

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA DOPRAVNÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2023

Bc. RŮŽIČKOVÁ MARIE



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

**Bc. Marie RŮŽIČKOVÁ**

**Návrh signálního plánu světelně řízené křižovatky metodami LP**

**Diplomová práce**

**2023**



**K617..... Ústav logistiky a managementu dopravy**

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Bc. Marie Růžičková**

Studijní program (obor/specializace) studenta:

**navazující magisterský – LA – Logistika a řízení dopravních procesů**

Název tématu (česky): **Návrh signálního plánu světelně řízené křižovatky metodami LP**

Název tématu (anglicky): Signal plan for a light-controlled intersection designed by LP methods

### **Zásady pro vypracování**

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- motivace k řešení problému,
- charakteristika řešené křižovatky,
- analýza vstupních dat ovlivňujících návrh signálního plánu,
- teoretická východiska řešení - popis zvolené metody,
- aplikace metod lineárního programování na návrh signálního plánu,
- porovnání dosažených výsledků se signálním plánem navrženým dle TP 81.



- Rozsah grafických prací: podle pokynů vedoucího diplomové práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: Černý, J.; Kluvánek, P.: Základy matematickej teórie dopravy. Bratislava: VEDA, 1991. ISBN 80-224-0099-8  
Pastor, O.; Tuzar, A.: Teorie dopravních systémů. Praha: ASPI, 2007. ISBN 978-80-7357-285-3

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Dušan Teichmann, Ph.D.**

Datum zadání diplomové práce: **30. června 2020**  
(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. listopadu 2023**  
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. Tomáš Horák, Ph.D.  
vedoucí  
Ústavu logistiky a managementu dopravy



prof. Ing. Ondřej Příbyl, Ph.D.  
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

.....  
Bc. Marie Růžičková  
jméno a podpis studenta

V Praze dne ..... 17. května 2023

## **Poděkování**

Děkuji svému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Dušanu Teichmannovi, Ph.D. za čas, který mi věnoval při vedení diplomové práce, za rady a připomínky, které mi pomohly k vypracování celé práce.

## **Prohlášení**

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

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

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

V Praze dne 30. 11. 2023

.....  
Podpis

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

## Návrh signálního plánu světelně řízené křižovatky metodami LP

diplomová práce

30. 11. 2023

Bc. Marie Růžičková

**ABSTRAKT:** Diplomová práce se zabývá návrhem signálního plánu pro světelně řízenou křižovatku v Kroměříži pomocí metod lineárního programování. Následně jsou porovnány výsledky dosažené pomocí lineárního programování s výsledky bakalářské práce autorky, ve které byl signální plán navrhován metodou saturovaného toku. V úvodu práce jsou shrnuty hlavní výsledky bakalářské práce. Dále práce obsahuje teoretický popis metody lineárního programování a postup její aplikace v řešené lokalitě. Závěrem jsou výsledky obou metod porovnány.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** matematický model, světelně řízená křižovatka, signální plán, metoda lineárního programování, metoda saturovaného toku, úroveň kvality dopravy, střední doba zdržení

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

Faculty of Transportation Sciences

Signal plan for a light-controlled intersection designed by LP  
method

diplom thesis

30. 11. 2022

Bc. Marie Růžičková

**ABSTRACT:** The diploma thesis deals with the design of a signal plan for a light-controlled intersection in Kroměříž using a linear mathematical model. Subsequently, the results achieved using linear programming are compared with the results of the author's bachelor's thesis, in which the signal plan was designed using the saturated flow method. The main results of the bachelor thesis are summarized in the introduction of the thesis. Furthermore, the thesis contains a theoretical description of the linear programming method and the procedure of its application in the addressed locality. Finally, the results of both methods are compared.

**KEY WORDS:** mathematical model, light-controlled intersection, signal plan, linear programming method, saturated flow method, traffic quality level, mean delay time

# Obsah

Seznam použitých zkratek a pojmů podle abecedy.....	9
1. Úvod.....	10
2. Motivace k výběru tématu.....	11
3. Charakteristika křižovatky a širší dopravní vztahy.....	12
3.1. Popis křižovatky.....	12
3.2. Aktuální řešení.....	14
3.3. Situační výkres nově navržené křižovatky.....	15
4. Analýza vstupních dat.....	16
4.1. Dopravní průzkum.....	16
4.1.1. Načasování průzkumu.....	16
4.1.2. Zásady provádění a vyhodnocování dopravních průzkumů dle TP 189.....	16
4.1.3. Vyhodnocení dopravního průzkumu.....	16
4.1.4. Pentlogramy intenzit.....	17
4.2. Posouzení kapacity křižovatky.....	19
4.3. Kritéria návrhu SSZ [4].....	20
4.4. Metody pro návrh řízení SSZ.....	22
4.4.1. Metoda saturovaného toku.....	22
4.4.2. Metoda spotřeby času.....	22
4.4.3. Metoda postupného porovnávání.....	22
4.4.4. Metoda lineárního programování.....	23
5. Shrnutí výsledků řízení křižovatky pomocí metody saturovaného toku.....	25
5.1. Návrh fází dle metody saturovaného toku.....	25
5.2. Charakteristika signálních plánů navržených metodou saturovaného toku [1].....	25
5.3. Kapacitní posouzení řízené křižovatky [1].....	26
6. Návrh signálního plánu s využitím metody LP.....	28
6.1. Postup návrhu řešení SSZ.....	28
6.1.1. Sumarizace vstupních dat.....	28
6.2. Tvorba tabulky mezičasů a sestavení množiny fází.....	29
6.3. Výběr minimálního počtu fází.....	31
6.4. Stanovení optimálního pořadí vybraných fází.....	34
6.4.1. Návrh pořadí fází.....	35
7. Matematické modely pro tvorbu signálního plánu.....	38
7.1. Matematický model s optimalizačním kritériem délka cyklu.....	38
7.1.1. Zdrojový kód matematického modelu s optimalizačním kritériem hodnota minimální poměrné rezervy.....	40



7.1.2.	Výsledek řešení matematického modelu – minimalizace délky cyklu pro ranní špičku .....	42
	Signální plán varianty modelu s minimalizací délky cyklu, ranní špička .....	43
7.1.3.	Výsledek řešení matematického modelu – minimalizace délky cyklu pro odpolední špičku.....	46
	Signální plán varianty modelu s minimalizací délky cyklu, odpolední špička .....	47
7.2.	Matematický model s optimalizačním kritériem hodnota minimální poměrné rezervy .	48
	.....	
7.2.1.	Zdrojový kód matematického modelu s optimalizačním kritériem hodnota minimální poměrné rezervy.....	49
7.2.2.	Výsledek řešení matematického modelu – minimalizace délky cyklu pro odpolední špičku.....	50
	Signální plán varianty modelu s minimální poměrnou rezervou, ranní špička.....	51
7.2.3.	Výsledek řešení matematického modelu – minimalizace délky cyklu pro odpolední špičku.....	53
	Signální plán varianty modelu s minimální poměrnou rezervou, odpolední špička .....	54
7.3.	Vyhodnocení navržených řešení z hlediska úrovně kvality dopravy (ÚKD) .....	55
7.4.	Výpočty posouzení kapacit SSZ a posouzení ÚKD .....	56
7.4.1.	Saturovaný tok.....	56
7.4.2.	Výsledky ÚKD.....	57
7.5.	Shrnutí výsledků modelů.....	59
8.	Porovnání výsledků LP a metody saturovaného toku.....	61
8.1.	Charakteristika problému .....	61
8.1.1.	Principy jednotlivých metod .....	61
	Metoda saturovaného toku .....	61
	Metoda lineárního programování .....	61
8.1.2.	Rozdíly při výpočtech.....	61
8.2.	Grafické porovnání střední doby zdržení .....	62
	Ranní špička.....	62
	Odpolední špička .....	63
8.3.	Porovnání úrovně kvality dopravy .....	64
9.	Závěr .....	65
	Seznam použité literatury .....	66
	Seznam obrázků.....	68
	Seznam tabulek .....	69
	Seznam grafů .....	70

## Seznam použitých zkratk a pojmů podle abecedy

ČSN	Česká státní norma
D	vnější průměr okružní křižovatky [m]
LP	lineární programování
MHD	městská hromadná doprava
RPDI	roční průměr dopravních intenzit
SSZ	světelné signalizační zařízení
ST	saturovaný tok
TP	Technické podmínky
ÚKD	úroveň kvality dopravy

# 1. Úvod

Doprava a problémy s ní související jsou v dnešní době velice častým tématem řešeným napříč celou společností. Výstavba nových komunikací, stejně jako budování křižovatek vybavených SSZ či okružních křižovatek, zaměstnává po celém světě desítky lidí a s výhledem do budoucnosti nebude její význam ztrácet na aktuálnosti. Statisíce lidí po celém světě totiž tráví rána i večery v dopravních kongescích, v kongescích se také spotřebovávají značné objemy paliva a situace se s rostoucími životními standardy společnosti stále více zhoršuje.

Téma návrhu SSZ je dle názoru autorky v této době velice důležité, především z důvodů umírnění dopravy, již zmíněné časté tvorby dopravních kongescí, zlepšení provozních podmínek na křižovatkách a zvýšení plynulosti jízdy vozidel přes křižovatky.

Diplomová práce byla vypracována za účelem posouzení návrhu řízení světelně řízené křižovatky v Kroměříži pomocí metod lineárního programování a porovnání dosaženého výsledku s výsledky bakalářské práce autorky, kde byla řešena stejná křižovatka, ovšem její světelné řízení bylo navrhováno pomocí metody saturovaného toku dle TP 81 s následným ověřením výsledků v programu VISSIM. [1]

Přestože celá řada informací podstatných pro návrh signálního plánu byla publikována v bakalářské práci, budou v úvodních kapitolách ve stručnosti zopakovány důležité poznatky o řešené křižovatce. Zopakována například bude analýza a hodnocení současné dopravní situace a budou převzaty výsledky dopravního průzkumu, který byl proveden na jaře roku 2018.

Dále budou popsána teoretická východiska řešení charakteristikou zvolené metody pro tuto DP.

V praktické části práce se autorka bude zabývat aplikací metod lineárního programování u zvolené křižovatky, kdy pak v závěru práce aplikaci metod zhodnotí a porovná s výsledky uvedenými v bakalářské práci. Úplným závěrem práce budou shrnuty veškeré poznatky získané při zpracování této práce.

## 2. Motivace k výběru tématu

Jak bylo zmíněno v úvodu diplomové práce, řešení dopravních situací, a to především v období ranní či odpolední špičky, je pro společnost velice aktuálním tématem. V práci se bude sice jednat pouze o řešení jedné konkrétní křižovatky v moravském městě střední velikosti, ale přesto zůstane zachován hlavní účel, kterým je zlepšení celkové dopravní situace v daném městě.

Jedná se o okružní trojramennou křižovatku, pro kterou je v bakalářské práci navrhováno přebudování na světelně řízenou křižovatku.

Pro výběr tohoto tématu byly vybrány hlavní tři důvody:

Prvotní motivací pro autorku této práce byl již fakt, že město Kroměříž má s danou křižovatkou dlouhodobé problémy, které se objevily již při jejím otevření. Z toho důvodu podrobila tuto křižovátku analýze již ve své bakalářské práci. Bylo navrženo jedno řešení, které bude teď v práci diplomové rozšířeno o další řešení, a to s využitím jiné metody.

Druhým důvodem volby této křižovatky je významná tvorba kongescí v době dopravní špičky, která je zapříčiněna především špatnou viditelností při vjezdu a malým poloměrem okružní křižovatky.

Dalším důvodem k výběru tématu je existující možnost porovnání výsledků dvou různých možných metod sloužících k řešení daného problému a zamyšlení se nad tím, proč je tento výsledek takový, jaký je a jaký je důvod odlišností.

Posledním motivačním prvkem pro psaní této práce je potenciál jejího využití v praxi, tj. tato práce může sloužit městu k možnému rozhodování o dalším postupu práce na křižovatce.

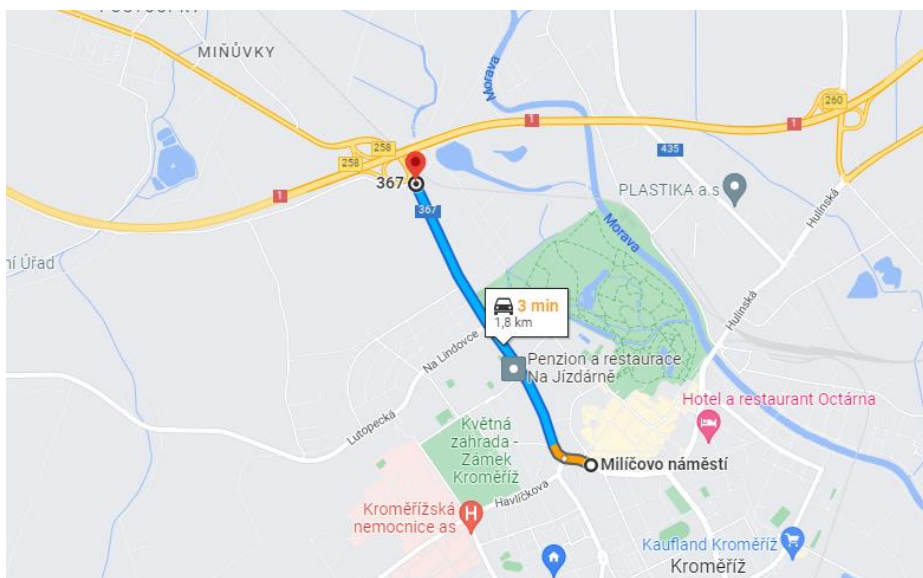
### **3. Charakteristika křižovatky a širší dopravní vztahy**

Následující kapitola se bude zabývat popisem křižovatky, její charakteristikou, popisem širších dopravních vztahů v jejím okolí. Charakteristika křižovatky především po stránce aktuálního řešení neřízené okružní křižovatky a situační návrh starého i nového řešení. Tyto body by čtenáři měly přiblížit problematiku daného místa, a tedy i upřesnit důvody, proč se daným tématem autorka zabývá.

#### **3.1. Popis křižovatky**

Jak již bylo uvedeno v úvodu, byly provozní podmínky na křižovatce podrobně analyzovány v bakalářské práci autorky a v diplomové práci bude uvedena pouze základní charakteristika řešené lokality. [1]

Řešená křižovatka se nachází v obci Kroměříž ve Zlínském kraji, konkrétně na náměstí Míru, kde se stýkají ulice Kojetínská, Velehradská a Milíčovo náměstí (viz obrázek 1). Na Kojetínskou ulici se ještě před vjezdem do města napojuje sjezd z dálnice D1 vzdálený 1,8 km (viz obrázek 1). Velehradská ulice vede do obytné části města a k novému parkovacímu domu, který byl vybudován především pro návštěvníky města. V současné době však samotný parkovací dům není příliš využíván. Milíčovo náměstí ústí do historického centra města a ke dvěma gymnáziím, z nichž jedno stojí přímo na náměstí. Na Milíčově náměstí sídlí v západní části poliklinika města, u které je vybudováno i parkoviště s jednosměrným provozem (vjezd parkoviště je veden z Kojetínské ulice, výjezd směrem na ulici Velehradskou). V severní a jižní části náměstí jsou lokalizovány obchody a bytové jednotky. Přechody pro chodce vedou na okrajích náměstí ve větší vzdálenosti od křižovatky a v novém řešení zůstane jejich poloha zachována (viz obrázek 3 a obrázek 4).



Obrázek 1: Spojení Kroměříže s dálnicí D1 [2]



Obrázek 2: Okružní křižovatka náměstí Míru [převzato a upraveno z [2]]

Severozápadní rameno křižovatky směřuje od dálnice D1 z ulice Kojetínská.

Největší dopravní kongesce byly zjištěny v období ranní špičky při příjezdu zaměstnanců a žáků/studentů do města. V odpolední špičce zde převažují intenzity vozidel směřující do ulice Velehradská při návratu obyvatel do míst jejich bydlišť.

Východním vjezdem je na řešenou křižovatku přijížděno ze směru Milíčova náměstí. Vjezd do křižovatky v tomto směru je ovlivňován světelně řízeným přechodem pro chodce, který se nachází přibližně ve vzdálenosti 90 m od řešené křižovatky (viz obrázek 3). Při odpolední špičce je zde největší podíl vozidel s řidiči vracujícími se domů ze zaměstnání. Výjezd z okružní křižovatky výrazně ovlivňuje levé odbočení před přechodem pro chodce, kdy při velkém množství vozidel odbočujících do centra města fronta čekajících vozidel zasahuje až do křižovatky.

Poslední, jihovýchodní vjezd do řešené křižovatky směřuje od ulice Velehradská, která je vedena od obytné části města. Na tomto rameni je na vjezdu nejčastěji zjištěna kongesce při ranní špičce při dojíždění obyvatel do zaměstnání.



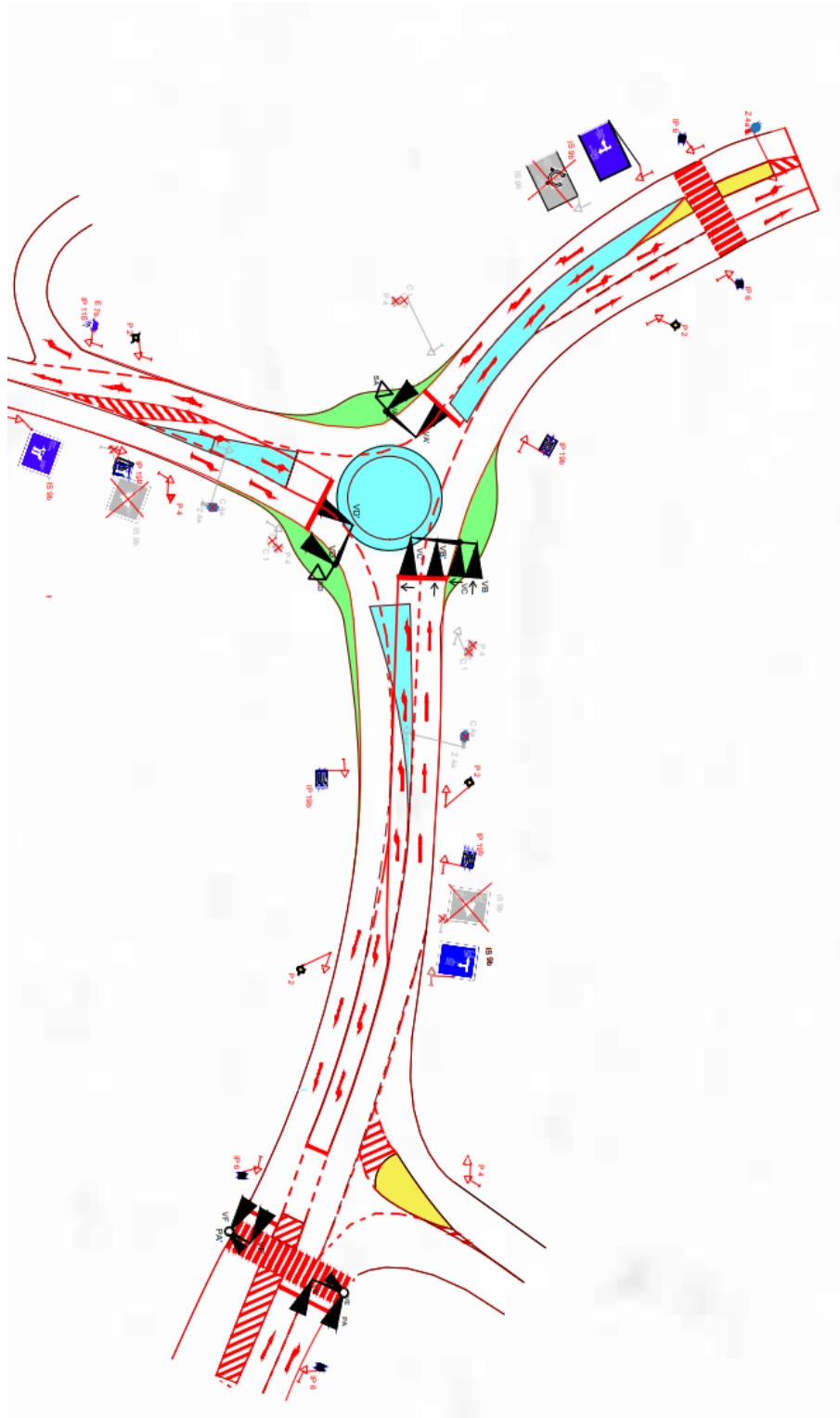
Obrázek 3: Přechod pro chodce Milíčovo náměstí [převzato a upraveno z [2]]

### 3.2. Aktuální řešení

V současné době je křižovatka stavebně uspořádána jako křižovatka okružní s poloměrem 15 m. Nejedná se tedy o miniokružní křižovatku, které mají stanoven průměr  $D \leq 23$  m, ale o malou okružní křižovatku, která neumožňuje průplet vozidel. Malé okružní křižovatky mají daný průměr  $D \leq 40$  m. Přechody pro chodce jsou umístěny ve větší vzdálenosti od křižovatky (viz obrázek 2 a obrázek 4). Jedná se o neřízenou okružní křižovatku.

### 3.3. Situační výkres nově navržené křižovatky

Obrázek 4 znázorňuje situační schéma, ve kterém lze vidět původní i novou situaci. Jde o výkres z programu AutoCAD zhotovený autorkou diplomové práce.



Obrázek 4: Situační výkres nově navržené křižovatky [1]



## 4. Analýza vstupních dat

Kapitola se zabývá analytickou částí řešení, konkrétně popisem dopravního průzkumu uskutečněného autorkou pro potřeby BP a následným vyhodnocením dat z provedeného průzkumu.

### 4.1. Dopravní průzkum

#### 4.1.1. Načasování průzkumu

Dopravní průzkum byl uskutečněn 6. 11. 2018 a 13. 11. 2018. Měření se uskutečnilo v úterý 6. 11. od 6:45 do 7:45 a v úterý 13. 11. od 14:30 do 15:30.

#### 4.1.2. Zásady provádění a vyhodnocování dopravních průzkumů dle TP 189

Vyhodnocování dat získaných průzkumem bylo prováděno dle zásad TP 189 – Stanovení intenzit dopravy na pozemních komunikacích. Stanovení odhadu RPDÍ na základě krátkodobého průzkumu je prováděn pomocí přepočtových koeficientů (viz tabulka 1), které charakterizují denní, týdenní a roční variace intenzit dopravy. Přepočtové koeficienty se stanovují zvlášť pro různé skupiny vozidel (viz tabulka 1). Záleží také na charakteru provozu na pozemní komunikaci a období, kdy se průzkum provádí. Dále u silnic II. a III. třídy je další dělení podle podílu rekreační dopravy. [11]

#### 4.1.3. Vyhodnocení dopravního průzkumu

Veškerá data a výpočty v této kapitole jsou převzaty ze zdroje. [1]

Provoz na křižovatce byl snímán kamerou po dobu dvou hodin, rozděleno po hodině v období ranní a odpolední špičky. Následně byl záznam opakovaně shlédnut a byla zaznamenána veškerá vozidla vstupující do řešené křižovatky ve všech směrech. Následně bylo nutné převést výsledky na tzv. jednotková vozidla, k čemuž se používají koeficienty uvedené v tabulce 1.

Druh vozidla	Hodnota přepočítacího koeficientu- jednotkové vozidlo [-]
Jízdní kolo	0,5
Motocykl	0,8
Osobní vozidlo (do 3,5 t hmotnosti)	1,0
Nákladní vozidlo (nad 3,5 t hmotnosti), autobusy	1,7
Nákladní souprava, kloubový autobus	2,5

Tabulka 1: Koeficienty pro přepočet fyzických vozidel na jednotková vozidla [1]

Pro názornost je do textu práce zařazena tabulka 2, ve které jsou uvedena data naměřená v období odpolední špičky. V bakalářské práci je uvedena i tabulka ranní špičky. [1] Tabulka je vytvořena v programu MS Excel.

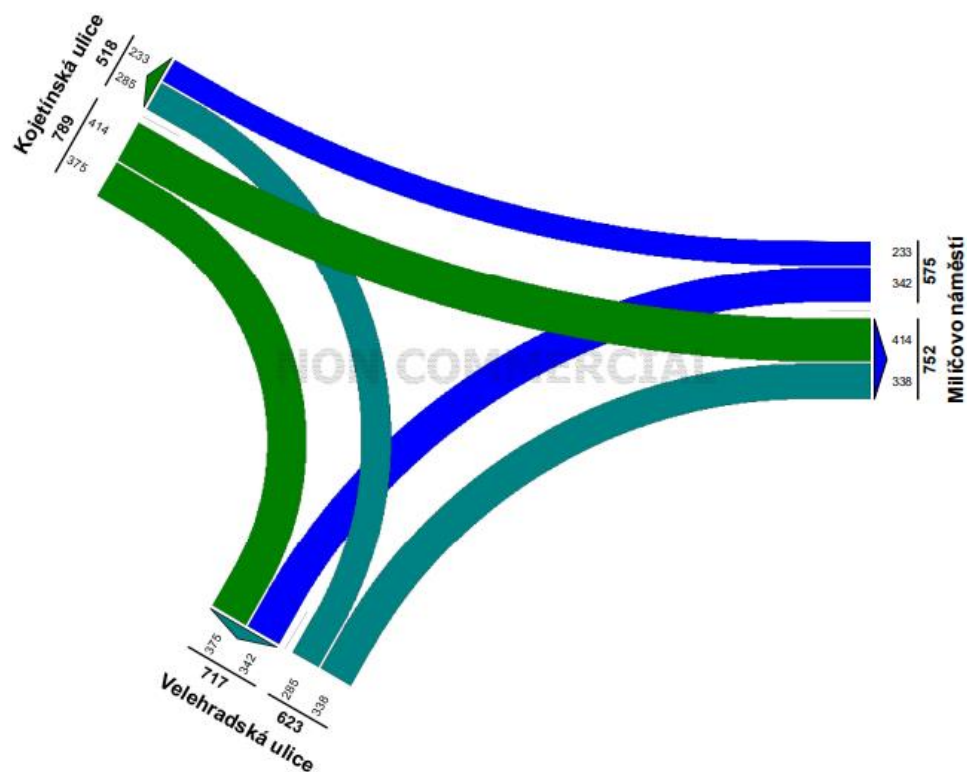
Intenzity dopravy - rok 2019 (14:30 - 15:30 hodin)								
Název křižovatky:		Kojetínská x Velehradská v Kroměříži						
Rameno	Název komunikace	Směr jízdy	Jízdní kola	Motocykly	Osobní automobily	Nákladní vozidla	Nákladní soupravy	Zohledněná skladba
			[voz/hod]	[voz/hod]	[voz/hod]	[voz/hod]	[voz/hod]	[j.voz/hod]
			1	2	3	4	5	6
A	Kojetínská	Miličovo n.	0	0	378	26	1	425
		Velehradská	0	0	312	24	0	353
B	Miličovo n.	Velehradská	3	1	337	12	3	367
		Kojetínská	1	1	440	9	2	462
C	Velehradská	Kojetínská	4	2	253	10	2	279
		Miličovo n.	2	1	325	34	4	395

Tabulka 2: Intenzity v období odpolední špičky [1]

#### 4.1.4. Pentlogramy intenzit

Výsledné intenzity v jednotlivých proudech jsou vyznačeny v následujících pentlogramech (pentlogramy jsou vytvořeny v programu LISA+ studentská verze). [1]

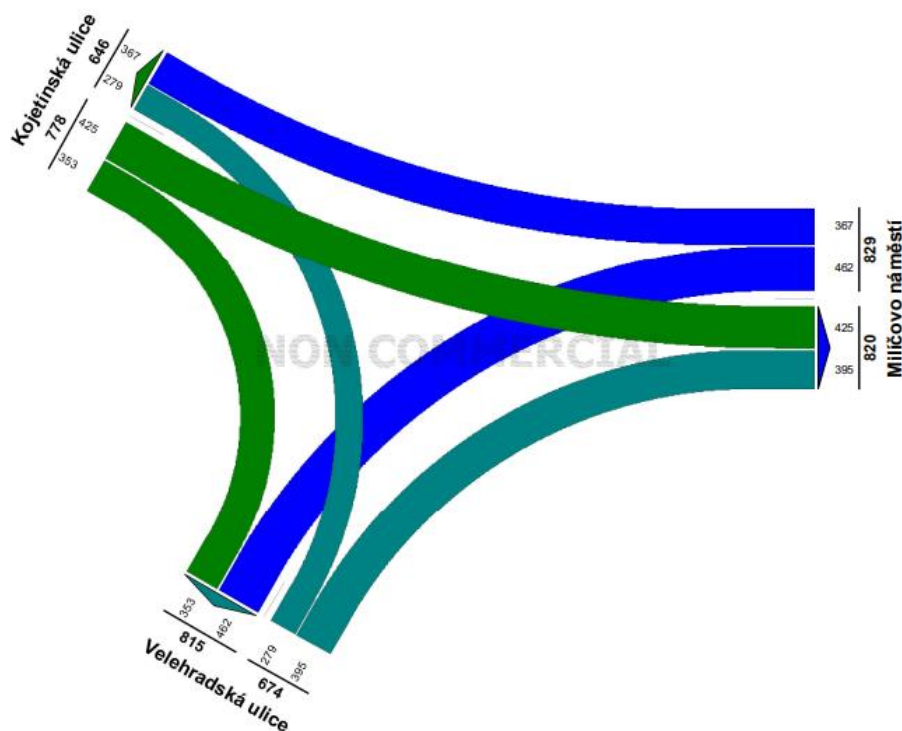
##### Ranní špička



Obrázek 5: Pentlogram intenzit ranní špička [1]

Nejvyšší intenzity v ranní špičce byly pozorovány ze směru ulice Kojetínské do centra města. Nejméně vozidel vyjíždělo z centra města. Je zde tedy patrné, že největší kongesce se tvořily ve směru z ulice Kojetínská na Milíčovo náměstí.

#### Odpolední špička



Obrázek 6: Pentlogram intenzit odpolední špička [1]

V případě odpolední špičky jsou vidět vyšší intenzity v opačných směrech, než byly zaznamenány v ranní špičce. Největší intenzity jsou pozorovány z centra města do obytné části, a naopak nejméně vozidel vyjíždí ve směru na dálnici či do Kojetína.

## 4.2. Posouzení kapacity křižovatky

Pro výpočet kapacit je důležitým ukazatelem tzv. úroveň kvality dopravy – dále jen ÚKD (v tabulce 3 jsou uvedeny hodnoty pouze pro okružní křižovatky).

Úroveň kvality dopravy		Střední doba zdržení $t_w$ [s]
Označení	Charakter kvality dopravy	
A	Velmi dobrá	(0;10>
B	Dobrá	(10;20>
C	Uspokojivá	(20;30>
D	Dostatečná	(30;45>
E	Nestabilní stav	>45
F	Překročená kapacita	-

Tabulka 3: Úroveň kvality dopravy na křižovatkách [3]

Posuzování úrovně kvality dopravy bylo provedeno na základě TP 234 Posuzování kapacity okružních křižovatek [3]. Pro danou křižovátku je ÚKD odpovídající písmenu D v případě komunikace Kojetínská a Milíčova náměstí a písmenu E v případě komunikace Velehradská. V [1] byly provedeny výpočty kapacit, kdy pro jednotlivé proudy výsledky byla zjištěna ÚKD takto:

Kapacita vjezdu								
		$I_k$	$C_i$	Rez	$t_w$	$a_v$	$N_{95\%}$	ÚKD
Paprsek	Název	[j.voz/h]	[j.voz/h]	[j.voz/h]	[s]	[-]	[m]	[-]
A	Kojetínská	789	865	76	45.41	0.9121	122	E
B	Milíčovo náměstí	575	851	276	21.68	0.6757	36	C
C	Velehradská	623	806	183	40	0.7730	56	D

Tabulka 4: ÚKD kapacita vjezdu

$I_k$  - intenzita dopravy na okruhu

$C_i$  - kapacita na vjezdu

Rez - rezerva kapacity vjezdu

$t_w$  - střední doba zdržení na vjezdu do světelně řízené křižovatky

$a_v$  - stupeň vytížení

$N_i$  - koeficient zohledňující počet jízdnic pruhů na vjezdu

Z tabulky 4 je patrné, že u Kojetínské ulice je ÚKD nedostačující (písmeno E). Na vjezdu z křižovatky byla na všech paprscích křižovatky zjištěna ÚKD odpovídající písmenu D.

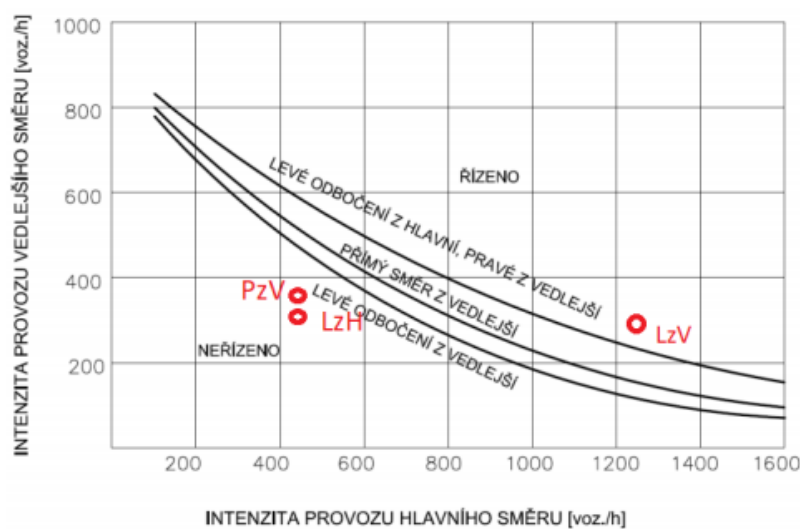
### 4.3. Kritéria návrhu SSZ [4]

Kritéria návrhu světelně řízené křižovatky jsou důležitým ukazatelem, který napoví, zda u dané křižovatky má smysl vytvářet světelně řízenou signalizaci. V literatuře [4] je za tímto účelem definováno celkem pět kritérií:

1. kritérium podle bezpečnosti,
2. kritérium z hlediska intenzit vozidel,
3. kritérium z hlediska intenzity chodců,
4. kritérium plynulosti vozidel MHD,
5. kritérium místa zvláštního zřetele (Kritérium podle zvláštního zřetele je v aktualizované verzi TP 81 platné od září 2018 součástí (podmnožinou) kritéria podle bezpečnosti.).

V [1] byla provedena analýza všech kritérií a výsledkem je:

1. Kritérium podle bezpečnosti – podle statistik PČR [5] se zde v posledních letech odehrálo pouze 16 nehod, což není dostatečný důvod pro aplikaci tohoto kritéria. Stávající okružní křižovatka je tedy považována za bezpečnou.
2. Kritérium z hlediska intenzit vozidel – v tomto případě je jedna podmínka splněna, levé odbočení z vedlejší komunikace (v tomto případě z ulice Velehradská) se nachází nad povolenou křivkou (graf 1). Návrh výstavby SSZ v křižovatce splňuje kritérium intenzity z hlediska vozidel.



Graf 1: Graf kritérií z hlediska intenzity vozidel [1]

3. Kritérium intenzity z hlediska chodců – vzhledem k faktu, že přechody pro chodce nejsou zahrnuty do SSZ, není vhodné toto kritérium uvažovat.
4. Kritérium plynulosti vozidel MHD – intenzita MHD v těchto místech není příliš vysoká. Průměrně zde projedou 3 autobusy MHD za hodinu [1]. Zdržení jednoho autobusu pak je v rozmezí 0,5 – 1 min. Aby byl brán ohled na uvedené kritérium, musí být zdržení alespoň každého druhého vozidla MHD na dobu delší než dvě minuty ve třech nejzatíženějších hodinách dne. Proto kritérium plynulosti vozidel MHD není nutné uvažovat.
5. Kritérium místa zvláštního zřetele – v okolí křižovatky se nachází především budovy se službami. Intenzity chodců nejsou vysoké, každý chodec ovšem ve vysokém provozu může provoz na chvíli omezit. Zvláště pak bývá problémové, když je při větším provozu intenzivně používáno SSZ s přechodem pro chodce (viz obrázek 2). V tomto místě totiž často vozidla zasahují od SSZ až do křižovatky, což je velký problém. Proto by bylo vhodné existující signalizaci pro chodce koordinovat s navrhovaným SSZ, aby k podobným situacím nedocházelo, popřípadě, aby se jejich výskyt alespoň částečně eliminoval. Návrh výstavby SSZ v křižovatce splňuje kritérium místa zvláštního zřetele. (Kritérium podle zvláštního zřetele je v aktualizované verzi TP 81 platné od září 2018 součástí (podmnožinou) kritéria podle bezpečnosti.)

Z výše uvedeného pak vyplývá, že je vhodné osazení křižovatky SSZ, a to s odůvodněním vyhovujících kritérií z hlediska intenzit vozidel a kritéria místa zvláštního zřetele – tedy, kritéria bezpečnosti.

#### **4.4. Metody pro návrh řízení SSZ**

Následující kapitola bude teoreticky rozebírat jednotlivé metody, které nabízí řešení pro návrhy světelného řízení křižovatky. Jedná se o metodu saturovaného toku, metodu spotřeby času, metodu postupného porovnávání a metodu lineárního programování. Metoda saturovaného toku byla použita v bakalářské práci a použití metody lineárního programování bude hlavním předmětem práce diplomové.

##### **4.4.1. Metoda saturovaného toku**

Jedná se o jednu z nejčastěji využívaných metod v praxi a to především díky jednoduchosti a jasně daným kritériím. Metoda saturovaného toku byla použita pro výpočty u totožné křižovatky v BP a výsledky budou porovnávány s výsledky podle metody lineárního programování. Proto bude představena podrobněji.

Podstatou metody je výpočet tzv. saturovaného toku, který je definován jako maximální počet jednotkových vozidel, která mohou projet profilem stopčáry za jednotku času (hodinu zelené). Průjezd vozidel je uvažován při ideálních dopravních podmínkách.

Faktory ovlivňující průjezd vozidel křižovatkou jsou:

- šířka vjezdu,
- podélný sklon vozovky,
- poloměr oblouku vozovky,
- podíl odbočujících vozidel v daném směru.

##### **4.4.2. Metoda spotřeby času**

Metoda spočívá v úpravě intenzit dopravních proudů, která se realizuje tak, že hodnoty intenzity proudů jsou vynásobeny tzv. koeficienty omezení. Vynásobením hodnot intenzit hodnotami koeficientů omezení dojde k zohlednění vlivů možného zpomalení, nebo zrychlení pohybu vozidla v prostoru křižovatky. Toto fiktivní, tzv. výpočtové zatížení se následně zavádí do následujících výpočtů délky cyklu a délky jednotlivých signálů zelených. [6]

##### **4.4.3. Metoda postupného porovnávání**

Metodou postupného porovnávání se rozumí takový postup, kdy se vypočítané kapacity jednotlivých řadících pruhů porovnávají s příslušnými intenzitami provozu na křižovatce. Nejprve se určuje délka cyklu z minimálních délek zelených a nejdelších rozhodujících mezičasů. Následně se prodlužuje délka cyklu a délka zelených, z nichž se vypočítává kapacita, která je následně srovnávána se směrodatnými intenzitami. Hodnoty srovnáváme

do té chvíle, než kapacita dosáhne o 10 % až 20 % vyšší hodnoty, než je hodnota směrodatné intenzity. [6]

#### **4.4.4. Metoda lineárního programování**

Metoda lineárního programování byla vybrána pro tuto diplomovou práci jako další metoda, pomocí které bude signální plán navrhován. Její hlavní metodou je garance nalezení optimálního řešení daného problému podle zvoleného optimalizačního kritéria, při zachování platnosti požadovaných vstupních omezení vyjádřených množinou omezujících podmínek ve tvarech lineárních rovnic a nerovnic. Model, který bude vytvářen, si lze obecně představit jako soustavu algebraických výrazů, která reprezentuje optimalizovanou veličinu a určité omezující podmínky, které musí být následně při hledání optima dodrženy. [9]

Každý model je originální, je sestaven za účelem řešení konkrétní úlohy a může mít své specifické podmínky, protože rozhodovací situace, pro kterou je vytvářen, může mít svá specifika. [8]

Výhody metod lineárního programování jsou:

- matematická nenáročnost základních principů metody (ve srovnání s ostatními optimalizačními metodami), [8]
- široká oblast možnosti použití – doprava, logistika, ekonomika atp., [9]
- výsledkem úlohy o návrhu signálního plánu bývá řešení s vypočítanými časy vypínání a zapínání zeleného signálu na návěstidlech, [8]
- vzhledem k tomu, že tabulka mezičasů je součástí výpočetního procesu, není nutno neustále kontrolovat dodržování minimálních hodnot bezpečnostních časů mezi jednotlivými fázemi a tím je zabraňováno vzniku kolizních situací. [8]

Nevýhody metody lineárního programování jsou:

- náročnost na výpočet v případech, jsou-li proměnným v matematických modelech přiděleny některé typy definičních oborů,
- nutnost znát principy tvorby matematických modelů a práce s optimalizačními software. [8]



Pro použití LP pro návrh signálního plánu lze použít obecný postup [9], který je:

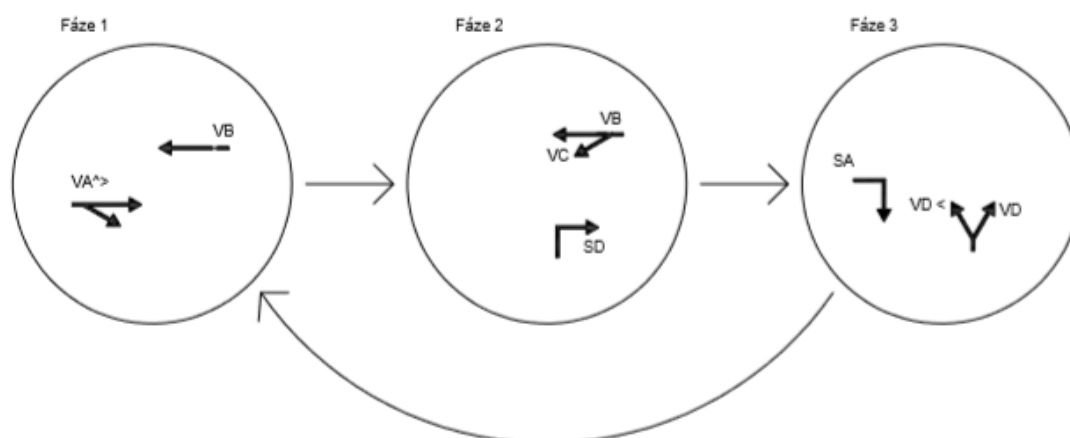
1. Nejdříve definovat množinu dopravních proudů  $P_1, P_2, \dots, P_n$  jedná se o proudy, které vstupují do křižovatky.
2. Vytvořit graf bezkoliznosti. V grafu bezkoliznosti jsou dopravní proudy křižovatky zobrazeny do množiny vrcholů grafu. Vztahy bezkoliznosti dopravních proudů znázorňují hrany grafu. Kolizní proudy jsou ponechány bez spojovací hrany. V grafu jsou pak hledány všechny maximálně kompletní podgrafy (ty podgrafy, které obsahují vrcholy spojené hranou se všemi ostatními vrcholy, a zároveň už nelze do tohoto podgrafu dodat jiný vrchol, který by tuto podmínku splňoval).
3. Na základě grafu bezkoliznosti vytvořit množinu fází.
4. Z vytvořené množiny fází vybrat jejich minimální počet, který bude pokrývat všechny proudy vstupující do křižovatky (nutné dbát, aby každý proud byl obsažen alespoň v jedné vybrané fázi), vybrané fáze budou představovat tzv. výsledné fázové schéma, pro které bude vytvářen signální plán. Pro výběr minimálního počtu fází pokrývajících všechny proudy vstupující do křižovatky je možno využít pomocný lineární matematický model.
5. Stanovení takového pořadí fází, které bude minimalizovat hodnotu součtu rozhodujících mezer mezi fázemi (díky tomu dojde k optimálnímu pořadí fází).
6. Nalezení optimálních časů začátků a konců zelených signálů v průběhu cyklu pro všechny proudy s ohledem na definované podmínky v předcházejících krocích (pomocí modelu lineárního programování s definovanými optimalizačními kritérii).

## 5. Shrnutí výsledků řízení křižovatky pomocí metody saturovaného toku

Pátá kapitola se zabývá výsledky bakalářské práce, které mají být v závěru práce porovnávány s výsledky metody lineárního programování. Popisuje jednotlivé kroky, které jsou nutné provést před samotným použitím metody.

### 5.1. Návrh fází dle metody saturovaného toku

Fáze je část cyklu, kdy mají zelený signál vzájemně nekolizní skupiny. Fáze pro řešenou křižovatku dle metody saturovaného toku vycházejí z grafu 2.



Graf 2: Návrh fází a sledu fází dle metody saturovaného toku [1]

### 5.2. Charakteristika signálních plánů navržených metodou saturovaného toku [1]

Výsledná délka cyklu pro ranní špičku vypočítaná metodou saturovaného toku měla hodnotu 70 s, přičemž jednotlivé fáze mají délky:

Fáze 1 – 19 s

Fáze 2 – 16 s

Fáze 3 – 15 s

Součet dob fázových přechodů činí 20 s.

Výsledná délka cyklu pro odpolední špičku vypočítaná metodou saturevaného toku měla hodnotu 90 s, přičemž jednotlivé fáze mají délky:

Fáze 1 – 23 s

Fáze 2 – 26 s

Fáze 3 – 21 s

Součet dob fázových přechodů činí opět 20 s.

Signální plány pro ranní a odpolední špičku jsou přiloženy v Příloze 1.

### 5.3. Kapacitní posouzení řízené křižovatky [1]

Úroveň kvality dopravy se stejně jako u posuzování okružní křižovatky hodnotí s použitím písmen A – F. V tomto případě jsou hodnoty jiné, než u okružní křižovatky, viz tabulka 5.

Úroveň kvality dopravy		Střední doba zdržení $t_w$ [s]
Označení	Charakter kvality dopravy	
A	Velmi dobrá	(0;20>
B	Dobrá	(20;35>
C	Uspokojivá	(35;50>
D	Dostatečná	(50;70>
E	Nestabilní stav	>70
F	Překročená kapacita	-

Tabulka 5: ÚKD pro neřízené křižovatky [1]

Tabulky 3 a 5 zobrazují ÚKD s rozdílností v tom, že v případě tabulky 3 jde o okružní křižovatky a v případě tabulky 5 o neřízené křižovatky.

Výsledky jednotlivých posouzení ÚKD je možné vidět v tabulce 6 a 7, kdy v tabulce 6 je zhodnocení dosažených ÚKD pro ranní špičku a tabulce 7 pro odpolední špičku. Obě tabulky jsou převzaty z [1].

KAPACITNÍ POSOUZENÍ SVĚTELNĚ ŘÍZENÉ KŘIŽOVATKY PODLE TP 235 - PROTOKOL									
Název křižovatky:	Kojetínská x Velehradská v Kroměříži								
Posuzovaný stav:	Navržený stav nového řízení, ranní špička								
Délka cyklu:	70 s								
Požadovaný stupeň na rameni A, B:	D								
Požadovaný stupeň na rameni C:	E								
Posouzení kapacity vjezdu, úroveň kvality dopravy									
Vjezd (sign. sk.)	$I_V$	$z'$	$S_V$	$C_V$	Rez	$L_{F1}$	$t_w$	ÚKD	
	Návrhová intenzita dopravy [j.voz/h]	Délka zelené [s]	Saturovaný tok vjezdu [j.voz/h]	Kapacita vjezdu [j.voz/h]	Rezerva kapacity [%]	Délka fronty [m]	Střední doba [s]	Požadovaná úroveň kvality dopravy požadovaná	Dosažená úroveň kvality dopravy dosažená
VA	414	19	1918	531	21.1	35.3	32	D	B
VB	462	34	1975	926	50.1	28.0	2	D	A
VC	233	15	1928	406	42.5	42.5	28	D	B
VD	338	16	1922	457	30.2	30.2	32	E	B
VA + SA	357	35	1952	462	18.4	18.4	25	D	B
VD + SD	285	31	1942	410	20.7	20.7	22	E	B
Závěr:	Posuzovaná křižovatka kapacitně vyhovuje. Požadavky na úroveň kvality dopravy jsou splněny na všech vjezdech. Délka fronty na všech vjezdech je kratší, než délka jednotlivých řadících pruhů a tedy by neměly zapříčinit vznik dopravních kongescí či jiných nepříjemností.								

Tabulka 6: Kapacitní výpočet metodou saturovaného toku ranní špička [1]

KAPACITNÍ POSOUZENÍ SVĚTELNĚ ŘÍZENÉ KŘIŽOVATKY PODLE TP 235 - PROTOKOL									
Název křižovatky:	Kojetínská x Velehradská v Kroměříži								
Posuzovaný stav:	Navržený stav nového řízení, ranní špička								
Délka cyklu:	90 s								
Požadovaný stupeň na rameni A, B:	D								
Požadovaný stupeň na rameni C:	E								
Posouzení kapacity vjezdu, úroveň kvality dopravy									
Vjezd (sign. sk.)	$I_V$	$z'$	$S_V$	$C_V$	Rez	$L_{F1}$	$t_w$	ÚKD	
	Návrhová intenzita dopravy [j.voz/h]	Délka zelené [s]	Saturovaný tok vjezdu [j.voz/h]	Kapacita vjezdu [j.voz/h]	Rezerva kapacity [%]	Délka fronty [m]	Střední doba [s]	Požadovaná úroveň kvality dopravy požadovaná	Dosažená úroveň kvality dopravy dosažená
VA	425	23	1918	503	15.4	47.5	46	D	C
VB	462	49	1975	1039	55.5	31.9	1	D	A
VC	367	26	1928	547	32.9	49.6	32	D	B
VD	395	21	1922	466	15.2	45.1	49	E	C
VA + SA	353	44	1952	471	25.1	19.9	27	D	B
VD + SD	279	49	1942	553	49.5	26.8	15	E	A
Závěr:	Posuzovaná křižovatka kapacitně vyhovuje. Požadavky na úroveň kvality dopravy jsou splněny na všech vjezdech. Délka fronty na všech vjezdech je kratší, než délka jednotlivých řadících pruhů a tedy by neměly zapříčinit vznik dopravních kongescí či jiných nepříjemností.								

Tabulka 7: Kapacitní výpočet metodou saturovaného toku odpolední špička [1]

## 6. Návrh signálního plánu s využitím metody LP

Kapitola bude věnována praktické aplikaci metody LP pro křižovatku Velehradská x Kojetínská x Milíčovo náměstí v Kroměříži. Bude popsán postup tvorby SSZ, počínaje sumarizací vstupních dat a tvorbou matice (tabulky) mezičasů přes tvorbu fází, určení minimálního počtu fází až po výběr minimálního počtu fází a určení optimálního pořadí fází.

Důležité je upozornit na rozdílnost značení, kdy v bakalářské práci odpovídalo označení signálních skupin takto (V diplomové práci je značena stejně pro proud i signální skupinu):

$$P_1 = VA$$

$$P_2 = VA'$$

$$P_3 = VD$$

$$P_4 = VD'$$

$$P_5 = VC$$

$$P_6, P_7 = VB$$

(Proud  $P_7$  bude objasněn v následujícím textu)

Proto bylo pro přehlednost v následujícím textu už pracováno pouze s označením skupin  $P_1 - P_7$ .

### 6.1. Postup návrhu řešení SSZ

#### 6.1.1. Sumarizace vstupních dat

Prvním krokem před samotným vytvořením modelu byla sumarizace dat, které jsou k modelování potřeba. Intenzity dopravy byly zjištěny z již provedeného dopravního průzkumu, které jsou shrnuty pro ranní špičku v tabulce 8 a pro odpolední špičku v tabulce 9.

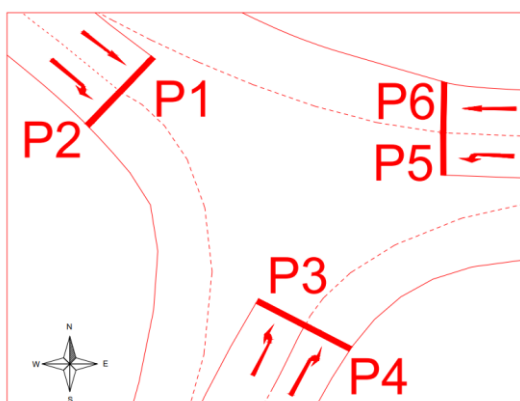
Ranní špička					
$q_i$ [jv/h]					
$q_1$	$q_2$	$q_3$	$q_4$	$q_5$	$q_6$
414	375	285	338	342	233

Tabulka 8: Intenzity dopravy ranní špička

Odpolední špička					
$q_i$ [jv/h]					
$q_1$	$q_2$	$q_3$	$q_4$	$q_5$	$q_6$
425	353	279	395	462	367

Tabulka 9: Intenzity dopravy odpolední špička

Na obrázku 7 je v programu AutoCAD znázorněno schéma křižovatky, ve kterém jsou uvedeny jednotlivé dopravní proudy na jednotlivých ramenech křižovatky a jejich označení.



Obrázek 7: Schéma křižovatky [1]

## 6.2. Tvorba tabulky mezičasů a sestavení množiny fází

K návrhu SP pomocí obou metod je nutné sestavení tabulky (matice) mezičasů. Mezičas je minimální doba, která musí uplynout mezi koncem zelené pro jeden kolizní proud a začátkem zelené pro jiný kolizní proud v následující fázi. Po dobu plynutí mezičasu musí poslední vozidlo (cyklista, chodec, ...) proudu s aktivovanou zelenou bezpečně vyklidit tzv. kolizní plochu a uvolnit na kolizní ploše prostor pro jízdu vozidel v jiném kolizním směru.

Při výpočtu matice mezičasů bylo vycházeno z TP 188 [10]:

$$t_m = t_v - t_n + t_b \quad (1)$$

$$t_v = \frac{L_v + L_{voz}}{V_v} \quad (2)$$

$$t_n = \frac{L_n}{V_n} \quad (3)$$

kde:

- $t_m$  - hodnota mezičasu
- $t_v$  - vyklizovací doba – doba potřebná k projetí úseku od stopčáry na konec kolizní plochy (od vstupu chodce na vozovku po dosažení konce kolizní plochy)
- $t_n$  - najížděcí doba – doba potřebná k projetí úseku od stopčáry na začátek kolizní plochy (od vstupu chodce na vozovku po dosažení začátku kolizní plochy)
- $t_b$  - bezpečnostní doba je doba zohledňující průjezd vozidel na signál pozor

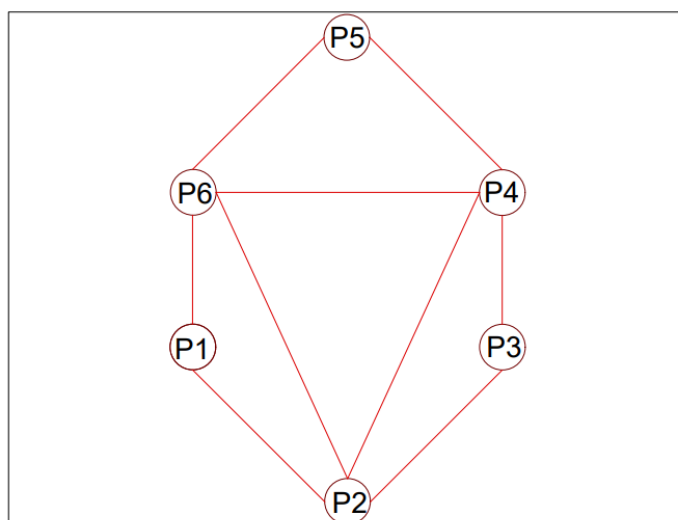
- $L_v$  - vyklizovací dráha (dráha od stopčáry po konec kolizní plochy, dráha chodce od vstupu na vozovku po konec kolizní plochy).
- $L_n$  - najížděcí dráha (dráha od stopčáry po začátek kolizní plochy, dráha chodce od vstupu na vozovku po začátku kolizní plochy)
- $L_{voz}$  - délka vyklizujícího vozidla
- $V_v$  - vyklizovací rychlost
- $V_n$  - najížděcí rychlost

Hodnoty mezičasů v sekundách vypočítané s využitím vztahů (1) – (3) jsou uvedeny v tabulce číslo 10.

Mezičasy dopravních pohybů						
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$
$P_1$			4	6	7	
$P_2$					3	
$P_3$	5				4	5
$P_4$	3					
$P_5$	3	5	5			
$P_6$			3			

Tabulka 10: Matice mezičasů pro řešenou křižovatku [1]

Za účelem sestavení množiny fází je nutné sestavit graf bezkoliznosti. Pomocí grafu bezkoliznosti je možné určit fáze vzniklé v závislosti na směrové konfiguraci jednotlivých proudů, které vstupují do křižovatky. Vrcholy grafu bezkoliznosti reprezentují jednotlivé dopravní proudy vstupující do křižovatky, hrany grafu bezkoliznosti spojují vrcholy v případech, kdy dané dvojice vrcholů reprezentují nekolizní proudy. Fázi odpovídá maximální kompletní podgraf – v teorii grafů je maximální kompletní podgraf nazýván jako klika grafu. Graf bezkoliznosti pro řešenou křižovatku je uveden na obrázku 8.



Obrázek 8: Graf bezkoliznosti (vytvořeno autorkou)

Na základě grafu bezkoliznosti byla vytvořena množina fází, celkem takto vznikly 4 fáze:

$$F1 = \{P_1, P_2, P_6\}$$

$$F2 = \{P_2, P_3, P_4\}$$

$$F3 = \{P_2, P_4, P_6\}$$

$$F4 = \{P_4, P_5, P_6\}$$

### 6.3. Výběr minimálního počtu fází

Dalším nutným krokem postupu návrhu signálního plánu s využitím metod LP je určení minimálního počtu fází. Minimální počet fází bude určován pomocí lineárního pomocného modelu, jehož řešení bude provedeno s využitím optimalizačního software FICO Xpress-IVE (viz obrázek 9).

Vstupy do matematického modelu sloužícího k řešení minimálního počtu fází tvoří množina proudů  $I$ , množina fází  $J$  včetně příslušnosti jednotlivých proudů jednotlivým fázím. Za účelem modelování rozhodnutí zavádíme do úlohy skupinu bivalentních proměnných  $x_j$ , pro  $j \in J$ . Protože se jedná o bivalentní proměnné, je interpretace výsledných hodnot proměnných následující. V případě, že bude  $x_j = 1$ , fáze  $j \in J$  bude vybrána do výsledného fázového schématu (bude součástí minimálního počtu fází). Pokud bude výsledkem  $x_j = 0$ , potom fáze  $j \in J$  nebude vybrána do výsledného fázového schématu (nebude součástí minimálního počtu fází).



Matematický model pro výběr minimálního počtu fází bude mít tento obecný tvar (4) – (6):

$$\min f(x) = \sum_{j \in J} x_j \quad (4)$$

za podmínek:  $x_j \in \{0,1\} \quad j \in J \quad (5)$

$$\sum_{j \in J_i} x_j \geq 1 \quad j \in J \quad (6)$$

kde  $J_i$  je množina fází obsahující proud  $i \in I$ .

Výraz (4) reprezentuje účelovou funkci. Určuje minimální počet fází, které budou vybrány. Skupina omezujících podmínek (5) vymezuje definiční obor proměnných použitých v modelu a skupina omezujících podmínek (6) zajistí, že každý proud vstupující do křižovatky bude obsažen alespoň v jedné vybrané fázi.

Text programu v optimalizačním software Xpress-IVE je uveden v následující podkapitole. Skupinu podmínek (6) je možné formulovat také alternativně s využitím matice  $A$ , ve které řádky reprezentují proudy vstupující do křižovatky a sloupce reprezentují fáze. Pokud proud  $P_i$  je obsažen ve fázi  $F_j$ , pak  $a_{ij} = 1$ , v opačném případě  $a_{ij} = 0$ .

Zdrojový kód pro optimalizační úlohu o výběru minimálního počtu fází v podmínkách řešené křížovatky bude mít tvar (obrázek 9):

```
model Vyber_faze
uses "mmxprs";

declarations
proud=1..6
faze=1..4
a:array(proud,faze)of real
x:array(faze)of mpvar
end-declarations

a::[1,0,0,0,
    1,1,1,0,
    0,1,0,0,
    0,1,1,1,
    0,0,0,1,
    1,0,1,1 ]

forall(j in faze)x(j)is_binary
forall(i in proud)sum(j in faze)a(i,j)*x(j)>=1
pocet_vybranych_fazi:=sum(j in faze)x(j)
minimize(pocet_vybranych_fazi)

writeln("Minimalni pocet faze je: ",getobjval)

forall(i in faze|getsol(x(i))=1)

writeln("x(",i,")=" ,getsol(x(i)))

end-model
```

Obrázek 9: Kód - výběr minimálního počtu fází

Po ukončení optimalizačního výpočtu byly vybrány 3 fáze (viz obrázek 10):

```
Minimalni pocet faze je: 3
x(1)=1
x(2)=1
x(4)=1
End running model
```

Obrázek 10: Výsledek řešení matematického modelu pro minimalizaci počtu vybraných fází

#### 6.4. Stanovení optimálního pořadí vybraných fází

Stanovení optimálního pořadí vybraných fází bezprostředně navazuje na předchozí krok výběru minimálního počtu fází. Nejdříve je nutno sestavit všechna možná pořadí fází. Při jejich sestavování je nutno přihlížet ještě k tomu, aby fáze obsahující stejný proud byly řazeny bezprostředně za sebou. Důvodem tohoto požadavku je to, že pro každý proud je v modelu vyčleněn pouze jeden čas začátku doby zelené a jeden čas konce doby zelené. Optimální pořadí fází se pak určí tak, že pro něj bude součet rozhodujících (maximálních) mezičasů při přechodech mezi jednotlivými fázemi minimální.

Při definování optimálního pořadí fází je nutné vycházet z matice mezičasů, definované v podkapitole 6.2. (viz tabulka 10).

V podkapitole 6.3. bylo zjištěno, že minimální počet fází pro řízení křižovatky je 3. Pro třífázové řízení se nabízejí dvě možné kombinace pořadí fází (při cyklickém opakování fází):

Pořadí 1: F1 – F2 – F4 – F1

Pořadí 2: F2 – F1 – F4 – F2

Ani v jednom z uvedených pořadí ovšem není splněna podmínka, aby fáze obsahující stejný proud byly řazeny bezprostředně za sebou. Jelikož ani jedno pořadí podmínku nespĺnilo, bylo nutné si při tvorbě matematického modelu vypomoci formálním rozdělením doby zelené pro některý proud na dvě části. Prakticky to bude vypadat tak, že např. proud P6 v pořadí 1 bude rozdělen na dva proudy – P6 a P7, přičemž proud P7 bude reprezentovat část proudu P6 vyskytující se ve fázi F1.

V následující podkapitole je uveden návrh pořadí fází dle dvou možných kombinací pořadí s rozdělením proudu P6 na proudy P6 a P7.

### 6.4.1. Návrh pořadí fází

Pořadí 1:

F1 – F2 – F4 – F1

Z matice mezičasů byly vytvořeny submatice. Maximální mezičasy v jednotlivých submaticích jsou vyznačené růžově.

	P2	P3	P4
P1	-	4	6
P2	-	-	-
P7	-	3	-

	P4	P5	P6
P2	-	3	-
P3	-	4	5
P4	-	-	-

	P1	P2	P7
P4	3	-	-
P5	3	5	-
P6	-	-	-

Tabulka 11: Submatice mezičasů při fázových přechodech F1-F2-F4-F1(pořadí 1)

Součet maximálních mezičasů ve fázových přechodech  $6 + 5 + 5 = 16$  s.

## Pořadí 2:

F2 – F1 – F4 – F2

Z matice mezičasů byly vytvořeny submatice. Maximální mezičasy v jednotlivých submaticích jsou vyznačené růžově.

	P1	P2	P7
P2	-	-	-
P3	5	-	5
P4	3	-	-

	P4	P5	P6
P1	6	7	-
P2	-	3	-
P7	-	-	-

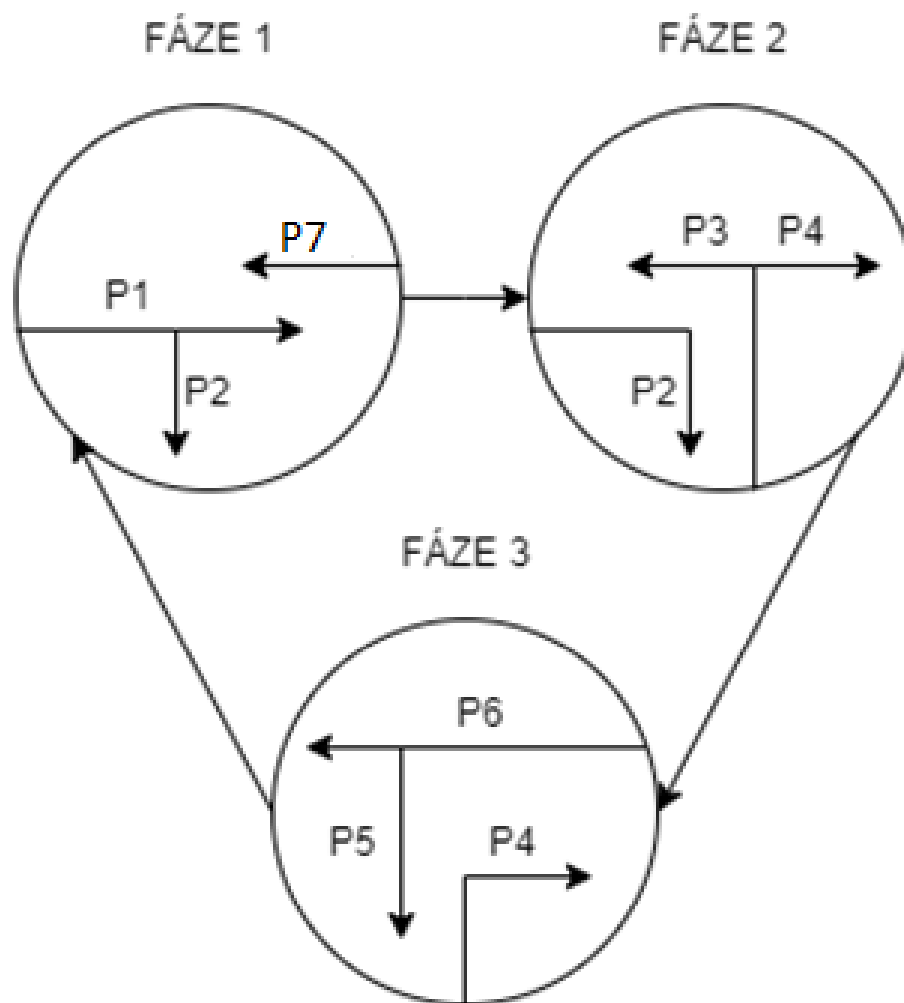
	P2	P3	P4
P4	-	-	-
P5	5	5	-
P6	-	3	-

Tabulka 12: Submatice mezičasů při fázových přechodech F2-F4-F1-F2 (pořadí 2)

Součet maximálních mezičasů ve fázových přechodech  $5 + 7 + 5 = 17$  s.

Optimálním pořadím fází je pořadí 1, kde je součet maximálních mezičasů roven 16 s.

Obrázek 11 znázorňuje výsledek odpovídající optimálnímu pořadí fází z hlediska minimalizace součtu rozhodujících mezičasů. Oproti metodě v BP, kde jsou použity ve dvou případech směrové šipky, bude tentokrát pracováno ve všech směrech se směrovými signály. Ve fázi F1 bude umožněn vstup do křižovatky proudům  $P_1$ ,  $P_2$  a  $P_6$  (použito pojmenování fiktivní proud  $P_7$  z důvodů uvedených výše), ve fázi F2 zůstane umožněn vstup proudu  $P_2$  a dále bude umožněn vstup proudům  $P_3$  a  $P_4$ , v poslední fázi bude umožněn vstup proudům  $P_4$ ,  $P_5$  a  $P_6$ .



Obrázek 11: Schéma optimálního pořadí fází (vytvořeno autorkou)

## 7. Matematické modely pro tvorbu signálního plánu

V kapitole 7 bude popsána tvorba samotného matematického modelu pro návrh signálního plánu řešené křižovatky. Dva modely, které byly vytvořeny na základě předem určených kritérií a jsou uvedeny dále v textu, se od sebe liší optimalizačním kritériem:

- model s optimalizačním kritériem, kterým je délka cyklu,
- model s optimalizačním kritériem, kterým je minimální poměrná rezerva mezi nabízenou a průměrně požadovanou dobou zelené pro proud.

Ke každému modelu byl uveden zdrojový kód z optimalizačního programu Xpress - IVE, výsledek a signální plán vytvořený v programu EXCEL.

### 7.1. Matematický model s optimalizačním kritériem délka cyklu

Dle TP 81 Navrhování světelných signalizačních zařízení pro řízení provozu na pozemních komunikacích, je určena minimální délka cyklu 30 s, optimální délka cyklu 50 až 80 s, maximální délka cyklu 100 s (120 s).

V tabulkách 13 a 14 jsou uvedeny minimální hodnoty délek zelených pro jednotlivé proudy vstupující do křižovatky. Minimální délka zelené je dle TP 81 rovna 5 s.

Označení  $P_i$  udává proud  $P_1$  - proud  $P_7$ .

**Pro ranní špičku:**

$P_i$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	$P_7$
$t_{\min, i}$ [s]	12	10	8	9	9	7	7

Tabulka 13: Minimální délky zelené pro proudy vstupující do křižovatky, ranní špička

**Pro odpolední špičku:**

$P_i$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	$P_7$
$t_{\min, i}$ [s]	12	11	8	10	13	11	11

Tabulka 14: Minimální délky zelené pro proudy vstupující do křižovatky, odpolední špička

Zdrojové kódy pro jednotlivá kritéria budou v principu totožné pro ranní i odpolední špičku. Rozdíly se budou vyskytovat v hodnotách konstant intenzit  $q_i$ , minimálních délek zelených  $t_{\min, i}$  a časů potřebných pro vstup vozidla do křižovatky  $T_i$ .

Veličiny vystupující v modelu:

$c$	délka cyklu
$y_i$	konec zelené pro proud $P_i$
$x_i$	začátek zelené pro proud $P_i$
$t_{min,i}$	minimální délka zelené pro proud $P_i$
$\tau_i$	čas potřebný pro vstup vozidla do křižovatky v proudu $P_i$
$q_i$	intenzita vozidel vyjádřena v jv/h

Minimalizace doby cyklu zajišťuje zvýšení plynulosti provozu na řešené křižovatce.

Matematický model má tvar:

$$\min f(x, y, c) = c \quad (7)$$

a podmíněk:

$$y_i - x_i \geq t_{min,i} \quad \text{pro } i \in I \quad (8)$$

$$y_7 - x_7 \geq t_{min,6} \quad (9)$$

$$y_i - x_i \geq \frac{q_i \cdot \tau_i \cdot c \cdot u}{3600} \quad \text{pro } i \in I \setminus \{6,7\} \quad (10)$$

$$(y_7 - x_7) + (y_6 - x_6) \geq \frac{q_6 \cdot \tau_6 \cdot c \cdot u}{3600} \quad (11)$$

$$y_j - x_i \geq m_{ij} \quad \text{pro } i, j \in I \cup \{7\} \quad (12)$$

$$y_j - x_i + c \geq m_{ij} \quad \text{pro } i, j \in I \cup \{7\} \quad (13)$$

$$y_i \leq c \quad \text{pro } i \in I \quad (14)$$

$$x_i \in Z_0^+ \quad \text{pro } i \in I \quad (15)$$

$$y_i \in Z_0^+ \quad \text{pro } i \in I \quad (16)$$

$$c \in Z_0^+ \quad (17)$$

Funkce (7) reprezentuje optimalizační kritérium. Skupina omezujících podmínek (8) a omezující podmínka (9) zajistí, že nabízená doba zelené pro  $i \in I$  neklesne pod minimální dobu zelené pro tento proud. Skupina omezujících podmínek (10) zajišťuje, že nabízená doba zelené pro každý proud  $i \in I$  neklesne pod hodnotu průměrně požadované doby zelené pro tento proud při zohlednění minimální poměrné rezervy  $u$ . Omezující podmínka (11) zajišťuje, že nabízená doba zelené pro proud  $P_6$  a  $P_7$  neklesne pod hodnotu průměrně požadované doby zelené pro tento proud při zohlednění minimální poměrné rezervy  $u$ . Skupiny omezujících podmínek (12) a (13) jsou tzv. mezičasové podmínky, které zajistí dodržení mezičasů.



Skupina mezičasových podmínek (12) se používá při přechodech mezi fázemi uvnitř cyklu a skupina omezujících podmínek (13) se používá při fázových přechodech při přechodu přes hranici cyklu. Skupina omezujících podmínek (14) zajišťuje, že doby zelených u jednotlivých proudů skončí nejpozději na konci cyklu. Definiční obory proměnných jsou vymezeny obligatorními podmínkami (15), (16), (17). [7]

#### **7.1.1. Zdrojový kód matematického modelu s optimalizačním kritériem hodnota minimální poměrné rezervy**

Na obrázku 12 a obrázku 15 jsou uvedeny zdrojové kódy pro modely minimalizující délky cyklu pro ranní a odpolední špičku.

Zdrojový kód minimalizace délky cyklu pro ranní špičku:

```
model Minimalizace_delky_cyklu_c
uses "mmxprs";

declarations
  proud=1..7
  tmin:array(proud) of real
  T:array(proud) of real
  q:array(proud) of real

  c:mpvar
  x:array(proud) of mpvar
  y:array(proud) of mpvar
end-declarations

tmin::[12,10,8,9,9,7,7]
T::[2.3,2.1,2,2.1,2,2.1,2.1]
q::[414,375,285,338,342,233,233]
u:=1.2

x(3)-y(7)>=3
x(3)-y(1)>=4
x(4)-y(1)>=6
x(5)-y(2)>=3
x(5)-y(3)>=4
x(7)-y(3)>=5
x(1)-y(5)+c>=3
x(1)-y(4)+c>=3
x(2)-y(5)+c>=5

c is_integer
forall(i in proud)x(i) is_integer
forall(i in proud)y(i) is_integer
forall(i in proud)y(i)-x(i)>=tmin(i)
forall(i in proud)y(7)-x(7)>=tmin(6)
forall(i in proud)y(1)-x(1)>=T(1)*q(1)*c*u/3600
forall(i in proud)y(2)-x(2)>=T(2)*q(2)*c*u/3600
forall(i in proud)y(3)-x(3)>=T(3)*q(3)*c*u/3600
forall(i in proud)y(4)-x(4)>=T(4)*q(4)*c*u/3600
forall(i in proud)y(5)-x(5)>=T(5)*q(5)*c*u/3600
y(7)-x(7)+(y(6)-x(6))>=T(6)*q(6)*c*u/3600
forall(i in proud)y(i)<=c

delka_cyklu:=c
minimize(delka_cyklu)
writeln("minimalni delka cyklu je ", getobjval," s")

  forall (i in proud)writeln ("y(",i,")-x(",i,")=",getsol(y(i)-x(i))," s")
  forall (i in proud)writeln ("x(",i,")=",getsol(x(i))," s")
  forall (i in proud)writeln ("y(",i,")=",getsol(y(i))," s")

end-model
```

Obrázek 12: Zdrojový kód matematického modelu s optimalizačním kritériem minimalizace délky cyklu signálního plánu, ranní špička

Po ukončení optimalizačního procesu bylo zjištěno, že při takto zadaných parametrech je minimální délka cyklu rovna 46 s. Byly také zjištěny délky zelených jednotlivých proudů a začátek a konec zelené u jednotlivých proudů. Tyto hodnoty jsou uvedeny na obrázku 13 a graficky znázorněny pomocí signálního plánu na obrázku 14.

### 7.1.2. Výsledek řešení matematického modelu – minimalizace délky cyklu pro ranní špičku

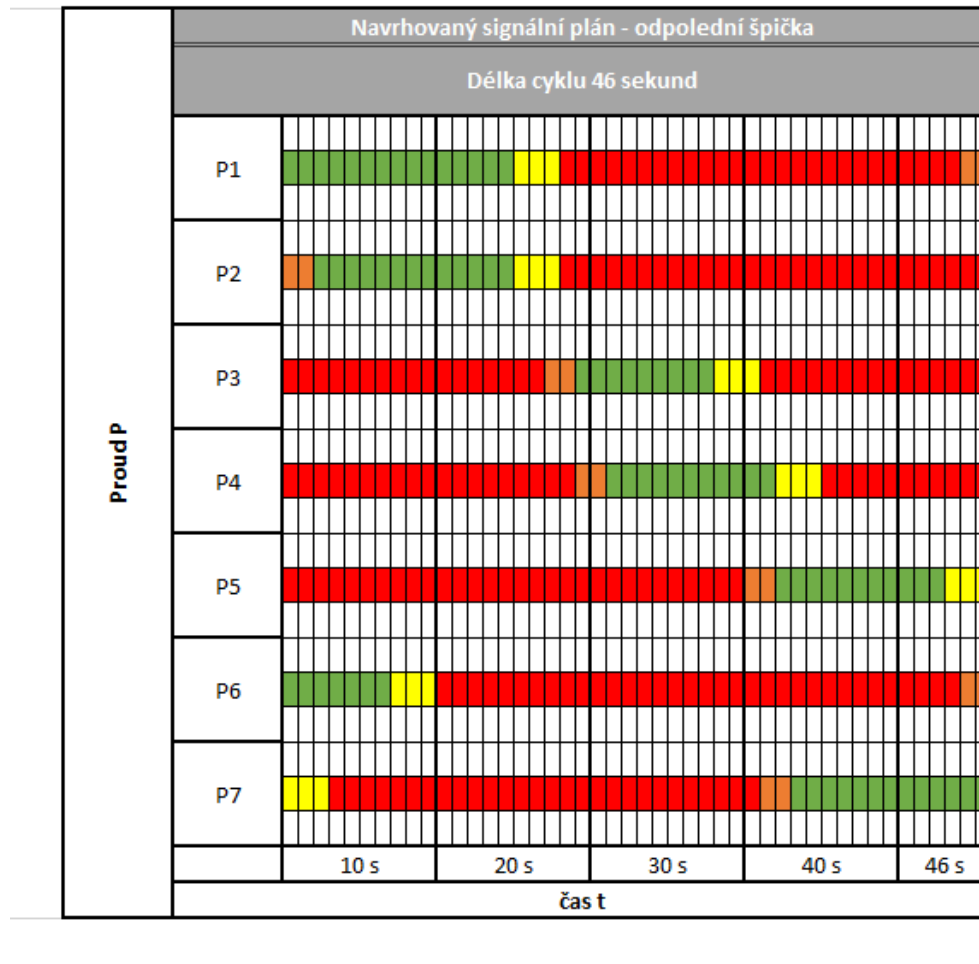
```
minimalni delka cyklu je 46 s
y(1)-x(1)=15 s
y(2)-x(2)=13 s
y(3)-x(3)=9 s
y(4)-x(4)=11 s
y(5)-x(5)=11 s
y(6)-x(6)=7 s
y(7)-x(7)=13 s
x(1)=0 s
x(2)=2 s
x(3)=19 s
x(4)=21 s
x(5)=32 s
x(6)=0 s
x(7)=33 s
y(1)=15 s
y(2)=15 s
y(3)=28 s
y(4)=32 s
y(5)=43 s
y(6)=7 s
y(7)=46 s
```

Obrázek 13: Výsledek modelu minimalizace délky cyklu, ranní špička

Jednotlivé délky zelených jsou  $P_1 = 15$  s,  $P_2 = 13$  s,  $P_3 = 9$  s,  $P_4 = 11$  s,  $P_5 = 11$  s,  $P_6 = 7$  s,  $P_7 = 13$  s.

## Signální plán varianty modelu s minimalizací délky cyklu, ranní špička

Signální plán na obrázku 14 má délku 46 s.



Obrázek 14: Signální plán, ranní špička

„Signální plán je program řízení světelného signalizačního zařízení, který určuje pořadí a délku signálů volno jednotlivých signálních skupin. Zpracovává se graficky a znázorňuje signální obrázky jednotlivých signálních skupin pro všechny účastníky provozu. Návrh signálního plánu má několik kroků, které spolu vzájemně souvisejí, ovlivňují se, a musejí se tedy zpracovávat ve vzájemném souladu (schéma fází, délky cyklu řízení, doby jednotlivých fází).“ [4]

Signální plány na obrázku 14 graficky zobrazuje délky zelené, žluté a červené. Před každým zeleným signálem jsou dle TP 81 určeny 2 s žlutého signálu a po zeleném signálu 3 s žlutého signálu.

Na obrázku 14 lze vidět, že délky zelených pro proudy  $P_6$  a  $P_7$  na sebe bezprostředně navazují a to vždy tak, že jeden proud – v tomto případě proud  $P_7$  – končí přesně na konci cyklu a proud  $P_6$  na něj na začátku cyklu navazuje. Důvodem je výše uvedené rozčlenění proudu  $P_6$  na dva proudy.

Zdrojový kód minimalizace délky cyklu pro odpolední špičku:

```
model Minimalizace_delky_cyklu_c
uses "mmsxprs";

declarations
  proud=1..7
  tmin:array(proud) of real
  T:array(proud) of real
  q:array(proud) of real

  c:mpvar
  x:array(proud) of mpvar
  y:array(proud) of mpvar
end-declarations

tmin::[12,11,8,10,13,11,11]
T::[2.2,2,2,2,2,2.3,2,2]
q::[425,353,279,395,462,367,367]
u:=1.2

x(3)-y(7)>=3
x(3)-y(1)>=4
x(4)-y(1)>=6
x(5)-y(2)>=3
x(5)-y(3)>=4
x(7)-y(3)>=5
x(1)-y(5)+c>=3
x(1)-y(4)+c>=3
x(2)-y(5)+c>=5

c is_integer
forall(i in proud)x(i) is_integer
forall(i in proud)y(i) is_integer
forall(i in proud)y(i)-x(i)>=tmin(i)
forall(i in proud)y(7)-x(7)>=tmin(6)
forall(i in proud)y(1)-x(1)>=T(1)*q(1)*c*u/3600
forall(i in proud)y(2)-x(2)>=T(2)*q(2)*c*u/3600
forall(i in proud)y(3)-x(3)>=T(3)*q(3)*c*u/3600
forall(i in proud)y(4)-x(4)>=T(4)*q(4)*c*u/3600
forall(i in proud)y(5)-x(5)>=T(5)*q(5)*c*u/3600
y(7)-x(7)+(y(6)-x(6))>=T(6)*q(6)*c*u/3600
forall(i in proud)y(i)<=c

delka_cyklu:=c
minimize(delka_cyklu)
writeln("minimalní delka cyklu je ", getobjval," s")

  forall (i in proud)writeln ("y(",i,")-x(",i,")=",getsol(y(i)-x(i))," s")
  forall (i in proud)writeln ("x(",i,")=",getsol(x(i))," s")
  forall (i in proud)writeln ("y(",i,")=",getsol(y(i))," s")

end-model
```

Obrázek 15: Zdrojový kód matematického modelu s optimalizačním kritériem minimalizace délky cyklu signálního plánu, odpolední špička

Po ukončení optimalizačního procesu bylo zjištěno, že při takto zadaných parametrech je minimální délka cyklu rovna 79 s. Byly také zjištěny délky zelených jednotlivých proudů a začátek a konec zelené u jednotlivých proudů. Tyto hodnoty jsou uvedeny na obrázku 16 a graficky znázorněny pomocí signálního plánu na obrázku 17.

### 7.1.3. Výsledek řešení matematického modelu – minimalizace délky cyklu pro odpolední špičku

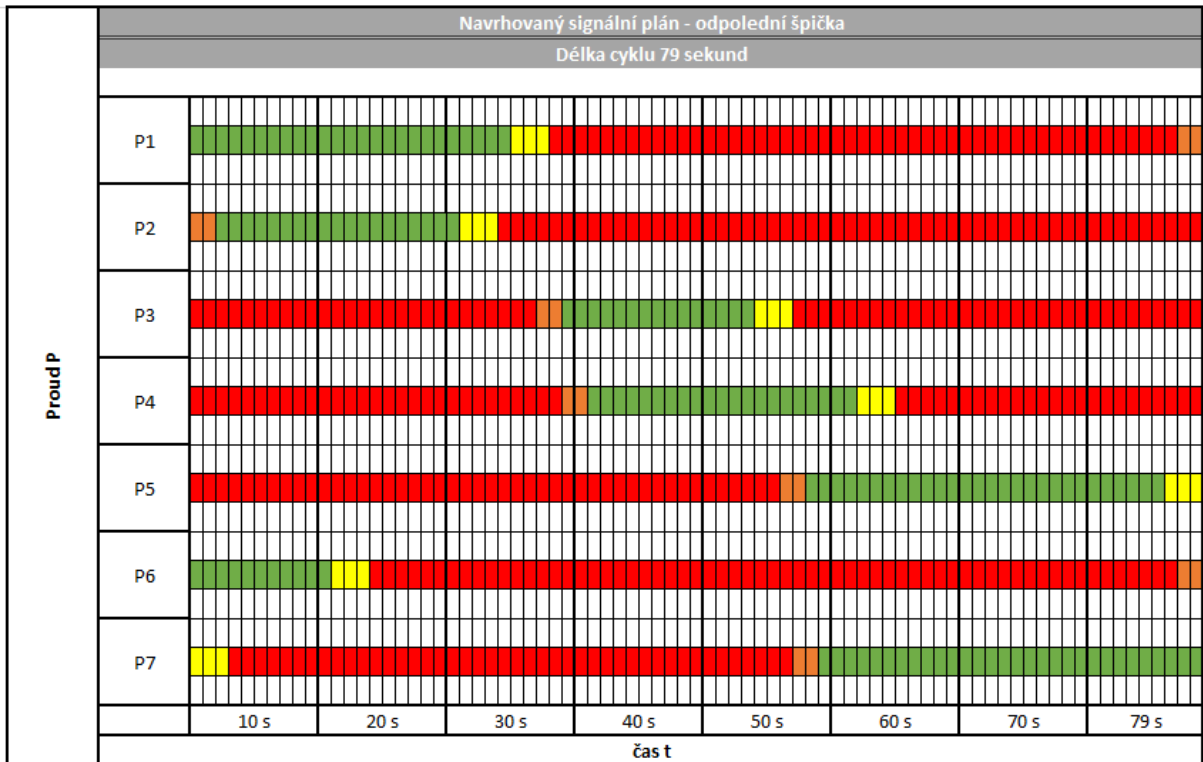
```
minimalni delka cyklu je 79 s
y(1)-x(1)=25 s
y(2)-x(2)=19 s
y(3)-x(3)=15 s
y(4)-x(4)=21 s
y(5)-x(5)=28 s
y(6)-x(6)=11 s
y(7)-x(7)=30 s
x(1)=0 s
x(2)=2 s
x(3)=29 s
x(4)=31 s
x(5)=48 s
x(6)=0 s
x(7)=49 s
y(1)=25 s
y(2)=21 s
y(3)=44 s
y(4)=52 s
y(5)=76 s
y(6)=11 s
y(7)=79 s
```

Obrázek 16: Výsledek modelu minimalizace délky cyklu, odpolední špička

Jednotlivé délky zelených jsou  $P_1 = 25$  s,  $P_2 = 19$  s,  $P_3 = 15$  s,  $P_4 = 21$  s,  $P_5 = 28$  s,  $P_6 = 11$  s,  $P_7 = 30$  s.

### Signální plán varianty modelu s minimalizací délky cyklu, odpolední špička

Na obrázku 17 je navrhovaný signální plán pro odpolední špičku, u kterého délka cyklu vychází 79 s.



Obrázek 17: Signální plán, odpolední špička

Na obrázku 17 lze opět sledovat návaznost dob zelených pro proudy P<sub>6</sub> a P<sub>7</sub>.



## 7.2. Matematický model s optimalizačním kritériem hodnota minimální poměrné rezervy

V druhém typu modelu byla optimalizačním kritériem hodnota minimální poměrné rezervy mezi nabízenou a průměrně požadovanou dobou zelené pro proud. Tato hodnota je maximalizována. Minimální poměrná rezerva je hodnota minimálního poměru mezi nabízeným časem, v němž je umožněn vstup dopravního proudu do křižovatky, a požadovanou dobou pro tento proud.

U tohoto typu modelu lze předpokládat, že pro všechny proudy bude navržen takový signální plán, který rezervu obsahuje (platí pouze v případě, že je rezerva v rámci určené délky cyklu možná). Nevýhodou modelu ovšem může být fakt, že není zabezpečeno nastavení rezervy na nejvyšší možnou hodnotu u všech proudů.

Účelová funkce:

$$\max f(x, y, u) = u \quad (18)$$

Účelová funkce (18) reprezentuje minimální poměrnou rezervu, jejíž hodnota je maximalizovaná.

Matematický model pro maximalizaci hodnot minimální poměrné rezervy je velice podobný modelu pro nejkratší dobu cyklu. Rozdílnost je v tom, že doba cyklu  $c$  není proměnnou ale konstantou. Proměnnou se stává minimální poměrná rezerva  $u$ . V ostatních parametrech jsou modely totožné.

Optimalizační výpočet pro maximalizaci minimální poměrné rezervy vyžaduje nastavení délky cyklu na předem definovanou hodnotu. Při optimalizačním výpočtu bylo počítáno v ranní špičce s dobou cyklu  $c = 70$  s a v odpolední špičce s dobou  $c = 90$  s, a to z důvodu potřeby srovnat vypočítané hodnoty s využitím lineárních modelů s výsledky obsaženými v bakalářské práci.

## 7.2.1. Zdrojový kód matematického modelu s optimalizačním kritériem hodnota minimální poměrné rezervy

Zdrojový kód je totožný pro ranní i odpolední špičku. Jediný rozdíl je v konstantách pro intenzity  $q_i$ , minimální délky zelených  $t_{\min, i}$ , časů potřebných pro vstup vozidla do křižovatky  $T_i$  a délky cyklů  $c$ . Zdrojové kódy jsou uvedeny na obrázcích 18 a 21.

Zdrojový kód maximalizace minimální délky cyklu pro ranní špičku:

```
model Minimalni_pomerna_rezerva_u
uses "mmxprs";

declarations
  proud=1..7
  tmin:array(proud) of real
  T:array(proud) of real
  q:array(proud) of real
  u:mpvar
  x:array(proud) of mpvar
  y:array(proud) of mpvar
end-declarations

tmin::[12,10,8,9,9,7,7]
T::[2.3,2.1,2,2.1,2,2.1,2.1]
q::[414,375,285,338,342,233,233]
c:=70

x(3)-y(7)>=3
x(3)-y(1)>=4
x(4)-y(1)>=6
x(5)-y(2)>=3
x(5)-y(3)>=4
x(7)-y(3)>=5
x(1)-y(5)+c>=3
x(1)-y(4)+c>=3
x(2)-y(5)+c>=5

forall(i in proud)x(i) is_integer
forall(i in proud)y(i) is_integer
forall(i in proud)y(i)-x(i)>=tmin(i)
forall(i in proud)y(i)<=c
forall(i in proud)y(7)-x(7)>=tmin(6)
forall(i in proud)y(1)-x(1)>=T(1)*q(1)*c*u/3600
forall(i in proud)y(2)-x(2)>=T(2)*q(2)*c*u/3600
forall(i in proud)y(3)-x(3)>=T(3)*q(3)*c*u/3600
forall(i in proud)y(4)-x(4)>=T(4)*q(4)*c*u/3600
forall(i in proud)y(5)-x(5)>=T(5)*q(5)*c*u/3600

y(7)-x(7)+y(6)-x(6)>=T(6)*q(6)*c*u/3600

minimalni_pomerna_rezerva:=u
maximize(minimalni_pomerna_rezerva)
writeln("minimalni pomerna rezerva je ", getobjval)

  forall (i in proud)writeln ("y(",i,")-x(",i,")=", getsol(y(i)-x(i)), " s")
  forall (i in proud)writeln ("x(",i,")=", getsol(x(i)), " s")
  forall (i in proud)writeln ("y(",i,")=", getsol(y(i)), " s")

end-model
```

Obrázek 18: Zdrojový kód matematického modelu s optimalizačním kritériem hodnota minimální poměrné rezervy, ranní špička

Po ukončení optimalizačního výpočtu bylo zjištěno, že při takto zadaných parametrech je minimální poměrná rezerva rovna 1, 35. Byly také zjištěny délky zelených jednotlivých proudů a začátky a konce zelených pro jednotlivé proudy. Tyto hodnoty jsou uvedeny na obrázku 19 a graficky znázorněny pomocí signálního plánu na obrázku 20.

### 7.2.2. Výsledek řešení matematického modelu – minimalizace délky cyklu pro odpolední špičku

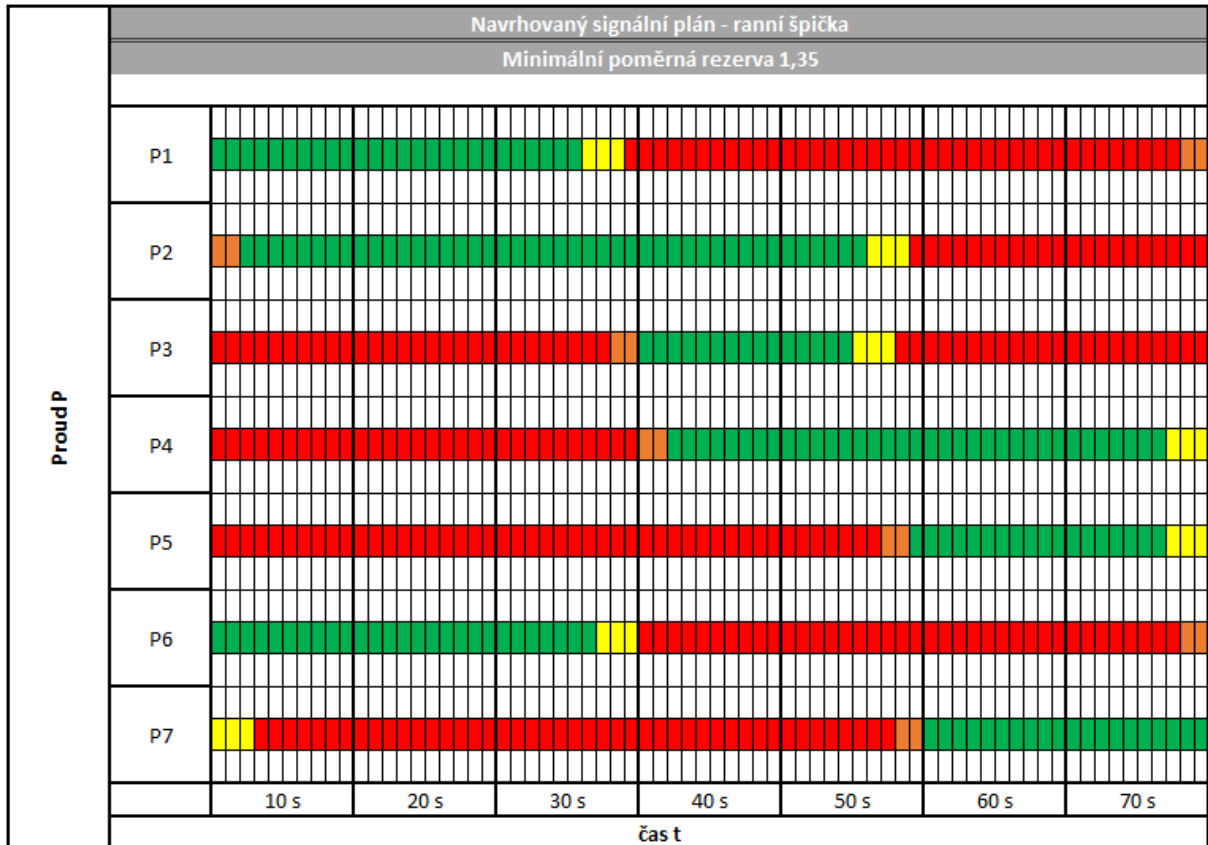
```
minimalni pomerna rezerva je 1.353383459
y(1)-x(1)=26 s
y(2)-x(2)=44 s
y(3)-x(3)=15 s
y(4)-x(4)=35 s
y(5)-x(5)=18 s
y(6)-x(6)=27 s
y(7)-x(7)=20 s
x(1)=0 s
x(2)=2 s
x(3)=30 s
x(4)=32 s
x(5)=49 s
x(6)=0 s
x(7)=50 s
y(1)=26 s
y(2)=46 s
y(3)=45 s
y(4)=67 s
y(5)=67 s
y(6)=27 s
y(7)=70 s
```

Obrázek 19: Výsledek modelu maximalizace hodnot minimální poměrné rezervy, ranní špička

Jednotlivé délky zelených jsou  $P_1 = 26$  s,  $P_2 = 44$  s,  $P_3 = 15$  s,  $P_4 = 35$  s,  $P_5 = 18$  s,  $P_6 = 27$  s,  $P_7 = 20$  s.

## Signální plán varianty modelu s minimální poměrnou rezervou, ranní špička

Na obrázku 20 je navrhovaný signální plán pro ranní špičku, hodnota minimální poměrné rezervy je 1,35, délka cyklu 70 s.



Obrázek 20: Signální plán, ranní špička

Na obrázku 20 lze opět sledovat návaznost délek zelených u proudů P<sub>6</sub> a P<sub>7</sub>.

Zdrojový kód minimální poměrné rezervy cyklu pro odpolední špičku:

```

model Minimalni_pomerna_rezerva_u
uses "mmps";

declarations
  proud=1..7
  tmin:array(proud) of real
  T:array(proud) of real
  q:array(proud) of real
  u:mpvar
  x:array(proud) of mpvar
  y:array(proud) of mpvar
end-declarations

tmin::[12,11,8,10,13,11,11]
T::[2.2,2,2,2,2.3,2,2]
q::[425,353,279,395,462,367,367]
c:=90

x(3)-y(7)>=3
x(3)-y(1)>=4
x(4)-y(1)>=6
x(5)-y(2)>=3
x(5)-y(3)>=4
x(7)-y(3)>=5
x(1)-y(5)+c>=3
x(1)-y(4)+c>=3
x(2)-y(5)+c>=5

forall(i in proud)x(i) is_integer
forall(i in proud)y(i) is_integer
forall(i in proud)y(i)-x(i)>=tmin(i)
forall(i in proud)y(i)<=c
forall(i in proud)y(7)-x(7)>=tmin(6)
forall(i in proud)y(1)-x(1)>=T(1)*q(1)*c*u/3600
forall(i in proud)y(2)-x(2)>=T(2)*q(2)*c*u/3600
forall(i in proud)y(3)-x(3)>=T(3)*q(3)*c*u/3600
forall(i in proud)y(4)-x(4)>=T(4)*q(4)*c*u/3600
forall(i in proud)y(5)-x(5)>=T(5)*q(5)*c*u/3600

y(7)-x(7)+y(6)-x(6)>=T(6)*q(6)*c*u/3600

minimalni_pomerna_rezerva:=u
maximize(minimalni_pomerna_rezerva)
writeln("minimalni pomerna rezerva je ", getobjval)

  forall (i in proud)writeln ("y(",i,")-x(",i,")=",getsol(y(i)-x(i)), " s")
  forall (i in proud)writeln ("x(",i,")=",getsol(x(i)), " s")
  forall (i in proud)writeln ("y(",i,")=",getsol(y(i)), " s")

end-model

```

Obrázek 21: Zdrojový kód matematického modelu s optimalizačním kritériem maximalizace hodnot minimální poměrné rezervy, odpolední špička

Po ukončení optimalizačního procesu bylo zjištěno, že při takto zadaných parametrech je minimální poměrná rezerva rovna 1, 22. Byly také zjištěny délky zelených jednotlivých proudů a začátek a konec zelené u jednotlivých proudů. Tyto hodnoty jsou uvedeny na obrázku 22 a graficky jsou znázorněny pomocí signálního plánu na obrázku 23.

### 7.2.3. Výsledek řešení matematického modelu – minimalizace délky cyklu pro odpolední špičku

```
minimalni pomerna rezerva je 1.218637993
y(1)-x(1)=29 s
y(2)-x(2)=49 s
y(3)-x(3)=17 s
y(4)-x(4)=52 s
y(5)-x(5)=33 s
y(6)-x(6)=30 s
y(7)-x(7)=35 s
x(1)=0 s
x(2)=2 s
x(3)=33 s
x(4)=35 s
x(5)=54 s
x(6)=0 s
x(7)=55 s
y(1)=29 s
y(2)=51 s
y(3)=50 s
y(4)=87 s
y(5)=87 s
y(6)=30 s
y(7)=90 s
```

Obrázek 22: Výsledek modelu maximalizace hodnot minimální poměrné rezervy., odpolední špička

Jednotlivé délky zelených jsou  $P_1 = 29$  s,  $P_2 = 49$  s,  $P_3 = 17$  s,  $P_4 = 52$  s,  $P_5 = 33$  s,  $P_6 = 30$  s,  $P_7 = 35$  s.

## Signální plán varianty modelu s minimální poměrnou rezervou, odpolední špička

Na obrázku 23 je navrhovaný signální plán pro ranní špičku, hodnota minimální poměrné rezervy je 1,35, délka cyklu 90 s.



Obrázek 23: Signální plán, odpolední špička

Na obrázku 23 lze opět sledovat návaznost délek zelených v případě proudů P<sub>6</sub> a P<sub>7</sub>.

### 7.3. Vyhodnocení navržených řešení z hlediska úrovně kvality dopravy (ÚKD)

V této podkapitole byla hodnocena ÚKD pro nově navržené signální plány. Nejdříve bylo provedeno kapacitní posouzení návrhu signálního plánu vytvořeného metodami LP podle teoretického postupu popsaného v TP 235. [12] Následně byly k posouzení kvality dopravy použity výsledné hodnoty středních dob zdržení. Stejný postup byl použit pro výsledky metody saturovaného toku. Posuzovány byly signální plány pro ranní i odpolední špičku u obou typů modelů.

Vzhledem k velmi nízkému množství chodců na křižovatce (zjištěno při dopravním průzkumu), byly počty chodců při výpočtech zanedbány. V budoucnosti by bylo vhodné synchronizovat řízený přechod pro chodce, vzdálený několik desítek metrů od křižovatky, kde je intenzita chodců relativně vysoká, s řízenou křižovatkou. (viz obrázek 3 a 4)

ÚKD určuje norma ČSN 73 6102. [13]

Pro jednotlivé kategorie vozovek ústících do křižovatky jsou požadovány určité nejhorší minimální stupně ÚKD.

- dálnice, rychlostní silnice a silnice I. třídy musí mít minimální úroveň ÚKD na stupni C,
- silnice II. třídy musí mít minimální úroveň ÚKD na stupni D,
- silnice III. třídy musí mít minimální úroveň ÚKD na stupni E,
- rychlostní místní komunikace a přechodové úseky musí mít minimální úroveň ÚKD na stupni D
  - je-li intenzita v období dopravní špičky na rychlostní místní komunikaci a na jejím přechodovém úseku dosahována v období výjezdových a návratových špiček, je přípustný stupeň E,
- místní komunikace musí být na minimální úrovni stupně E
  - u místních komunikací funkční skupiny C se výkonnost posuzuje v místech připojení intenzivních dopravních proudů,
  - v kratším časovém úseku se připouští dosažení stupně F po dobu nejdéle jedné hodiny.



Tabulka s limitními hodnotami ÚKD:

Úroveň kvality dopravy		Střední doba zdržení $t_w$ [s]
Označení	Charakter kvality dopravy	
A	Velmi dobrá	(0;20>
B	Dobrá	(20;35>
C	Uspokojivá	(35;50>
D	Dostatečná	(50;70>
E	Nestabilní stav	>70
F	Překročená kapacita	-

Tabulka 15: Hodnoty ÚKD

#### 7.4. Výpočty posouzení kapacit SSZ a posouzení ÚKD

Pro posouzení ÚKD je nejdříve nutné vypočítat tzv. efektivní délku zelené. Efektivní délka zelené odpovídá hodnotě délky zelené, kdy odečteme časovou ztrátu, která vzniká při rozjezdu vozidla a přičteme vliv pojíždění vozidla při žlutém signálu po ukončení zelené (žlutý signál má délku 3 s). Časová ztráta při rozjezdu vozidla se udává přibližně na 1 s. Časová úspora při dojezdech na žlutý signál je přibližně 2 s. V tabulce 16 jsou shrnuty obecné zásady výpočtu.

Délka zelené $z$	Efektivní délka zelené $z'$
5-7	$z+1$
8-10	$z+0,5$
$\geq 11$	$Z$

Tabulka 16: Pravidla přepočtu navržené doby zelené na efektivní délku zelené

##### 7.4.1. Saturovaný tok

Saturovaný tok je definován jako maximální počet jednotkových vozidel, která mohou projet profilem stopčáry za jednotku času (hodinu zelené) při ideálních dopravních podmínkách [j.voz/h]. [12]

V tabulce 17 jsou uvedeny výpočty vztahující se k saturovaného toku pro jednotlivé proudy a ranní špičku. Při výpočtu bylo vycházeno z hodnoty základního saturovaného toku 2 000 pvoz/h. [12]

Analogicky byl proveden výpočet i pro odpolední špičku. Uvedené tabulky jsou převzaty ze zdroje [1].

Tabulka s výpočty pro odpolední špičku je uvedena v příloze 2.

Dopravní proud	$q_i$ [j.voz/h]	$a$ [%]	$R$ [m]	$f$	$k_{skl}$	$k_{obl}$	$S_i$ [j.voz/h]
P1	414	0	35	1	1	0.95890	1918
P2	375	0	120	1	1	0.98765	1975
P3	285	0	40	1	1	0.96386	1928
P4	338	0	37	1	1	0.96104	1922
P5	342	0	61	1	1	0.97600	1952
P6	233	0	50	1	1	0.97087	1942

Tabulka 17: Výpočet saturovaného toku, ranní špička [1]

- $a$  -sklon vozovky  
 $R$  -poloměr oblouku  
 $f$  -podíl odbočujících vozidel  $< 0$   
 $k_{skl}$  -koeficient sklonu,  $k_{skl}=1$ , jelikož vjezdy do křižovatek jsou vodorovné  
 $k_{obl}$  -koeficient oblouku, vyjadřuje vliv poloměru směrového oblouku při odbočování a podílu odbočujících vozidel na saturovaný tok.  
 $S_i$  - saturovaný tok

#### 7.4.2. Výsledky ÚKD

Tabulky 18 a 19 obsahují výpočty související se zjištěním výsledné hodnoty ÚKD, pro model s minimalizací délky cyklu. Tabulka 18 se vztahuje k ranní špičce, tabulka 19 k odpolední špičce. Proudů P6 a P7, které byly v minulé kapitole rozděleny, jsou zde již zpět sloučeny do jednoho proudu P6.

Proud	$I_v$	$z'$	$S_i$	$C_v$	Rez	$L_f$	$t_w$	ÚKD	
	Návrhová intenzita dopravy	Délka zelené	Saturovaný tok vjezdu	Kapacita vjezdu	Rezerva kapacity	Délka fronty	Střední doba	Požadovaná úroveň kvality	Dosažená úroveň kvality
	[j.voz/h]	[s]	[j.voz/h]	[j.voz/h]	[%]	[m]	[s]		
P1	414	15	1918	625	33.8	21.4	17	D	A
P2	375	13	1975	558	32.8	20.6	19	D	A
P3	285	9.5	1928	398	28.4	17.3	26	E	B
P4	338	11	1922	460	26.5	19.7	24	E	B
P5	342	11	1952	467	26.7	20.0	24	D	B
P6	233	20	1942	844	72.4	10.1	8	D	A

Tabulka 18: Výpočet ÚKD, ranní špička

Proud	$I_v$	$z'$	$S_i$	$C_v$	Rez	$L_f$	$t_w$	ÚKD	
	Návrhová intenzita dopravy	Délka zelené	Saturovaný tok vjezdu	Kapacita vjezdu	Rezerva kapacity	Délka fronty	Střední doba	Požadovaná úroveň kvality	Dosažená úroveň kvality
	[j.voz/h]	[s]	[j.voz/h]	[j.voz/h]	[%]	[m]	[s]		
P1	425	25	1918	607	30.0	38.3	28	D	B
P2	353	19	1975	475	25.7	35.3	35	D	B
P3	279	15	1928	366	23.8	29.8	41	E	C
P4	395	21	1922	511	22.7	38.2	35	E	B
P5	462	28	1952	692	33.2	39.3	24	D	B
P6	367	41	1942	1008	63.6	23.2	11	D	A

Tabulka 19: Výpočet ÚKD, odpolední špička

U všech proudů je podle navrženého signálního plánu s velkou rezervou dodržena požadovaná ÚKD. Výsledné doby střední doby zdržení, z jejichž hodnot se určuje ÚKD, uvedené v tabulce 18, se u ranní špičky pohybují v rozmezí 8 s až 26 s. Nejdelší doba zdržení je pozorována u proudu P<sub>3</sub> a nejkratší u proudu P<sub>6</sub>. ÚKD se pohybuje mezi A – B. V případě odpolední špičky lze pozorovat výsledek o něco horší, kdy je rozmezí střední doby zdržení mezi 11 s až 41 s. V případě proud 3 jde o zdržení až 41 s, u proudu 6 o zdržení 11 s. ÚKD se pohybuje mezi A – C.

Tabulky 20 a 21 ukazuje výsledné hodnoty ÚKD pro výsledky optimalizačních výpočtů realizovaných s optimalizačním kritériem – hodnotou minimální poměrné rezervy.

Proud	$I_v$	$z'$	$S_i$	$C_v$	Rez	$L_f$	$t_w$	ÚKD	
	Návrhová intenzita dopravy	Délka zelené	Saturovaný tok vjezdu	Kapacita vjezdu	Rezerva kapacity	Délka fronty	Střední doba	Požadovaná úroveň kvality	Dosažená úroveň kvality
	[j.voz/h]	[s]	[j.voz/h]	[j.voz/h]	[%]	[m]	[s]		
P1	414	26	1918	712	41.9	30.4	19	D	A
P2	375	44	1975	1242	69.8	16.3	6	D	A
P3	285	15	1928	413	31.0	26.1	32	E	C
P4	338	35	1922	961	64.8	19.7	10	E	A
P5	342	18	1952	502	31.9	29.6	28	D	B
P6	233	47	1942	1304	82.1	8.9	4	D	A

Tabulka 20: Výpočet ÚKD, ranní špička

Proud	$I_v$	$z'$	$S_i$	$C_v$	Rez	$L_f$	$t_w$	ÚKD	
	Návrhová intenzita dopravy	Délka zelené	Saturovaný tok vjezdu	Kapacita vjezdu	Rezerva kapacity	Délka fronty	Střední doba	Požadovaná úroveň kvality	Dosažená úroveň kvality
	[j.voz/h]	[s]	[j.voz/h]	[j.voz/h]	[%]	[m]	[s]		
P1	425	29	1918	618	31.2	43.2	30	D	B
P2	353	49	1975	1075	67.2	24.1	11	D	A
P3	279	17	1928	364	23.4	33.9	46	E	C
P4	395	52	1922	1111	64.4	25.0	10	E	A
P5	462	33	1952	716	35.5	43.9	25	D	B
P6	367	65	1942	1402	73.8	15.3	4	D	A

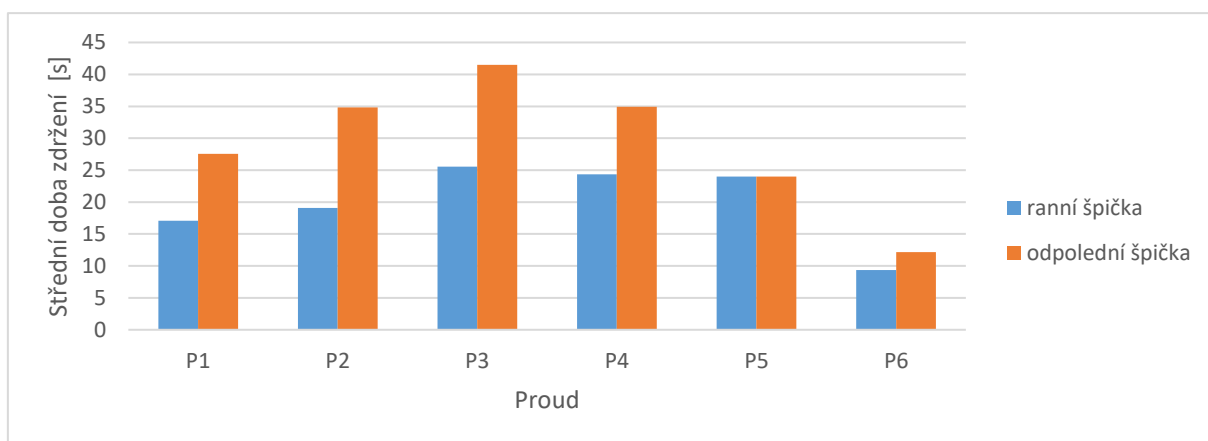
Tabulka 21: Výpočet ÚKD, odpolední špička

Z údajů v tabulkách 20 a 21 vyplývá, že také v případě použití druhého optimalizačního kritéria – hodnoty minimální poměrné rezervy je ve všech proudech dodržena požadovaná ÚKD. Nejhorší výsledek byl sledován opět u proudu P3, kde v ranní špičce činí střední doba zdržení 32 s a v odpolední špičce činí střední doba zdržení 46 s, což odpovídá ÚKD C. Nejkratší doba zdržení pak byla v obou špičkách pozorována opět u proudu P6.

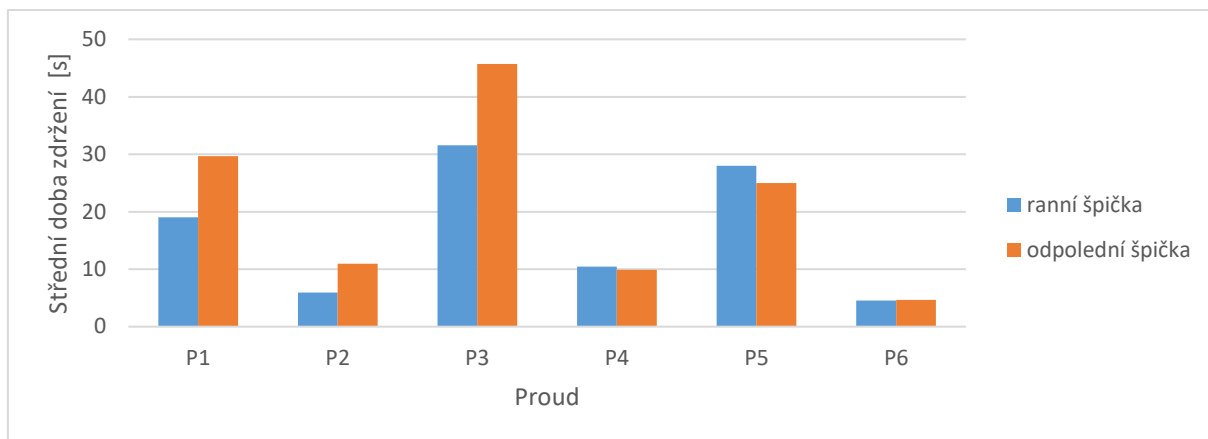
## 7.5. Shrnutí výsledků modelů

Výsledky střední doby zdržení byly vloženy do sloupcových grafů. Graf 3 uvádí hodnoty pro ranní a odpolední špičku v případě, kdy byl výpočet založen na optimalizačním kritériu – hodnotě délky cyklu a graf 4 pro optimalizační kritérium – hodnota minimální poměrné rezervy.

Důležitým faktorem, který je nutné si uvědomit je, že daný signální plán je navržen pro určitou dobu, kdy je ideální jej aktivovat. Výsledný signální plán pro ranní špičku je vhodné aktivovat minimálně v období 6:30 – 9:30, signální plán pro odpolední špičku pak v časech 14:30 – 17:30 (časový interval závisí na konkrétních podmínkách provozu v konkrétní lokalitě, ve které se křižovatky nachází). Je-li to účelné, potom v nočních hodinách a o víkendech existuje praxe, že SSZ se deaktivuje. V době nečinnosti SSZ je na jeho návěstidlech aktivováno přerušované žluté světlo a pro silniční provoz platí podmínky pravidel provozu na pozemních komunikacích dle vyhlášky č. 30/2001 Sb. [16]



Graf 3: Střední doby zdržení při minimalizaci délky cyklu, ranní a odpolední špička



Graf 4: Střední doby zdržení při maximalizaci minimální poměrné rezervy, ranní a odpolední špička

Z grafů 3 a 4 lze vyčíst, že vyšší hodnoty středních dob zdržení nastávají zpravidla v období odpolední špičky. Příčinou jsou vyšší intenzity vozidel na křižovatce.

## 8. Porovnání výsledků LP a metody saturovaného toku

Závěrečná kapitola se zabývá porovnáním výsledků metody použité v diplomové práci s výsledky metody použité v bakalářské práci. Nejdříve je v krátkosti shrnuta charakteristika (uvedení) problému. Následně jsou uvedeny dva grafy s hodnotami středních dob zdržení a nakonec jsou tabelárně porovnány ÚKD dosažené jednotlivými metodami.

Z výsledků dosažených metodami lineárního programování budou porovnávány výsledky pouze z modelu obsahujícího kritérium minimální poměrná rezerva. Důvodem je shodná délka cyklu u obou typů metod (metody saturovaného toku a metody maximalizující minimální poměrnou rezervu). V případě metody LP s kritériem minimální poměrná rezerva byla tato délka cyklu zvolena záměrně, aby výsledky obou metod byly vzájemně porovnatelné.

### 8.1. Charakteristika problému

#### 8.1.1. Principy jednotlivých metod

##### Metoda saturovaného toku

Metoda saturovaného toku (Websterova metoda) pracuje na principu stanovení délky cyklu a signálů volno v závislosti na stupních saturace vjezdu v jednotlivých fázích. Výpočtovým obdobím pro tuto metodu je vždy jedna hodina. [16]

##### Metoda lineárního programování

Principem lineárního programování je optimalizace funkce, která se buď maximalizuje, nebo minimalizuje. Vždy je předem určeno omezení, které se při aplikaci musí zohlednit. [17]

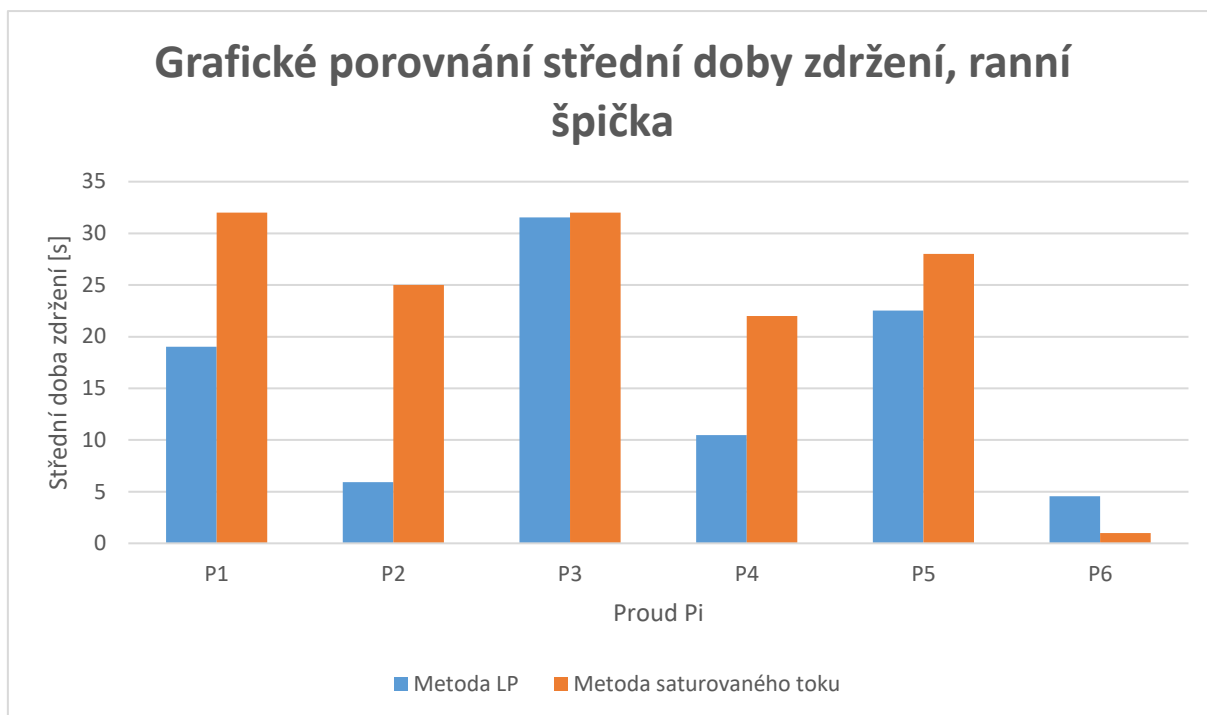
#### 8.1.2. Rozdíly při výpočtech

Hlavním rozdílem, který výpočet nejvíce ovlivnil, bylo využití doplňkových šipek SA a SD v případě metody saturovaného toku. V případě metody lineárního programování bylo počítáno s každým proudem jako se zvláštní signální skupinou (v praxi řešené pomocí směrových signálů) a doplňkové šipky tudíž využity nebyly. Tato rozdílnost mírně znevýhodnila výsledky u této metody. Při použití směrových signálů lze počítat s mírně menší kapacitou křižovatky než při použití plných signálů. Naopak směrové signály přinášejí jednoznačnou výhodu v přehlednosti a bezkoliznosti signálních skupin.

V následující podkapitole jsou znázorněny výsledky formou tabulek a grafů. Jsou zde srovnávány signální skupiny a jejich výsledné ÚKD (v grafech střední doba zdržení).

## 8.2. Grafické porovnání střední doby zdržení

### Ranní špička



Graf 5: Porovnání středních dob zdržení, ranní špička

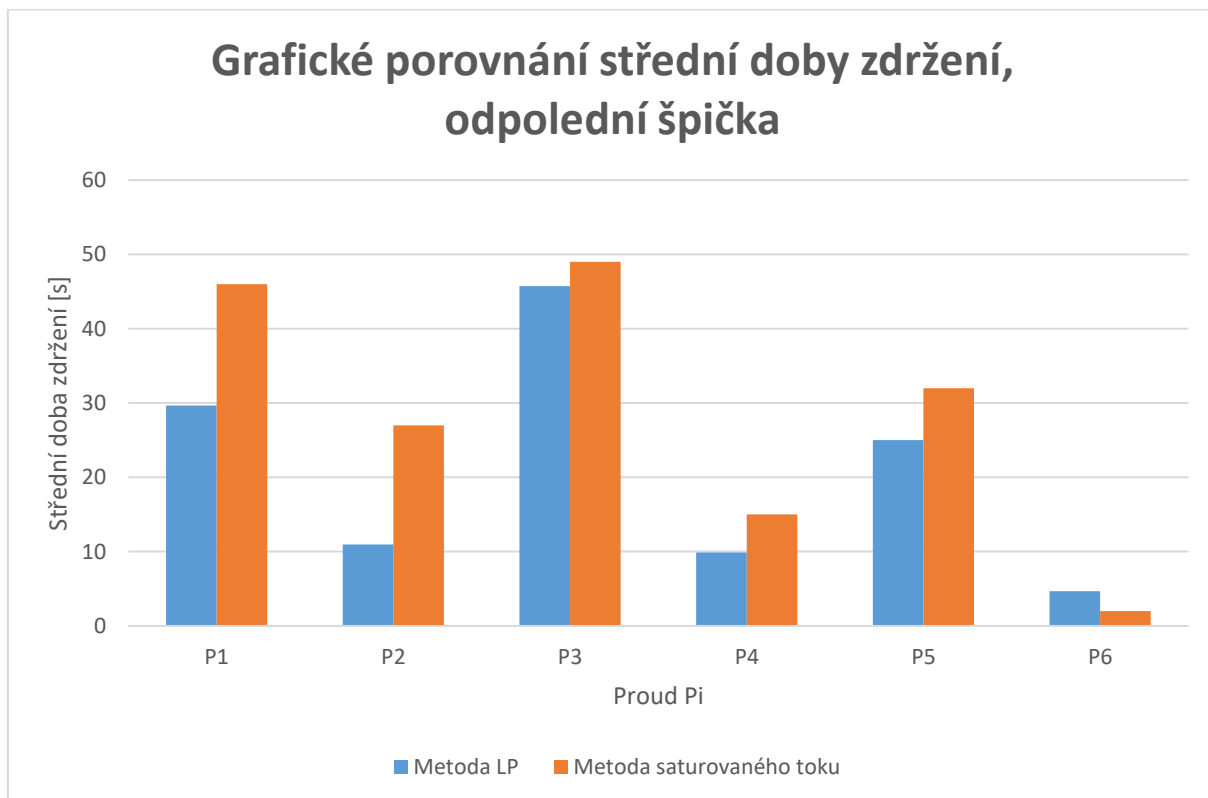
V grafu 5 je znázorněno porovnání střední doby zdržení u ranní špičky, v grafu 6 u odpolední špičky. Modré body propojené křivkou ukazují výsledky metody LP, oranžové body metody saturovaného toku.

V případě ranní špičky lze pozorovat, že u výsledků metody saturovaného dochází k menším dobám zdržení pouze pro signální skupinu P6, zatímco u výsledků metody LP pro ostatní signální skupiny. Výsledky jsou logické zejména z hlediska principů obou metod, kdy se obě snaží o efektivní přerozdělení doby zelené mezi jednotlivé signální skupiny alternativním způsobem. Velmi nízké zdržení u signální skupiny P6 v případě použití metody saturovaného toku vychází zejména ze situačního řešení a návrhu SSZ použitého v BP, které umožňuje v signálním programu mít delší dobu zelené pro tuto konkrétní signální skupinu.

Velmi nízké zdržení u signálních skupin P2 a P4 vychází naopak ze situačního řešení použitého pro metodu LP a z odlišného přístupu pro přerozdělení zeleného signálu. U obou metod pak nejvyšší zdržení vychází pro signální skupinu P3.

V případě odpolední špičky lze pozorovat podobné trendy jako u ranní špičky, zajímavé ovšem je, že v tomto grafu lze pozorovat značnou shodu ve vývoji. U obou metod vychází opět k nejvyššímu zdržení pro signální skupinu P3.

### Odpolední špička



Graf 6: Porovnání střední doby zdržení, odpolední špička



### 8.3. Porovnání úrovně kvality dopravy

Tabulky 22 a 23 obsahují ÚKD při ranní a odpolední špičce.

ÚKD ranní špička		
Signální skupina	Metoda LP	Metoda ST
P <sub>1</sub>	A	B
P <sub>2</sub>	A	A
P <sub>3</sub>	C	B
P <sub>4</sub>	A	A
P <sub>5</sub>	B	B
P <sub>6</sub>	A	A

Tabulka 22: Porovnání ÚKD, ranní špička

ÚKD odpolední špička		
Signální skupina	Metoda LP	Metoda ST
P <sub>1</sub>	B	B
P <sub>2</sub>	A	B
P <sub>3</sub>	C	C
P <sub>4</sub>	A	A
P <sub>5</sub>	B	B
P <sub>6</sub>	A	A

Tabulka 23: Porovnání ÚKD, odpolední špička

V případě ranní špičky lze u obou metod pozorovat velice obdobné výsledky, kdy rozdíly v ÚKD vznikly pouze v případě proudů P<sub>1</sub> a P<sub>3</sub>. V případě proudu P<sub>1</sub> byl lepší výsledek dosažen v případě metody LP, kde je výsledkem písmeno A. Opačný případ nastal v případě proudu P<sub>3</sub>, kde metodou LP vychází písmeno C, což je horší výsledek než při použití metody ST.

V případě odpolední špičky jsou výsledky obou výpočtů z hlediska dosažených ÚKD téměř totožné. Jediným rozdílem nastává v případě proudu P<sub>2</sub>, kde o jeden stupeň vychází lépe metoda LP. I v případě ÚKD lze výsledky považovat za logické, odchylky jsou velmi malé a jejich důvod lze spatřovat zejména v mírně odlišném technologickém návrhu SSZ a situačním řešení pro obě metody a v odlišném přerozdělení signálu volno vyplývající z principu příslušných metod.

## 9. Závěr

Předložená diplomová práce se zabývá návrhem na zlepšení situace na křižovatce na náměstí Míru v Kroměříži. Jejím cílem byla aplikace metod LP na návrh signálního plánu z křižovatky z bakalářské práce autorky a následné porovnání získaných výsledků s výsledky metody saturovaného toku použité v BP.

Křižovatka byla již několikrát stavebně upravována a byly na ni aplikovány různé způsoby řízení – okružní křižovatka, neřízená křižovatka. Nově navržené řešení se od původního výrazně liší. Na základě aplikace kritérií návrhu SSZ pro intenzity vozidlových proudů na komunikacích dle ČSN 73 6102 bylo zjištěno, že daná křižovatka splňuje podmínky pro zavedení SSZ a že by dané řešení mohlo situaci zlepšit. Pro danou křižovatku je možné použít i kritérium místa zvláštního zřetele.

V aktuálním stavu se jedná o křižovatku okružní, pro kterou již autorka v BP navrhla situační řešení pro světelně řízenou křižovatku. S touto variantou situačního řešení bylo i pracováno v této DP.

Po provedení shrnutí motivace výběru tématu, charakteristiky křižovatky a analýzy dopravní situace byly v rámci předložené práce vytvořeny dva matematické modely, které se liší v optimalizačním kritériu. Prvním optimalizačním kritériem byla délka cyklu na křižovatce, druhým byla hodnota minimální poměrné rezervy mezi nabízenou a průměrně požadovanou dobou zelené pro proud. Oba modely byly řešeny s využitím optimalizačního software Xpress – IVE. Výsledky obou modelů byly následně použity pro identifikaci úrovně kvality dopravy na křižovatce (ÚKD). Prostřednictvím ÚKD bylo zjištěno, že signální plány navržené metodami LP jsou vyhovující a zlepšují ÚKD na křižovatce oproti stávajícímu stavu.

Závěrečnou část práce tvoří porovnání výsledků střední doby zdržení a ÚKD u metody LP a metody saturovaného toku. K tomu bylo z principu přistoupeno pouze u modelu s minimální poměrnou rezervou. V případě tohoto modelu délka cyklu slouží jako pevně daný vstup při výpočtu, a tedy byla použita právě délka cyklu z BP, aby byly výsledky porovnatelné. Vzhledem k velmi obdobným hodnotám výsledků lze konstatovat, že metody by mohly být alternativami při výpočtech v praxi, popř. se dají vzájemně využívat pro kontrolu výsledků.

Ve vztahu k samotné křižovatce by bylo vhodné se do budoucna zamyslet nad dynamickým řízením křižovatek v celém městě, a to ideálně i s koordinací řízených SSZ s přechody pro chodce.

## Seznam použité literatury

- [1] BEKÁRKOVÁ, Marie. Návrh světelně řízené křižovátky Kojetínská X Velehradská v Kroměříži. [Online] [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/85251/F6-BP-2019-Bekarkova-Marie-bakalarska\\_prace.pdf?sequence=-1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/85251/F6-BP-2019-Bekarkova-Marie-bakalarska_prace.pdf?sequence=-1&isAllowed=y)
- [2] Google. google.maps.30. 8. 2021 [Online] [www.google.maps.com](http://www.google.maps.com)
- [3] BARTOŠ, Luděk. TP 234 Posuzování kapacity okružních křižovatek. 2. vyd. Liberec: EDIP, 2011. ISBN 978-80-87394-02-1.
- [4] MARTOLOS, Jan. TP 81 Navrhování světelných signalizačních zařízení pro řízení provozu na pozemních komunikacích. 3. vyd. Praha: Ministerstvo dopravy, 2015.
- [5] Policie české republiky. Centrum dopravního průzkumu. [Online] <http://maps.jdvm.cz/cdv2/apps/nehodyvmape/Search.aspx>
- [6] Dopravní inženýrství: Řízené úroňové křižovátky [online]. <https://slideplayer.cz/slide/11970484/>, Brno, 2007.
- [7] TEICHMANN, Dušan. Modely pro řešení rozhodovacích úloh v logistice I. Ostrava, 2011 [Online] <https://portal.cvut.cz/wp-content/uploads/2017/04/HP2015-23-Teichmann.pdf>
- [8] TEICHMANN, Dušan. Operační analýza 2 – část I Modely pro distribuční logistiku. Studijní materiály pro posluchače prezenční i kombinované formy studia studijního oboru „Logistika“, Vysoká škola logistiky, o.p.s., Přerov, 2011. 32 s.
- [9] ČERNÁ, Anna; ČERNÝ, Jan. Manažerské rozhodování o dopravních systémech. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2014, 230 s. ISBN 978-80-7395-849-7.
- [10] BARTOŠ, Luděk. TP 188 Posuzování kapacity neřízených úroňových křižovatek. Plzeň: EDIP, 2018.
- [11] BARTOŠ, Luděk. Stanovení intenzit dopravy na pozemních komunikacích: TP 189. 2. vyd. Plzeň: EDIP, 2012. ISBN 978-80-87394-06-9.
- [12] MARTOLOS, Jan. TP 235 Posuzování kapacity světelně řízených křižovatek. Liberec: EDIP, 2011. ISBN 978-80-87394-03-8.

- [13] Projektování křižovatek na pozemních komunikacích, ČSN 73 6102, 2007.
- [14] BUŠTA, Pavel. Zákon o silničním provozu s komentářem a související předpisy: zákon č. 361/2000 Sb., Praha: Venice Music Production, 2006. ISBN 80-902948-3-9.
- [15] Seznam.cz, a. s. mapy.cz. 8 2019 [Online] [www.mapy.cz](http://www.mapy.cz)
- [16] KREJČÍ, Lukáš. Navrhování signálních plánů křižovatek metodami lineárního programování [online]. Ostrava, 2011 [cit. 2022-08-14]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/qbhww7/>. Diplomová práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní.
- [17] VOLEK, Josef a Bohdan LINDA: Teorie grafů, aplikace v dopravě a veřejné správě. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2012. ISBN 978-80-7395-225-9.
- [18] ZILIASKOPOULOS, A. A Linear Programming Model for the Single Destination System Optimum Dynamic Traffic Assignment Problem. Transportation Science, 2000, vol. 34, no.
- [19] WALLER, S. Linear Programming Formulation for Strategic Dynamic Traffic Assignment. Springer Science + Business Media New York, 2013.

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Spojení Kroměříže s dálnicí D1 [2].....	13
Obrázek 2: Okružní křižovatka náměstí Míru [převzato a upraveno z [2]].....	13
Obrázek 3: Přejechod pro chodce Milíčovo náměstí [převzato a upraveno z [2]] .....	14
Obrázek 4: Situační výkres nově navržené křižovatky [1] .....	15
Obrázek 5: Pentlogram intenzit ranní špička [1].....	17
Obrázek 6: Pentlogram intenzit odpolední špička [1].....	18
Obrázek 7: Schéma křižovatky [1].....	29
Obrázek 8: Graf bezkoliznosti (vytvořeno autorkou).....	31
Obrázek 9: Kód - výběr minimálního počtu fází.....	33
Obrázek 10: Výsledek řešení matematického modelu pro minimalizaci počtu vybraných fází .....	33
Obrázek 11: Schéma optimálního pořadí fází (vytvořeno autorkou).....	37
Obrázek 12: Zdrojový kód matematického modelu s optimalizačním kritériem minimalizace délky cyklu signálního plánu, ranní špička .....	41
Obrázek 13: Výsledek modelu minimalizace délky cyklu, ranní špička.....	42
Obrázek 14: Signální plán, ranní špička.....	43
Obrázek 15: Zdrojový kód matematického modelu s optimalizačním kritériem minimalizace délky cyklu signálního plánu, odpolední špička.....	45
Obrázek 16: Výsledek modelu minimalizace délky cyklu, odpolední špička .....	46
Obrázek 17: Signální plán, odpolední špička .....	47
Obrázek 18: Zdrojový kód matematického modelu s optimalizačním kritériem hodnota minimální poměrné rezervy, ranní špička.....	49
Obrázek 19: Výsledek modelu maximalizace hodnot minimální poměrné rezervy, ranní špička .....	50
Obrázek 20: Signální plán, ranní špička.....	51
Obrázek 21: Zdrojový kód matematického modelu s optimalizačním kritériem maximalizace hodnot minimální poměrné rezervy, odpolední špička.....	52
Obrázek 22: Výsledek modelu maximalizace hodnot minimální poměrné rezervy., odpolední špička .....	53
Obrázek 23: Signální plán, odpolední špička .....	54

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Koeficienty pro přepočítání fyzických vozidel na jednotková vozidla [1].....	16
Tabulka 2: Intenzity v období odpolední špičky [1].....	17
Tabulka 3: Úroveň kvality dopravy na křižovatkách [3].....	19
Tabulka 4: ÚKD kapacita vjezdu .....	19
Tabulka 5: ÚKD pro neřízené křižovatky [1] .....	26
Tabulka 6: Kapacitní výpočet metodou saturovaného toku ranní špička [1] .....	27
Tabulka 7: Kapacitní výpočet metodou saturovaného toku odpolední špička [1].....	27
Tabulka 8: Intenzity dopravy ranní špička .....	28
Tabulka 9: Intenzity dopravy odpolední špička.....	28
Tabulka 10: Matice mezičasů pro řešenou křižovatku [1] .....	30
Tabulka 11: Submatice mezičasů při fázových přechodech F1-F2-F4-F1(pořadí 1).....	35
Tabulka 12: Submatice mezičasů při fázových přechodech F2-F4-F1-F2 (pořadí 2).....	36
Tabulka 13: Minimální délky zelené pro proudy vstupující do křižovatky, ranní špička .....	38
Tabulka 14: Minimální délky zelené pro proudy vstupující do křižovatky, odpolední špička .	38
Tabulka 15: Hodnoty ÚKD .....	56
Tabulka 16: Pravidla přepočtu navržené doby zelené na efektivní délku zelené .....	56
Tabulka 17: Výpočet saturovaného toku, ranní špička [1] .....	57
Tabulka 18: Výpočet ÚKD, ranní špička.....	57
Tabulka 19: Výpočet ÚKD, odpolední špička .....	58
Tabulka 20: Výpočet ÚKD, ranní špička.....	58
Tabulka 21: Výpočet ÚKD, odpolední špička .....	58
Tabulka 22: Porovnání ÚKD, ranní špička .....	64
Tabulka 23: Porovnání ÚKD, odpolední špička .....	64

## Seznam grafů

Graf 1: Graf kritérií z hlediska intenzity vozidel [1].....	20
Graf 2: Návrh fází a sledu fází dle metody saturovaného toku [1] .....	25
Graf 3: Střední doby zdržení při minimalizaci délky cyklu, ranní a odpolední špička .....	59
Graf 4: Střední doby zdržení při maximalizaci minimální poměrné rezervy, ranní a odpolední špička .....	60
Graf 5: Porovnání středních dob zdržení, ranní špička.....	62
Graf 6: Porovnání střední doby zdržení, odpolední špička .....	63

## Seznam příloh

- Příloha 1 Signální plány navržené pomocí metody saturovaného toku pro ranní a odpolední špičku.
- Příloha 2 Výpočet saturovaného toku, odpolední špička