, u2, ... uN-1]
D = sdpvar(nd, N, 'full');
y = sdpvar(nx, N+1, 'full');

```

Zadefinovali sme si rozmery matíc a optimalizované premenné, ktoré sú typu `sdpvar`. Nastavili sme rozmery na základe predikčného horizontu a naplnili sme ich. Maticu `y` používame na zmäkčenie stavových ohraničení. Matica stavov má o jeden člen navyše podľa predikčnej rovnice (3.8b).

```

obj = 0; % ucelova funkcia
con = []; % ohranicenia
for k = 1:N
    % ucelova funkcia
    obj = obj + norm(V(k)*(U(:, k) - R(:, k)), 1);
    % penalizacia doplnkovych premennych
    obj = obj + norm(Qs*y(:, k), 1);
    % predikcny model
    con = con + [ S(:, k+1) == A*S(:, k) + B*U(:, k) + E*D(:, k) ];
    % ohranicenia
    con = con + [ 0 <= S(:, k) <= xmax+y(:, k) ];
    con = con + [ 0 <= M1*D(:, k) <= S(:, k) ];
    con = con + [ D(:, k) >= 0 ];
    con = con + [ M2*D(:, k) == M3*S(:, k) ];
    con = con + [ U(:, k) >= 0 ];
end

```

```

con = con + [ 0 <= S(:, N+1) <= xmax + y(:, N+1)];
obj = obj + norm(Qs*y(:, N+1), 1);
% doplnkove premnne musia byt nezaporne
con = con + [ y(:, ) >= 0 ];

for i = 1:nu
    con = con + [ sum(U(i, :)) == sum(R(i, :))];
end

% pociatocna podmienka
con = con + [ S(:, 1) == st ];

```

Ďalej sme zapísali účelovú funkciu s ohraničeniami. Účelová funkcia predstavuje jedna normu z rozdielu optimalizovaných vstupov a reálnych. Matica **R** zahŕňa reálne počty áut, ktoré boli predmetom zbieranie dát. Zakomponovali sme do nej časovo variabilné váhové koeficienty a váhovú maticu. Význam ohraničení sme si už vysvetlili v predošlých kapitolách.

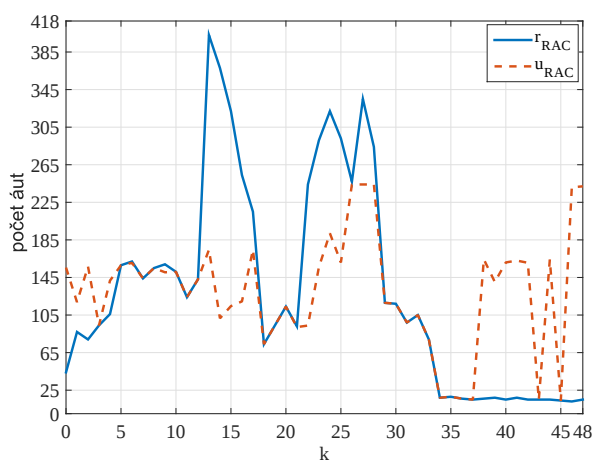
4.2.1 Výsledky

Po vyriešení optimalizačného problému sa vypíše hodnota účelovej funkcie a vykreslia sa časové priebehy optimalizovaných stavov a akčných zásahov. Vstupné údaje sme prenásobili koeficientmi podľa rovníc (4.1b) a (4.1a) ako sme opísali v predchádzajúcej kapitole. Skript, ktorý rieši takýto problém sa nazýva *mpc_traffic.m*. Mäkké ohraničenia nám dovoľia nafúknuť sektory, čiže vieme vpustiť do systému viac áut ako je jeho maximálna kapacita. Takáto situácia môže skutočne nastať, pretože ohraničenia na maximálne zaplnenie sektorov boli zvolené veľkoryso s minimálnym rozstupom medzi autami 4 metre. Každý šofér si sám zvolí odstup od auta pred ním.

Výsledky budeme demonštrovať pomocou grafov. Obrázky 4.15, 4.16, 4.17, 4.18 hovoria o tom, že v ktorom čase je pre vodičov ideálne ísť, aby nevznikali

kolóny, či dopravné zápchy. Kolóna je častokrát spôsobená vtedy, ak sa rozhodne ísť mnoho ľudí naraz v tom istom časovom momente. Spôsob, ktorým sa budeme snažiť zrealizovať výsledky optimalizácie rozvineme v kapitole 5. Teraz si postupne rozoberieme jednotlivé situácie akčných zásahov:

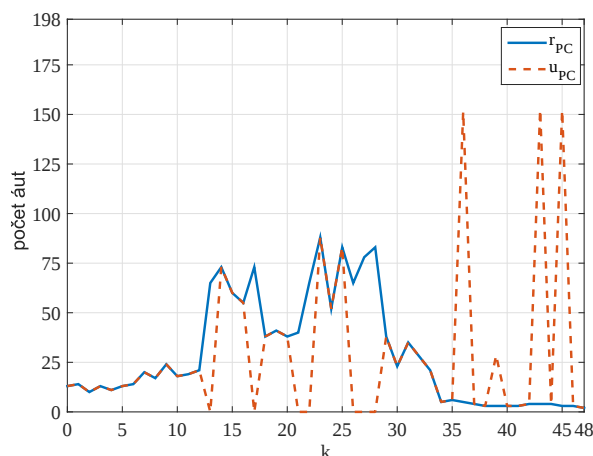
- u_{RAC} - po Račianskej ulici sa do systému pripája najviac áut, pretože idú v dvoch pruhoch a cesta vedie od prímestských častí až do centra. Na tomto prúde sa dajú najlepšie demonštrovať výsledky optimalizácie. Názorne tu vidno náhly nárast áut o 7:05 a 7:50, ktorý pokračuje takmer až do pol deviatej. Aby sme odľahčili dopravu v kritických hodinách, je potrebné motivovať ľudí, nech využijú vstup do systému v iných časových okamihoch. Na uvoľnenie sektora by v čase najväčšej špičky malo ísť asi o 200 áut menej, čo by sa mohlo vykompenzovať od času 9:10, keď aj veľký nárast áut nezaplní celý sektor.



Obr. 4.15: Optimálne riešenie akčných zásahov na vstupe z Račianskej ulice.

- u_{PC} - z Peknej cesty prichádzajú autá návalovo len v čase najväčšej špičky. Ak by sa dokázali rozmiestniť rovnomernejšie po časovom horizonte, nevznikli by zápchy v prvom sektore. Čiže do siedmej hodiny je potrebné udržať

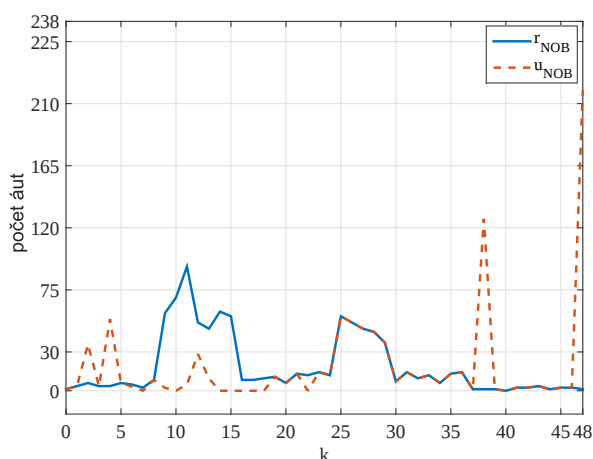
prichádzajúce autá okolo počtu 17, neskôr až do 8:50 na priemerných 40 áut pripájajúcich sa do sektora, namiesto pôvodných 70.



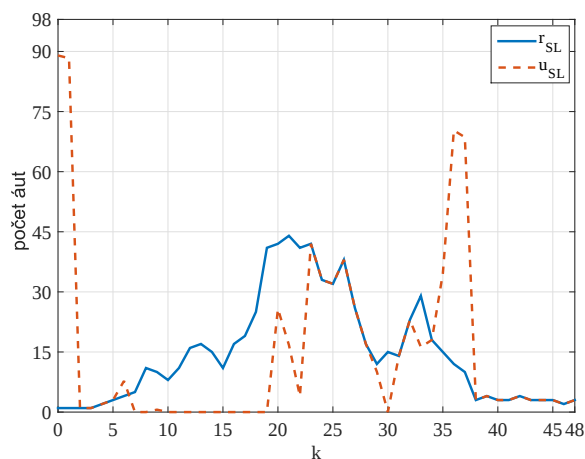
Obr. 4.16: Optimálne riešenie akčných zásahov na vstupe z Peknej cesty.

- u_{NOB} - obrázok 4.17 vyjadruje, že ak by autá išli skôr ako o pol siedmej, tak by sa neskôr v úseku S_2 netvorili kolóny. Medzi 6:45 a 7:10 je vhodné znížiť zaťaženosť tohto vstupu o 30 áut vchádzajúcich do systému, čo by sa mohlo vykompenzovať v neskorších hodinách, napríklad o 9:10 či 10:00, keď do sektore má do sektora vstúpiť vyše 100 áut.
- u_{SL} - vstupný prúd zo Sliáčskej sítě nezahŕňa mnoho áut vstupujúcich do systému, avšak kvôli dĺžke posledného sektoru tam bude zápcha vždy. Preto výsledky ukazujú, aby o šiestej išlo maximálne množstvo áut, ktoré je možné pustiť do tohto sektora. Do času 7:55 je nutné obmedziť prístup áut do sektora, aby sa nevytvárali rozsiahle kolóny. Neskôr od 8:55 do 9:10 môže vojsť do úseku priemerne o 50 áut viac ako je to v súčasnosti.

Obrázky 4.20, 4.21, 4.22 znázorňujú optimálne množstvo áut nachádzajúce sa v jednotlivých sektoroch. V úseku S_1 a S_3 vznikne zápcha aj po optimalizácii,



Obr. 4.17: Optimálne riešenie akčných zásahov na vstupe z Nobelovej.



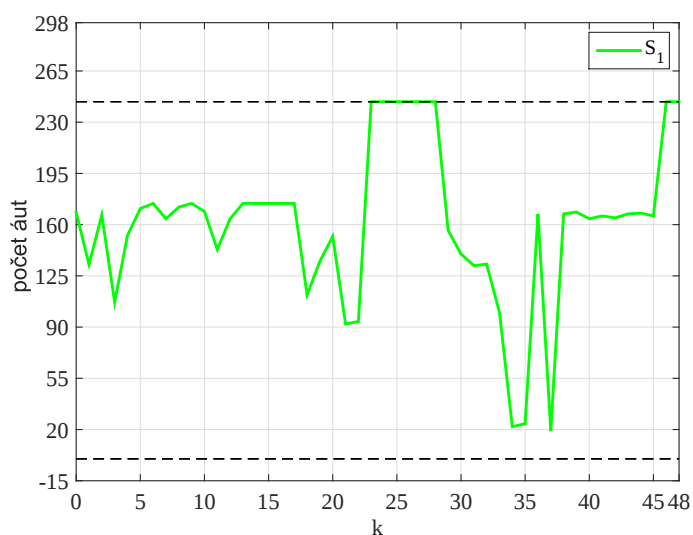
Obr. 4.18: Optimálne riešenie akčných zásahov na vstupe zo Sliacskej ulice.

pričom situácia pred optimalizáciou je na obrázkoch 4.9, 4.10, 4.11, avšak už netrvá tak dlho ako pred ňou. Ďalej môžeme tvrdiť, že dopravná zápcha sa bežne vytvára medzi ôsmou a deviatou, ako sme to rozoberali v predošlých kapitolách. Ale už nie je vo všetkých sektoroch ako bola pôvodne, s výnimkou tretieho sektora. Tento úsek plný takmer v celom časovom horizonte a vďaka nemu sa spomaľuje doprava aj v ostatných sektoroch. Tretí sektor je celkovo problematický, pretože má 400 metrov a predošlé dva vyše 1 kilometra, z čoho vyplýva, že sa tam snaží dostať



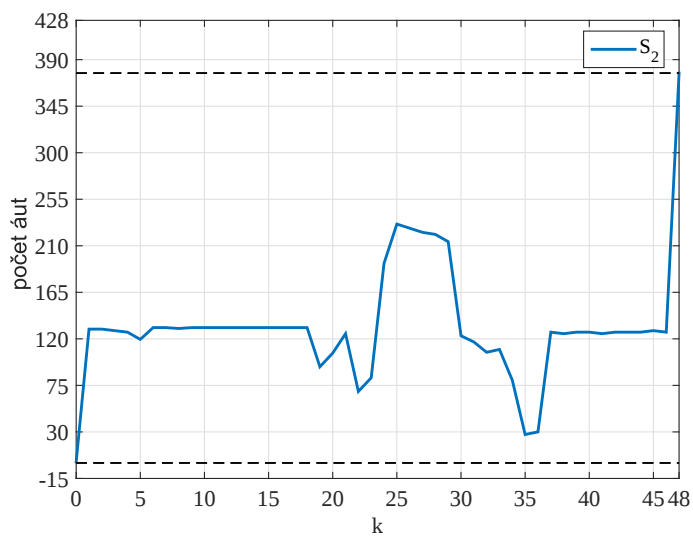
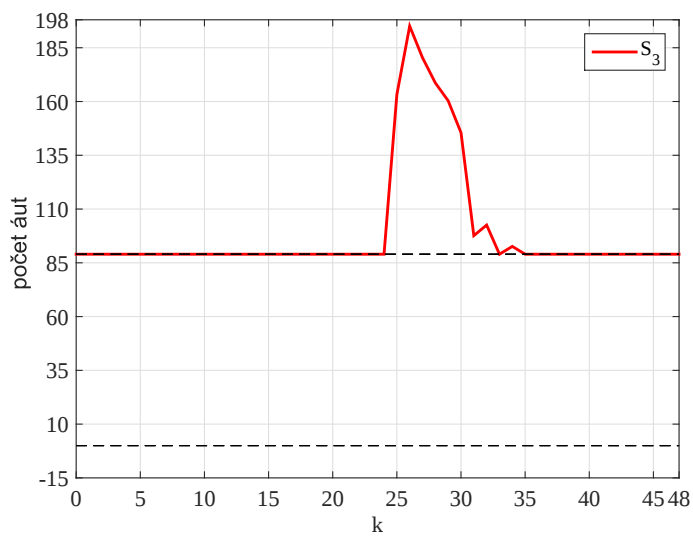
Obr. 4.19: Križovatka na Račianskej so Sliačskou.

príliš veľa áut naraz. Ako sme spomínali na križovatke Račianska - Sliačska nie sú semaforey, ktoré by riadili dané jazdné pruhy a častokrát tam zbytočne dochádza ku chaosu a tým pádom k spomaleniu premávky. Jednotlivé sektory sa navzájom ovplyvňujú, ak by sme dokázali odbremeniť prvé dva sektory, tak by v treťom nevznikala zápcha.

Obr. 4.20: Optimálna obsadenosť sektora S_1 .

Tabuľka 4.8: Optimálne rozmiestnenie áut.

k	čas	S_1	S_2	S_3	u_{PC}	u_{RAC}	u_{NOB}	u_{SL}
1	6:00	0	0	0	13	156	1	89
2	6:05	169	1	89	14	119	3	88
3	6:10	133	129	89	10	157	30	1
4	6:15	167	129	89	13	94	3	1
5	6:20	107	128	89	11	142	46	2
6	6:25	153	126	89	13	158	5	3
7	6:30	171	119	89	14	161	3	8
8	6:35	174	131	89	20	144	0	0
9	6:40	164	131	89	17	155	7	0
10	6:45	172	130	90	24	151	2	1
11	6:50	175	131	89	18	151	0	0
12	6:55	169	131	89	19	124	4	0
13	7:00	143	131	89	21	143	24	0
14	7:05	164	131	89	0	175	8	0
15	7:10	175	131	89	73	102	0	0
16	7:15	175	131	89	60	114	0	0
17	7:20	175	131	89	55	120	0	0
18	7:25	175	131	89	0	175	0	0
19	7:30	175	131	89	38	74	0	0
20	7:35	112	131	89	41	94	9	0
21	7:40	135	93	89	38	114	5	26
22	7:45	152	106	89	0	92	11	17
23	7:50	92	125	89	0	94	0	4
24	7:55	94	70	89	88	156	12	42
25	8:00	244	82	89	52	192	10	33
26	8:05	244	193	89	83	161	48	32
27	8:10	244	231	163	0	244	44	38
28	8:15	244	227	195	0	244	40	26
29	8:20	244	223	180	0	244	38	17
30	8:25	244	221	168	38	118	31	10
31	8:30	156	214	160	23	117	6	0
32	8:35	140	123	145	35	97	12	14
33	8:40	132	117	98	28	105	8	23
34	8:45	133	107	102	21	79	10	16
35	8:50	100	110	89	5	17	5	18
36	8:55	22	80	93	6	18	11	34
37	9:00	24	28	89	151	16	12	70
38	9:05	167	30	89	4	15	1	69
39	9:10	19	126	89	3	164	110	3
40	9:15	167	125	89	28	140	1	4
41	9:20	168	126	89	3	161	0	3
42	9:25	164	126	89	3	163	2	3
43	9:30	166	125	89	4	160	2	4
44	9:35	165	126	89	152	15	3	3
45	9:40	167	126	89	4	164	1	3
46	9:45	168	126	89	152	14	2	3
47	9:50	166	128	89	3	241	2	2
48	9:55	244	126	89	2	242	194	3

Obr. 4.21: Optimálna obsadenosť sektora S_2 .Obr. 4.22: Optimálna obsadenosť sektora S_3 .

4.2.2 Rozšírenia

K predošlému riešeniu optimalizačného problému sme pridali rozšírenia v podobe premenlivých rýchlostí a binárne premenné. Keďže sa tento problém zmenil na zlo-

žitý, museli sme použiť na jeho riešenie toolbox GUROBI. Tento výkonný optimalizačný riešiteľ je vhodný na zvládnutie lineárneho, kvadratického, celočíselného lineárneho, či celočíselného kvadratického programovania. GUROBI podporuje mnoho programovacích jazykov ako napríklad: Java, C++, Python, Matlab a iné.

Od predchádzajúcej formulácie sa táto mení len v niektorých aspektoch. Maximálnu kapacitu sektorov sme upravili tým, že sme zväčšili rozstup medzi autami, avšak zadefinovali sme aj absolútny limit, kedy je rozstup len 2m.

```
S1full = 1100*2/9;
S2full = 1700*2/9;
S3full = 10*S3max;
```

```
kfull1 = 0.76;
kfull2 = 0.76;
kfull3 = 1;
```

Konštanty `S1full`, `S2full` a `S3full` predstavujú počet áut po ktorých dochádza k spomaleniu sektorov, `kfull1`, `kfull2` a `kfull3` označuje percentuálne množstvo áut, ktoré odíde zo sektora za 5 minút. `k12` a `k23` sú pomery áut, ktoré pokračujú do ďalšieho sektora, tieto pomery sú rovnaké ako predtým.

```
%% premenne
S1 = sdpvar(1, N+1, 'full'); % prvý sektor
full1 = binvar(1, N, 'full'); % indikátor zahustenia 1. sektora
q1 = sdpvar(1, N, 'full'); % celkový výstup z 1. sektora
uPC = sdpvar(1, N, 'full'); % vstup do 1. sektora z Peknej cesty
y1 = sdpvar(1, N+1, 'full'); % zmakcované premenne na 1. sektor
```

Zadefinovali sme premenné pre prvý sektor a podobne vyzerajú aj pre zvyšné dva

sektory. Všetky premenné okrem `full1` sú typu `sdpvar`. `Full1` je binárneho typu, pretože ukazuje len 2 situácie, ak `full1 = 1` sektor je zaplnený nad určitú hranicu a `full1 = 0` znamená, že počet áut je pod touto hranicou. Rozmery sme nastavili na základe predikčného horizontu a následne sme ich naplnili.

```
%% formulacia MPC
obj = 0; % ucelova funkcia
cst = []; % ohranicenia

for k = 1:N
    %% 1. sektor
    % nove auta = stare auta + pekna cesta + racianska - vystup
    cst = cst + [ S1(k+1) == S1(k) + uPC(k) + uRAC(k) - q1(k) ];
    % tvrde ohranicenia na kapacitu
    cst = cst + [ 0 <= S1(k) <= S1maxmax ];
    % makke ohranicenie na maximalnu kapacitu
    cst = cst + [ 0 <= S1(k) <= S1max + y1(k); y1(k) >= 0 ];
    % penalizacia porusenia ohraniceni
    obj = obj + Qy*y1(k);
    % binarny indikator zahltenia sektora
    cst = cst + [ iff(full1(k), S1(k) >= S1full) ];
    % dvojstupnove urcenie velkosti vystupneho toku
    cst = cst + [ implies(full1(k), q1(k)==kfull1*S1(k)) ];
    cst = cst + [ implies(~full1(k), q1(k)==S1(k)) ];
    % penalizuj rozdiel medzi nahlasenymi a optimalizovanymi prijazdami
    obj = obj + norm(refPC(k)-uPC(k), 1);
    obj = obj + norm(refRAC(k)-uRAC(k), 1);
end
```

V tejto časti sme zapísali účelovú funkciu a ohraničenia. Pre ilustráciu opíšeme blok pre prvý sektor, zápis ostatných vyzerá podobne a je uvedený v skripte *mpc_traffic_speed.m*. Účelová funkcia je zložená z rozdielu nahlásených áut a opti-

malizovanými prichádzajúcimi autami, ktorý je v jedna norme. $\sum r_k = \sum u_k$ - suma optimalizovaných premenných a referencie musí byť zhodná, pretože autá len prerozdeľujeme medzi všetky 5-minutovky v časovom horizonte. Účelovú funkciu penalizujeme pomocou váhovej matice $Qy = 1e5$, ktorá nám dovolí nafúknuť kapacitu sektorov. Binárna premenná `full1` v ohraničeniach hovorí, že ak je sektor naplnený, jeho hodnota je rovná 1 a ak je 0, do sektora môžu prichádzať ďalšie autá. Všetky optimalizované toky musia byť nezáporné. S sú stavy, ich počet je teda $N + 1$, čiže musíme zabrániť aby zápcha nebola len v poslednom kroku. Toto ohraničenie predstavuje:

```
cst = cst + [ 0 <= S1(end) <= S1max/2; ...
              0 <= S2(end) <= S2max/2; ...
              0 <= S3(end) <= S3max/2 ];

% pociatocna podmienka (vsetky sektory na zaciatku prazdne)
cst = cst + [ S1(1)==0; S2(1)==0; S3(1)==0 ];

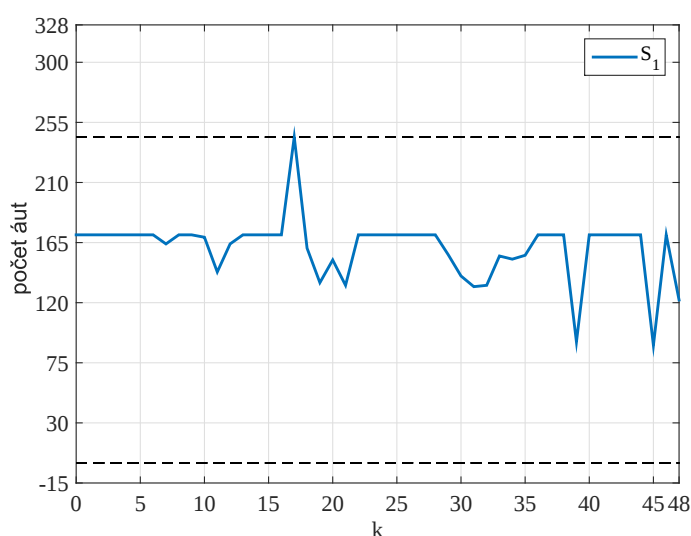
% pomocne ohranicenia
cst = cst + [ 0 <= q1 <= S1(1:end-1); ...
              0 <= q2 <= S2(1:end-1); ...
              0 <= q3 <= S3(1:end-1) ];

obj = obj + 1e-3*(sum(S1)+sum(S2)+sum(S3));
obj = obj + 1e-3*norm(S1, Inf) + ...
          1e-3*norm(S2, Inf) + ...
          1e-3*norm(S3, Inf);
```

Pomocné ohraničenia hovoria o tom, že zo sektorov nemôže vyjsť viac áut ako v nich momentálne je. Nakoniec sme penalizovali účelovú funkciu nekonečno normou podľa kritéria (2.9). Táto norma v účelovej funkcii znamená minimalizá-

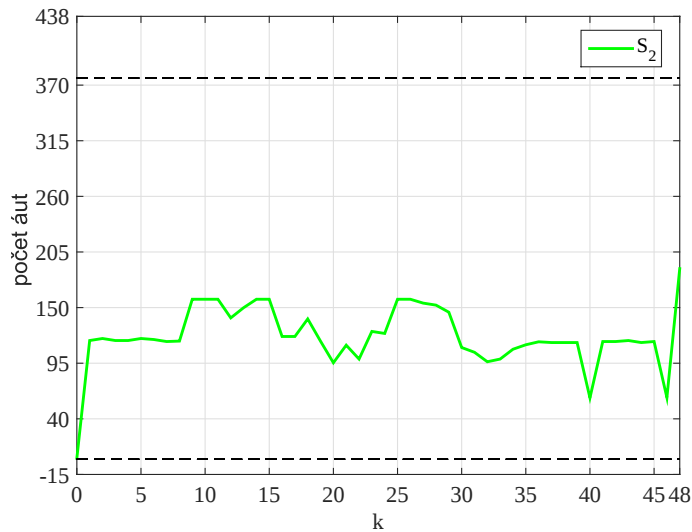
ciu najväčších hodnôt pík. Čiže sa snaží aby nevznikla nárazovo jedna krátko trvajúca veľká zápcha, ale aby ich bolo viac menších. Menšie kolóny môžu trvať dlhšie, ale stále to môže znamenať plynulú premávku, narozdiel od zápchy.

- Časový priebeh obsadenosti sektora S_1 je znázornený na obrázku 4.23. Optimalizácia zabezpečila pomocou akčných zásahoch zobrazených na 4.26 a 4.27, že dopravná zápcha nastane len v devätnástej päťminútovke, čo je v čase 7:30 - 7:35. Oproti pôvodnej situácie je táto oveľa lepšie z hľadiska plynulosti dopravy.



Obr. 4.23: Optimálna obsadenosť sektora S_1 pri premenlivej rýchlosti.

- V druhom sektore, ktorý je ohraničený Nobelovou a Sliackou ulicou, je situácia zobrazená pomocou obrázka 4.24. Aj v tomto úseku sa nám úspešne podarilo po optimalizácii odstrániť dopravné zápchy. Okrem toho, tento sektor je najdlhší, takže sa naplňa pomalšie ako zvyšné dva. V celom predikčnom horizonte je približne zaplnený do 1/3 jeho maximálnej kapacity. Má 3 výstupné prúdy, takže sa autá vedia dostatočne rýchlo dostať von z tohto sektora.

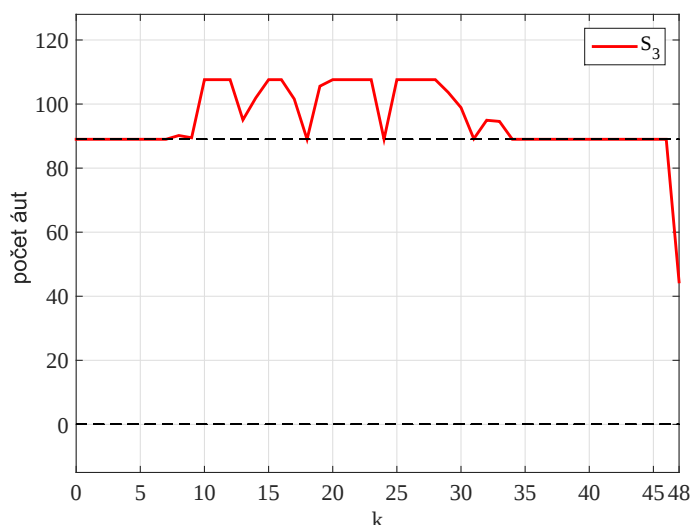


Obr. 4.24: Optimálna obsadenosť sektora S_2 pri premenlivej rýchlosti.

- V poslednom úseku, ktorý je vymedzený Sliačskou a Jarošovou ulicou 4.25, sa nepodarilo zmierniť dopravnú zápchu počas celého predikčného horizontu. Ako sme už viackrát spomínali, tento úsek je najkritickejší, pretože je oproti zvyšným dvom približne o 1km kratší. Takže tu zápchy vznikajú vždy, ale do piatich minút sa podarí všetkým autám opustiť tento sektor. Z tabuľky 4.9 môžeme vidieť, že od 6:55 do 8:30 je potrebné tento sektor rozšíriť o približne 20 áut. Z čoho vyplýva, že v tom čase sa presúva najviac ľudí po celej Račianskej ulici, čím vznikajú kolóny.

Ďalej si rozoberieme optimálny vplyv akčných zásahov do systému. Modré čiary v nasledujúcich grafoch znázorňujú skutočné množstvo áut prichádzajúce do jednotlivých sektorov a červené čiarkované čiary sú optimalizované počty vstupných áut. Hodnoty o počtoch áut vchádzajúcich do sektorov sú v tabuľke 4.9. V stĺpcoch $S_1 - S_3$ je obsadenosť sektorov, u_{PC} až u_{SL} sú optimálne akčné zásahy do systému a $d_{PC} - d_{SL}$ je rozdiel medzi aktuálnymi a optimálnymi akčnými zásahmi.

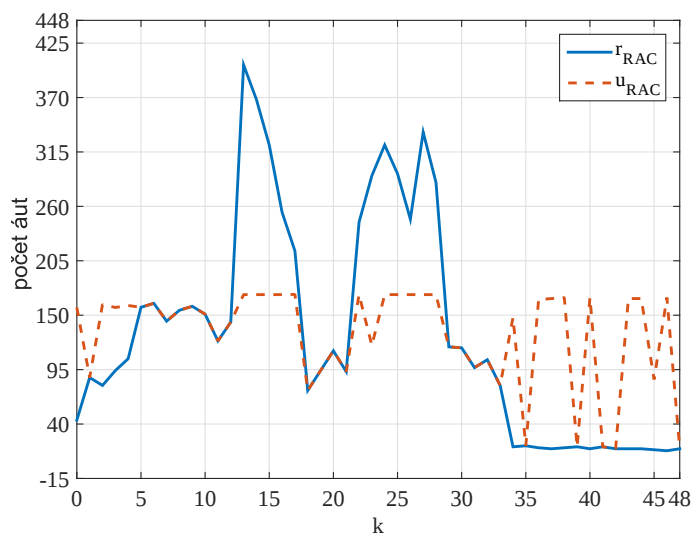
- Z Račianskej ulice sa do sektoru S_1 vstupuje najviac áut, hlavne v časoch od



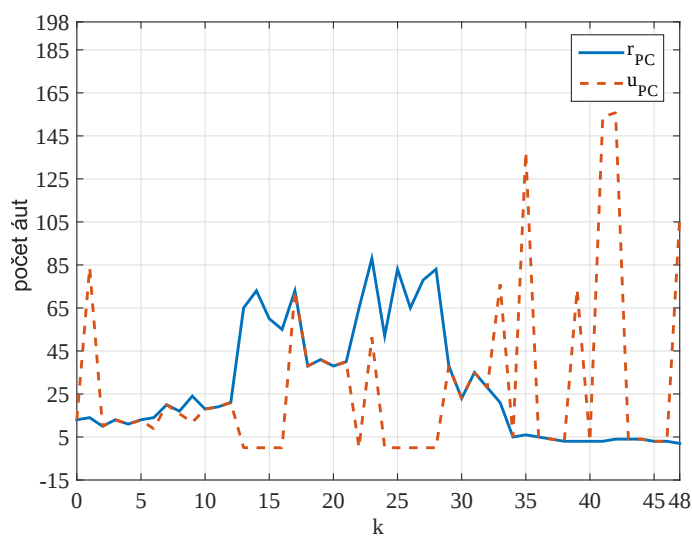
Obr. 4.25: Optimálna obsadenosť sektora S_3 pri premenlivej rýchlosti.

7:05 do 7:35 a medzi 7:50 - 8:25, tieto údaje sú z tabuľky 4.5. Toto množstvo áut je príliš veľké a tým pádom začínajú vznikať kolóny už skoro ráno. Podľa výsledkov navrhujeme, aby už o šiestej ráno vstupovalo do systému 158 áut, čo predstavuje o 114 viac ako je terajšia vôľa ľudí. Je potrebné odbremeniť tieto časové intervaly 7:05 - 7:30 a 7:50 - 8:25, aby nevznikali zápchy. V prvom intervale je ideálne poslať približne o 160 áut menej a v druhom o 150. Keďže v optimalizácii len prerozdeľujeme autá, musia teda prísť do systému v inom časovom intervale. Najlepšie riešenie pre tento vstupný prúd je, aby prichádzali medzi 8:50 až 10:00. Avšak na sektor S_1 vplýva aj vstupný prúd u_{PC} .

- Druhým vstupom do sektora S_1 je z Peknej cesty. Týmto prúdom neprichádza až také množstvo áut ako od predošlého opisu, avšak aj tu treba spraviť určité zásahy do súčasnej situácie. Všetky väčšie počty prichádzajúcich áut je nutné eliminovať. Aj v tomto prípade je vhodné, aby začalo skôr prichádzať viac áut. Ak by o 6:05 prišlo o 70 áut viac, tak v čase 7:05 - 7:25 príde o 60 áut



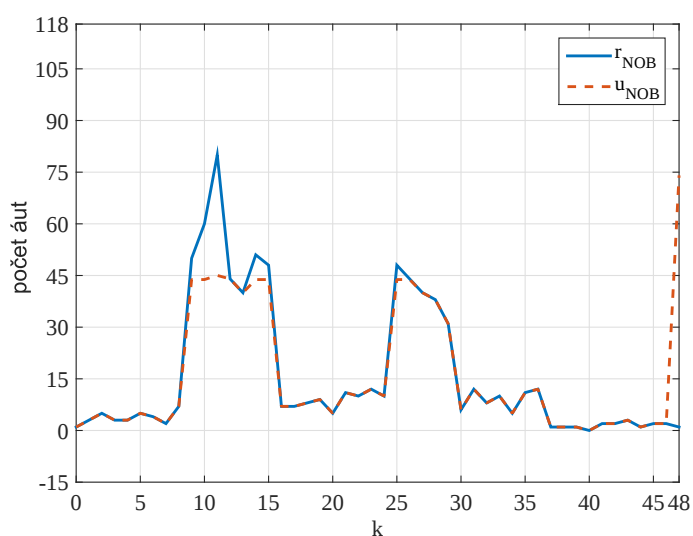
Obr. 4.26: Optimálne riešenie akčných zásahov na vstupe z Račianskej ulice pri premenlivej rýchlosti.



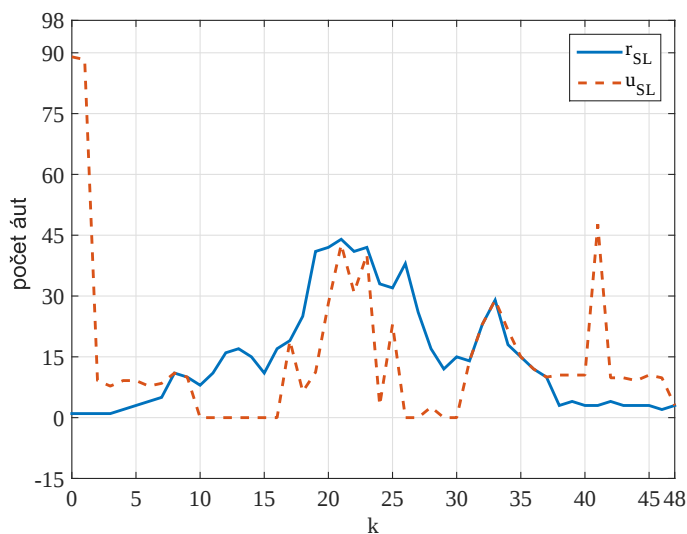
Obr. 4.27: Optimálne riešenie akčných zásahov na vstupe z Peknej cesty pri premenlivej rýchlosti.

menej a intenzita dopravy v sektore by sa znížila. Takisto je nutné zníženie áut medzi 7:50 až 8:25. Na druhej strane, v neskorších intervaloch môže prísť až o 150 áut viac a stále by bola premávka plynulá.

- Z Nobelovej ulice sa pripájajú autá do S_2 , pričom táto ulica nie je taká frekventovaná a napriek tomu sa v danom sektore tvoria dopravné zápchy, pretože veľké množstvo áut doň prichádza z predchádzajúceho úseku. Tu je potrebné, aby sa od 6:45 presúvalo o 6 áut menej, v ďalšej 5-minutovke o 16 menej a po 6:55 o 35 áut menej ako je to teraz. V ďalších časových intervaloch optimalizácia hovorí, že je takmer všetko v poriadku a pred desiatou hodinou by malo ísť o 73 áut viac.



Obr. 4.28: Optimálne riešenie akčných zásahov na vstupe z Nobelovej ulice pri premenlivej rýchlosti.



Obr. 4.29: Optimálne riešenie akčných zásahov na vstupe zo Sliachskej ulice pri premenlivej rýchlosti.

- Obrázok 4.29 znázorňuje predikčný horizont akčných zásahov na vstupe zo Sliachskej ulice. Autá prichádzajúce z tejto ulice vstupujú do sektora S_3 . Podľa výsledkov optimalizácie mnoho áut prichádza medzi 7:20 až 8:25 a je potrebné znížiť toto množstvo. Ideálne je, aby autá dostavili o 6tej hodine v maximálnom počte pre daný sektor, čo je 89 a až do 6:45 ich má byť približne o 5 viac ako v reálnej situácii. V intervale 6:50 - 8:35 vzniká nutnosť zníženia prichádzajúcich áut asi o 20, nech sa nevytvárajú dopravné zápchy. Kompenzáciou tohto zníženia je využitie tejto trasy od 9:10, keď môže prejsť týmto úsekom viac áut.

Tabuľka 4.9: Optimálne rozmiestnenie áut s premenlivou rýchlosťou.

k	čas	S_1	S_2	S_3	u_{PC}	u_{RAC}	u_{NOB}	u_{SL}	d_{PC}	d_{RAC}	d_{NOB}	d_{SL}
1	6:00	0	0	0	13	158	1	89	0	114	0	88
2	6:05	171	1	89	84	87	3	88	70	0	0	87
3	6:10	171	117	89	10	161	5	9	0	82	0	8
4	6:15	171	119	89	13	158	3	8	0	64	0	7
5	6:20	171	117	89	11	160	3	9	0	54	0	7
6	6:25	171	117	89	13	158	5	9	0	0	0	6
7	6:30	171	119	89	9	162	4	8	-5	0	0	4
8	6:35	171	118	89	20	144	2	8	0	0	0	3
9	6:40	164	116	89	16	155	7	11	-1	0	0	0
10	6:45	171	117	90	12	159	44	10	-12	0	-6	0
11	6:50	171	158	89	18	151	44	0	0	0	-16	-8
12	6:55	169	158	108	19	124	45	0	0	0	-35	-11
13	7:00	143	158	108	21	143	44	0	0	0	0	-16
14	7:05	164	140	108	0	171	40	0	-65	-232	0	-17
15	7:10	171	150	95	0	171	44	0	-73	-197	-7	-15
16	7:15	171	158	102	0	171	44	0	-60	-151	-4	-11
17	7:20	171	158	108	0	171	7	0	-55	-83	0	-17
18	7:25	171	121	108	73	171	7	19	0	-44	0	0
19	7:30	244	121	102	38	74	8	6	0	0	0	-19
20	7:35	161	139	89	41	94	9	11	0	0	0	-30
21	7:40	135	117	106	38	114	5	28	0	0	0	-14
22	7:45	152	95	108	40	93	11	43	0	0	0	-1
23	7:50	133	113	108	0	171	10	31	-65	-73	0	-10
24	7:55	171	99	108	51	120	12	40	-37	-171	0	-2
25	8:00	171	126	108	0	171	10	3	-52	-151	0	-30
26	8:05	171	124	89	0	171	44	23	-83	-122	-4	-9
27	8:10	171	158	108	0	171	44	0	-65	-76	0	-38
28	8:15	171	158	108	0	171	40	0	-78	-164	0	-26
29	8:20	171	154	108	0	171	38	3	-83	-113	0	-14
30	8:25	171	152	108	38	118	31	0	0	0	0	-12
31	8:30	156	145	104	23	117	6	0	0	0	0	-15
32	8:35	140	111	99	35	97	12	14	0	0	0	0
33	8:40	132	106	89	28	105	8	23	0	0	0	0
34	8:45	133	96	95	76	79	10	29	55	0	0	0
35	8:50	155	99	95	5	148	5	22	0	131	0	4
36	8:55	153	109	89	137	18	11	15	131	0	0	0
37	9:00	155	113	89	5	166	12	12	0	150	0	0
38	9:05	171	116	89	4	167	1	10	0	152	0	0
39	9:10	171	115	89	3	168	1	11	0	152	0	8
40	9:15	171	115	89	74	17	1	11	71	0	0	7
41	9:20	91	115	89	3	168	0	11	0	153	0	8
42	9:25	171	61	89	154	17	2	48	151	0	0	45
43	9:30	171	116	89	156	15	2	10	152	0	0	6
44	9:35	171	116	89	4	167	3	10	0	152	0	7
45	9:40	171	117	89	4	167	1	9	0	152	0	6
46	9:45	171	115	89	3	85	2	11	0	71	0	8
47	9:50	88	116	89	3	168	2	10	0	155	0	8
48	9:55	171	61	89	107	15	74	3	105	0	73	0

Kapitola 5

Implementácia do budúcnosti

Súčasná situácia na Račianskej ulici v ranných hodinách je nepriaznivá kvôli častým dopravným zápcham. Podobné problémy majú takmer všetky väčšie mestá nielen na Slovensku ale i v zahraničí, ako sme to opísali v kapitole 1. Dnešné pomery v rannej špičke sú zobrazené na obrázku 5.1, do budúcnosti chceme, aby sa to zmenilo podľa obrázka 5.2.



Obr. 5.1: Súčasný stav na Račianskej ulici.

Pomocou prediktívneho riadenia sme navrhli možné varianty kedy by sa ľudia

mali presúvať po jednotlivých úsekoch, aby nevznikali dopravné zápchy. Avšak vzniká tu jedna dôležitá otázka: Ako docieľiť, aby ľudia využili práve toto riešenie? Medzi siedmou a deviatou hodinou je Račianska ulica najviac vyťažená, preto je dôležité ľudí motivovať, aby vymedzenou trasou prešli v iných hodinách.

Riešení je mnoho, avšak niektoré z nich je potrebné implementovať postupne, pretože ich zavádzanie je dlhodobé a predchádzajú mu skúšobné testy. Najlepší scenár na odbremenenie dopravy je využívanie MHD, nielenže sa centrum mesta odblokuje z veľkého množstva áut, ale i ovzdušie v meste sa zlepší. Aby bolo cestovanie s MHD pohodlnejšie a plynulejšie, je dôležité zavedenie detekcie vozidiel MHD na križovatkách, ktorá ovplyvňuje správanie sa svetelnej signalizácie.



Obr. 5.2: Optimálna vyťaženosť Račianskej ulice.

Najmodernejšie systémy sú zabudované priamo do križovatiek ako napríklad indukčné slučky, optické snímače a detektory na koľajových tratiach. Zdroj [8] hovorí o trende v zahraničí je zasielanie údajov pomocou palubných počítačov MHD do riadiacich centier, kde sa vyhodnocujú a na ich základe sa ovplyvňuje riadenie križovatiek. Jednou z motivácií ako dosiahnuť toto riešenie je zavedenie

mýta počas najväčšej intenzity vo všetkých úsekoch ciest. V dnešnej dobe sa to môže zdať nereálne na naše pomery, avšak v zahraničí to funguje mnohé roky. Kvôli plynulejšej premávke by mohli byť poplatky za mýto vyberané od vodičov elektronicky ako je to napríklad zaužívané pri poplatkoch na diaľniciach.

Ďalšie možné riešenie je ponúknuť šoférom rôzne benefity, ak by využili naše optimálne riešenie, mali by úľavy pri tankovaní pohonných hmôt, zľavy na servis vozidiel a diaľničné známky.

Veľmi populárne v poslednom čase je takzvaný car-sharing ako sa uvádza v článku [9]. Ide o zdieľanie jedného auta medzi viacerými účastníkmi cestnej premávky. Tento fenomén je vhodný pre ľudí, ktorí nepotrebujú auto denne a týmto môžu ušetriť stovky eur ročne. Na základe registračného poplatku získa vodič čipovú kartu s prístupom k autu, ktoré si môže rezervovať a pomocou aplikácie cez smartfón vyhľadať na najbližšom parkovacom mieste. Ďalej sa platí mesačný paušál podľa miery využívania automobilu. Cez aplikáciu sa môžu zaregistrovaní členovia dohodnúť a využiť spoločne jedno vozidlo, čím sa im rozdelia náklady na pohonné hmoty.

Z našich pozorovaní sme zistili, že k naplneniu sektoru S_1 prispievajú hlavne autá odbáčajúce na Nobelovu ulicu. Síce je na tejto križovatke vybudovaný odbočovací pruh, ale je príliš krátky na také množstvo áut, ktoré chcú ísť doľava. Náš návrh je, aby sa spomínaný odbočovací pruh predĺžil a tým pádom budú mať autá, ktoré idú rovno k dispozícii 2 pruhy. Podobný problém je aj na križovatke Račianska-Sliačska, kde sa veľa áut otáča do protismeru a zároveň tu nie je na otáčanie vytvorený žiadny vedľajší pruh. Otáčajúce sa vozidlá musia prejsť cez električkové koľajnice, čiže často musia dávať prednosť električkám a tak spomaľujú ostatné autá, ktoré chcú ísť rovno. Prípadné riešenie tejto situácie je zakáz otáčania sa na tejto križovatke alebo vytvorenie samostatného pruhu pre takéto vozidlá.

Záver

Našou úlohou v záverečnej práci bolo navrhnuť matematický model Račianskej ulice, pomocou ktorého sme optimalizovali dopravnú situáciu na Račianskej ulici.

Najskôr sme v teoretickej časti opísali všeobecnú problematiku prediktívneho riadenia. Načrtli sme súčasný stav problematiky a rôzne riešenia nášho problému v zahraničí. Odvodili sme matematický model vymedzených úsekoch v spojitom čase, ktorý sa ďalej diskretizoval do diskrétného času. Na riešenie optimalizačného problému sa použila účelová funkcia, ktorá minimalizuje rozdiel medzi vstupmi od referencie v jedna norme a rovnica predikcie. Zadefinovali sme ohraničenia na maximálnu kapacitu sektorov, pomery v ktorých sa prerozdeľujú vychádzajúce autá zo sektorov a začiatočnú podmienku.

V experimentálnej časti sa načrtlo získavanie informácií o intenzite dopravy na Račianskej ulici i vlastný zber dát. Porovnávali sme nami získané dáta s Magistrátom Bratislavy, ktoré sme znázornili aj graficky. Takisto sme porovnali reálnu situáciu s dopravnou zápchou ak sa všetkým autám podarí vyjsť zo sektorov do piatich minút a ak sa im to nepodarí.

Optimalizačný problém pomocou prediktívneho riadenia sme riešili v prostredí MATLAB-u. Vytvoreným skriptom sa overila správnosť odvodeného modelu. Výsledky sme spracovali do tabuľkovej i grafickej podoby. Porovnali sme riešenie s konštantnou rýchlosťou v sektoroch a s premenlivou rýchlosťou.

Naše návrhy do budúcnosti sme uviedli v kapitole 5. Zavedenie návrhov do

reality určite nebude jednoduché, avšak vzhľadom na pribúdajúce autá je prospešné zaviesť navrhované opatrenia na zlepšenie plynulosti premávky. Uvedené tipy je možné implementovať nielen na Račianskej ulici, ale všade tam, kde je tvorba dopravných zápch neúnosná.

Literatúra

- [1] TOMTOM. *MEASURING CONGESTION WORLDWIDE*. [online], [cit.2015.04.20.] Dostupné na internete: <http://www.tomtom.com/en_gb/trafficindex/#/list>.
- [2] BREJČÁK, P. *Menej strkačiek v MHD? Osvedčilo sa bezplatné cestovné*. [online], [cit.2015.04.20.] Dostupné na internete: <<http://www.etrend.sk/ekonomika/cestovne-zadarmo-ako-riesenie-napchatej-mhd.html>>.
- [3] Wikipedia - The Free Encyclopedia *Congestion pricing*. [online], [cit.2015.04.29.] Dostupné na internete: <http://en.wikipedia.org/wiki/Congestion_pricing>.
- [4] BAJZATH, J. *Semafore Bratislava*. [online], [cit.2015.04.20.] Dostupné na internete: <<http://www.semafore.sk/>>.
- [5] MACIEJOWSKI, J. *Predictive control: with constraints*. Pearson education, 2002.
- [6] ROSSITER, A. *Model-based predictive control: a practical approach*. CRC press, 2013.
- [7] MIKLEŠ, J. – FIKAR, M. *Process Modelling, Identification, and Control*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2007.

- [8] IMHD. *Semaforey Story*. [online], [cit.2015.05.22.] Dostupné na internete: <<http://imhd.zoznam.sk/ba/doc/sk/6885/Semaforey-Story.html#>>.
- [9] TVARDZÍK, J. *Auto za pár drobných je realita. Ak nie ste egoista*. [online], [cit.2015.05.22.] Dostupné na internete: <<http://www.etrend.sk/ekonomika/auto-za-par-drobnych-je-realita-ak-nie-ste-egoista.html>>.