



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

## OPTIMALIZACE SVĚTELNÉ KŘIŽOVATKY

OPTIMIZATION OF INTERSECTION SIGNALING

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vojtěch Langer

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jakub Kúdela, Ph.D.

BRNO 2021



# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automatizace a informatiky
Student:	<b>Vojtěch Langer</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Aplikovaná informatika a řízení
Vedoucí práce:	<b>Ing. Jakub Kúdela, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Optimalizace světelné křižovatky

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Bakalářská práce se bude zabývat optimálním řízením světelné křižovatky. Stěžejní částí práce bude rešerše aktuálně používaných metod.

### Cíle bakalářské práce:

Popsat problém řízení světelné křižovatky.

Provést rešerši aktuálně používaných metod pro tento problém.

Pro vybranou metodu vytvořit software implementaci.

### Seznam doporučené literatury:

LI, X., SUN, J.-Q. Turning-lane and signal optimization at intersections with multiple objectives. Engineering Optimization. 2019, 51 (3), 484-502.

LIST, G. F., CETIN, M. Modeling Traffic Signal Control Using Petri Nets. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2004, 5 (3), 177-187.

CHEN, L., ENGLUND, C. Cooperative Intersection Management: A Survey. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2016, 17 (2), 570-586.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Tato práce se věnuje rešerši metod používaných pro optimalizaci světelné křižovatky. Práce je rozdělena do čtyř částí. Nejprve je krátce představen postup používaný při návrhu řízení signalizace. Následuje popis disciplíny optimalizace. Stěžejní částí je pak rešerše používaných metod. V poslední části je řešena úloha návrhu parametrů světelného řízení fiktivní křižovatky.

## **ABSTRACT**

This thesis is devoted to a search of methods used for the optimization of traffic signalling. The thesis is divided into four parts. Firstly procedure used for designing signalling control is briefly introduced. The following is a description of the optimization discipline. The main part is the search of the methods used. In the last part task of designing parameters of light control of a fictitious intersection is being solved.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Řízení dopravy, světelná signalizace, optimalizace

## **KEYWORDS**

Traffic management, traffic lights, optimization





ÚSTAV AUTOMATIZACE  
A INFORMATIKY



2021

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

LANGER, Vojtěch. *Optimalizace světelné křižovatky*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132704>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky. Vedoucí práce Ing. Jakub Kůdela, Ph.D.





## **PODĚKOVÁNÍ**

Zde bych chtěl poděkovat panu Ing. Jakobovi Kůdelovi, Ph.D. za odborné rady a připomínky, trpělivost a věnovaný čas při tvorbě této práce.



## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, vypracoval jsem ji samostatně pod vedením vedoucího práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury.

Jako autor uvedené práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následku porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona c. 121/2000 Sb., včetně možných trestně právních důsledků.

V Brně dne 20. 5. 2021

.....

Vojtěch Langer



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD.....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>SVĚTELNÉ SIGNALIZAČNÍ ZAŘÍZENÍ.....</b>	<b>17</b>
2.1	Podklady a průzkum .....	17
2.2	Tvorba signálního plánu .....	17
2.3	Systém řízení .....	18
2.4	Zkušební testy .....	18
<b>3</b>	<b>OPTIMALIZAČNÍ METODY.....</b>	<b>19</b>
<b>4</b>	<b>REŠERŠE METOD POUŽÍVANÝCH PRO OPTIMALIZACE SVĚTELNÉHO ŘÍZENÍ.....</b>	<b>21</b>
4.1	Metoda vícekriteriální optimalizace [9].....	21
4.2	Simulační model pro světelně řízené křižovatky [10].....	21
4.3	Metoda Elimination Pairing System (ESP) [11].....	22
4.4	Vícekriteriální optimalizace založená na genetickém algoritmu [12].....	22
4.5	Metoda modifikovaného mnohoprvkového GA [13].....	22
4.6	Optimalizace prodloužení použitím Meta-Heuristických Search algoritmů [14] ..	23
4.7	Metoda založená na fuzzy řídicí jednotce [15].....	23
4.8	Metoda vyhlazení dráhy automobilů při průjezdu křižovatkou pro optimalizaci spotřeby [16].....	24
4.9	Optimalizace a určení tras genetickými algoritmy při použití modelu toku dopravy založené na Petriho sítích [17] .....	24
4.10	Globální optimalizační přístup pro řešení synchronizačního problému [18] ...	25
4.11	Optimalizace světelného řízení pro magistrály s velkým počtem jednostranných vozidel [19, 20].....	26
4.12	Adaptivní koordinované světelné řízení [21] .....	26
4.13	Adaptivní světelné řízení pro případy narušení provozu [22] .....	27
4.14	Signalizace na dopravních tepnách zohledňující zpoždění jednotlivých osob [23] .....	27
4.15	Metoda aproximativního dynamického programování („approximate dynamic programming“) [24].....	28
4.16	Řízení v reálném čase systémem CRONOS [25] .....	28
4.17	Model adaptivního řízení [26] .....	29
4.18	Robustní optimalizace signálního plánu s ohledem na životní prostředí [27]..	29
4.19	Decentralizované signální řízení pro síť městské dopravy [28].....	30
4.20	Adaptivní řízení pro „connected vehicle environment“ [29].....	30
<b>5</b>	<b>OPTIMALIZACE DEKOMPOZIČNÍM PŘÍSTUPEM.....</b>	<b>33</b>
5.1	Zvolení optimalizačního modelu .....	33
5.2	Prostředí CVX .....	34
5.3	Parametry křižovatky.....	35
5.3.1	Saturovaný tok .....	37
5.3.2	Hodnoty minimální doby signálu volno a výsledek optimalizačního modelu .	38
<b>6</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>39</b>
<b>7</b>	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>41</b>



# 1 ÚVOD

Řízení křižovatek je jedním z náročných úkolů transportních systémů pro zabezpečení bezpečného a plynulého provozu. Přestože křižovatky jsou pouze malou částí silničního systému, hrají významnou roli v dopravních nehodách. Křižovatky bývají obvykle úzkým místem komunikační sítě. Zavádění světelné signalizace pomáhá zlepšovat bezpečnost a plynulost dopravy na křižovatkách a za pomoci hodnocení dopravy řídicími systémy je snaha stále zefektivňovat provoz na pozemních komunikacích.

Problém signálního řízení hledá efektivní plán nastavení dopravních signálů na křižovatkách s cílem maximalizovat tok dopravy při zohlednění různých faktorů jako jsou řízení v reálném čase, omezení signálních časů, rychlý vývoj dopravního systému a praktická implementace. Jelikož faktory tvořící problém řízení vykazují stochasticky komplikované interakce, je nezbytné identifikovat tyto faktory a navrhnout metody řešení, které mohou tuto složitost řešit, a přesto být prakticky implementovány.

Jedním z adresovaných problémů jsou dopravní zácpy, které představují problém s řadou negativních důsledků na účastníky silničního provozu. Fyziologický kvůli potřebné zvýšené pozornosti účastníků silničního provozu. Ekonomický z důvodu zvýšení spotřeby paliva. Z hlediska životního prostředí zácpa zvyšuje znečištění výfukovými plyny.

Možnosti signálního řízení dopravy jsou zkoumány již od první poloviny 20. století. V roce 1958 Webster [1] publikoval první pokyny pro nastavení dopravní signalizace. O deset let později vyvinul Robertson [2] softwarový nástroj pojmenovaný TRANSYT, který určoval optimální čas pro pevně daný signalizační plán a umožňoval výpočet výkonnostního indexu signální sítě. Na základě těchto prací byly provedeny teoretické analýzy a odvozeny rovnice pro výpočet dopravní kapacity a průměrné zpoždění na vozidlo na signalizované křižovatce. Staly se také podkladem pro různé simulátory dopravy pro optimalizaci signálního nastavení. Na těchto teoretických základech bylo navrženo velké množství různých algoritmů v odpovědi na rychlý vývoj dopravní infrastruktury.

Cílem této práce je vytvořit soupis různých používaných metod pro optimalizaci křižovatek se světelným signálním plánem. V první kapitole je nastíněn postup návrhu světelného řízení podle technických podmínek TP 81. Poté jsou představeny základní modely v teorii optimalizace. Následuje rešerše metod používaných pro návrh a řízení světelně řízených křižovatek. Poslední část práce se věnuje výpočtu parametrů křižovatky a následnou implementací metody pro optimalizaci minimální délky cyklu a stanovení dob zelených pro fiktivní křižovatku.





## 2 SVĚTELNÉ SIGNALIZAČNÍ ZAŘÍZENÍ

Teorie použitá v této kapitole byla čerpána z technických podmínek TP 81 [3]. Řízením chodu dopravy na křižovatce lze dosáhnout větší bezpečnosti při průjezdu přímo řízením toku dopravy, ale i nepřímo snížením stresu a netrpělivosti účastníků silničního provozu nebo například zvýšením viditelnosti v křižovatce. Správně stanoveným signálním plánem lze dosáhnout také snížení spotřeby pohonných a tím i emisí, nebo také nadměrnému hluku z dopravy v obydlených oblastech.

Návrh instalace světelného signalizačního zařízení (dále SSZ) má obsahovat volbu metody řízení, technický popis, výpočet programových prvků signálního plánu a návrh uzlu a jeho začlenění do komunikační sítě. Dříve než je rozhodnuto o instalaci světelného signalizačního zařízení, posuzují se možnosti zlepšení bezpečnosti a plynulosti provozu jinými organizačními opatřeními. Zvažuje se také vliv SSZ na nehodovost na jiném místě komunikační sítě.

Pro posouzení, zda je instalace SSZ vhodná, je třeba splnit nejméně jedno z kritérií: bezpečnost provozu, intenzity provozu z hlediska vozidel, intenzity provozu z hlediska chodců, plynulosti jízdy vozidel MHD. Při návrhu SSZ pro nové křižovatky se fyzické uspořádání křižovatky podřizuje parametrům a požadavkům světelného řízení.

Návrh světelné signalizace probíhá v následujících krocích.

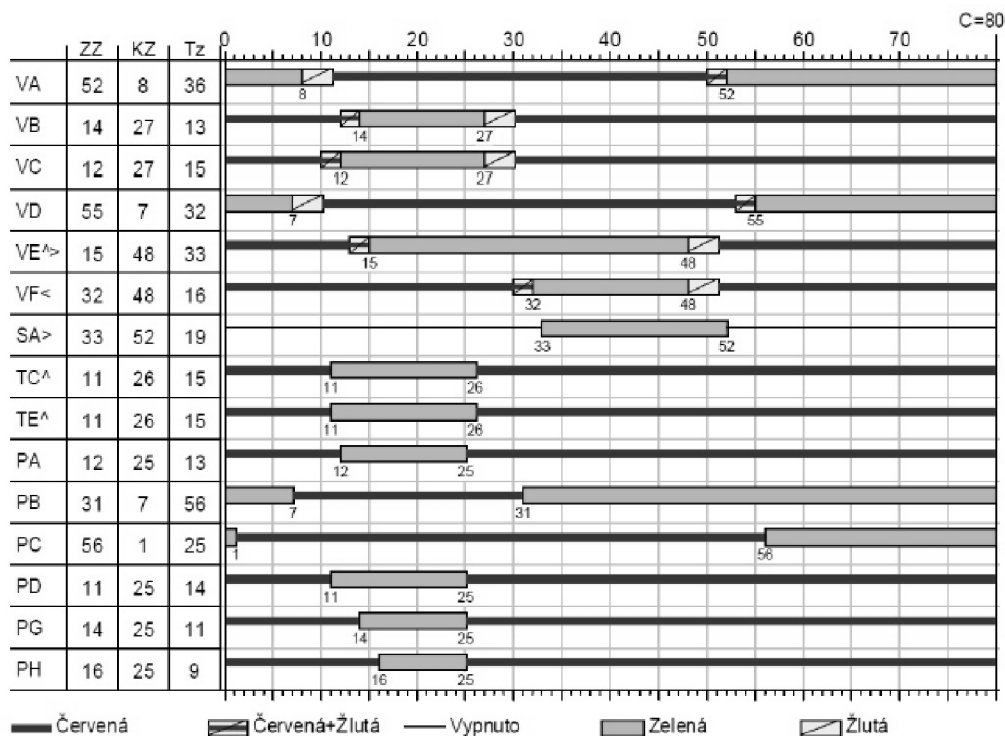
### 2.1 Podklady a průzkum

Před samotným návrhem světelné signalizace křižovatky je nutné provést průzkum situace daného silničního uzlu. V této fázi je zkoumána pozice a role v komunikační síti, možnost propojení do koordinovaných skupin, dopravní značení, zástavby a technická infrastruktura v okolí. Dalšími důležitými faktory jsou pak údaje o intenzitě dopravy. Zkoumá se doprava v jednotlivých směrech křižovatky, její skladba, denní špičky a pohyb chodců a cyklistů. Neposledním faktorem jsou statistiky nehodovosti.

### 2.2 Tvorba signálního plánu

Po sběru dat potřebných se přejde tvorbě signálního plánu. Signální plán je program řízení světelné signalizace, který určuje následnost signálů volno a jejich délku pro jednotlivé signální skupiny. Signální plán je grafickým znázorněním signálů pro všechny účastníky silničního provozu. Příklad signálního plánu je zobrazen na Obr.1. Skládá se tedy z jednotlivých signálních fází, které se řadí do cyklů.

Pro rozvržení fází a stanovení dob signálů volno lze použít několik různých metod. Ty jsou popsány v kapitole 4. Rešerše metod používaných pro optimalizaci světelného řízení.



Obr. 1: Příklad signálního plánu [3]

## 2.3 Systém řízení

Systém řízení popisuje způsob, jak je řízení realizováno světelným signalizačním zařízením. Volba systému je dána cíli, jichž má být dosaženo. Systém bývá určen provozně technickými veličinami, s kterými se počítá při návrhu signálního plánu. Různé systémy řízení se liší možnostmi modifikace časování nebo ovlivnitelností jako takové.

## 2.4 Zkušební testy

Než je signalizační zařízení oficiálně schváleno, musí se uskutečnit softwarové testování, jestli systém splňuje všechny požadované hodnoty. Testování by mělo být definováno podle předem definovaných cílových požadavků. Ověřují se převážně signalizační stavy, doby volna, hlášení detektorů, stavy čítačů.

### 3 OPTIMALIZAČNÍ METODY

Tato kapitola pojednává o základních optimalizačních modelech a přístupech pro jejich řešení. Jako podklad byly použity texty [5, 6] a [7]. Cílem optimalizace (matematického programování) je nalézt co nejlepší nastavení proměnných parametrů daného systému tak, aby hodnota vybraného kritéria byla co nejlepší a vybrané hodnoty parametrů splňovaly určitá omezení. Obecně je možné optimalizační problém reprezentovat následujícím matematickým modelem:

$$\begin{aligned} &\text{minimalizovat } f(x_1, \dots, x_n) \\ &\text{za podmínek } g_i(x_1, \dots, x_n), \quad i = 1, \dots, m, \\ &x_j \in M_j \subseteq Z, \quad j \in J, \end{aligned}$$

kde  $x_j$  jsou jednotlivé proměnné,  $f$  je takzvaná kritériální (účelová) funkce,  $g_i$  jsou omezující funkce,  $M_j$  jsou podmnožiny množiny celých čísel  $Z$  a  $J \subseteq \{1, \dots, n\}$ . Optimalizační úlohy lze podle charakteru funkcí  $f$  a  $g_i$  rozdělit na:

- úlohy lineární – všechny funkce jsou lineární
- úlohy konvexní – všechny funkce jsou konvexní
- úlohy nekonvexní – některá z funkcí nesplňuje konvexnost/linearitu

Dále lze úlohy charakterizovat podle podmínek celočíselnosti pro jednotlivé proměnné na:

- úlohy spojité – podmínky celočíselnosti se nevyskytují ( $J$  je prázdná množina)
- úlohy částečně celočíselné – podmínka celočíselnosti se týká pouze vybraných proměnných ( $J \subset \{1, \dots, n\}$ )
- úlohy úplně celočíselné – podmínka celočíselnosti se vztahuje na všechny proměnné ( $J = \{1, \dots, n\}$ )
- úlohy bivalentního programování – proměnné mohou nabývat pouze hodnot nula nebo jedna ( $M_j \in \{0,1\}$ )

Další dělení optimalizačních úloh se zaměřuje na vstupní data optimalizační úlohy a jejich přesnost:

- deterministické úlohy – vstupní data jsou známa přesně
- stochastické úlohy – vstupní data mají známé pravděpodobnostní rozdělení
- robustní úlohy – pro vstupní data jsou známé intervaly, na kterých se jejich hodnoty mohou vyskytovat
- fuzzy úlohy – vstupní data mají tvar fuzzy množin

Poslední dělení je podle počtu kritériálních funkcí:

- úlohy s jedním kritériem
- vícekritériální úlohy

Daná optimalizační úlohy se většinou dá kategorizovat kombinací těchto zmíněných charakteristik. Stejně jako jsou rozmanité kategorie optimalizačních úloh (a jejich praktických aplikací), jsou rozmanité i metody, jakými se dané optimalizační úlohy řeší. Důležitým faktorem pro výběr vhodné optimalizační metody není jen kategorie daného optimalizačního problému, ale i velikost úlohy daná počtem proměnných a omezení. Základními metodami pro spojitě lineární úlohy jsou simplexová a barierová metoda. Pro spojitě konvexní úlohy patří mezi nejpoužívanější přístupy gradientní a subgradientní metody, Newtonova metoda, již zmíněné barierové metody, a mnoho dalších [8]. Pro úlohy nekonvexní, celočíselné a nedeterministické je situace daleko složitější. V těchto případech závisí volba vhodné optimalizační metody na struktuře a velikosti daného problému a nelze říct, že by některá z metod byla používanější/lepší než jiná. Obecně se používá následujících přístupů:

- metody klasické matematické analýzy
- metody matematického programování
- metody založené na matematické teorii procesů (dynamické programování)
- metody založené na teorii her
- metody síťové analýzy a teorie grafů
- simulační metody (Monte Carlo)
- heuristické metody (většinou „šité na míru“ pro daný problém)
- metaheuristické metody (genetické a evoluční algoritmy)
- metody strojového učení

## 4 REŠERŠE METOD POUŽÍVANÝCH PRO OPTIMALIZACE SVĚTELNÉHO ŘÍZENÍ

Způsoby řízení se dělí na dva základní způsoby. Způsob A s rozhodováním při řízení mimo průběh signálního plánu pro volbu signálních plánů a režimů. Řízení způsobem A se upravuje v delších časových intervalech řádově desítek minut až hodin. Ty se dále dělí na časově a dopravně závislé podle požadovaného způsobu aktivace. V práci je dále řešen způsob B s rozhodováním při řízení v průběhu signálního plánu.

U způsobů typu B probíhá rozhodování v krocích řádově sekund. Dělí se pevné řízení a dopravně závislé (dynamické). Pokud je použit pevný signální plán, všechny hodnoty technických parametrů jsou dány již před nasazením projektovaného světelného řízení a není žádná možnost změn. Dynamický signální plán se naopak chová podle předem dané logiky řízení a průběžně vyhodnocovaných stavů a měřených hodnot. Volba Dynamického signálního plánu umožňuje modifikaci signálního plánu jako např. proměnnou délku signálu volno nebo změnu pořadí fází. [1]

### 4.1 Metoda vícekriteriální optimalizace [9]

Tato studie navrhuje přístup vícekriteriální optimalizace k nalezení nejlepších kompromisů výkonu dopravy na křižovatkách. Jako cíle jsou stanoveny efektivita dopravy, úspora energie a bezpečnost silničního provozu. Optimální Pareto řešení byla dosažena použitím buněčného mapování s („cell mapping“). Navrhuje algoritmus, který pomůže uživateli implementovat optimální návrhy. Jako návrhové parametry jsou prezentovány výsledky z vícekriteriální optimalizace se signálním nastavením a přiřazení jízdního pruhu.

Z výsledků vyplývá, že počet odbočovacích pruhů má významný vliv na výkon na křižovatce a obzvlášť když je velký provoz. Prokazuje zlepšení efektivity, úspory energie a bezpečnosti při optimalizaci přiřazování pruhů zároveň se světelnými signály oproti optimalizaci pouze jednoho z nastavení.

### 4.2 Simulační model pro světelně řízené křižovatky [10]

Článek popisuje návrh modelu světelné křižovatky, který používá časové cykly a teorii řazení. Studie sleduje časy příjezdu vozidel během provozu signalizované křižovatky a jejich charakteristiky při průjezdu. Na základě těchto dat vytváří zpožděný model křižovatky a předpovídá průjezd vozidel křižovatkou za užití teorie řazení. Tato studie poskytuje teoretické základy pro zlepšení efektivity na pozemní komunikaci, snižuje prostoje a umožňuje možnost adaptace na náhlou změnu situace na silnici.

### 4.3 Metoda Elimination Pairing System (ESP) [11]

Článek se zabývá optimalizací signálního časování přesycené křižovatky. Pro výpočet optimální délky cyklu a dob signálu zelené byl použita metoda ESP, která je jednou z turnajových metod. Za účelovou funkci byla zvolena minimalizace zpoždění vozidel. Získané výsledky byly porovnány s Websterovou metodou (tradiční metoda pro návrh signálního časování) a s Transyt 14 (software pro návrh signálního časování). Použitím ESP bylo dosaženo lepších výsledků než při použití Websterovy metody, a proto autoři označili metodu ESP za výhodnou pro návrh signálního plánu přesycených křižovatek a navrhuji zkoumání dalších turnajových metod pro použití v profesionální sféře řízení světelné signalizace.

### 4.4 Vícekriteriální optimalizace založená na genetickém algoritmu [12]

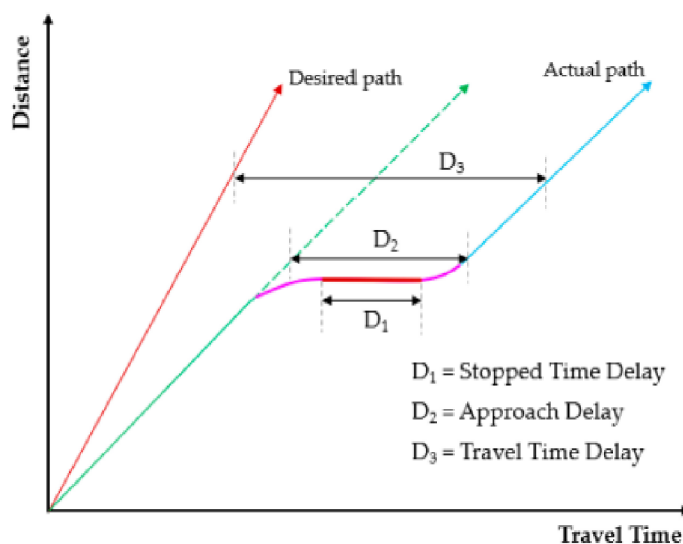
Studie adresuje zvyšující se míru emisí a spotřeby paliva. Předmětem studie je návrh vícekritériální optimalizace signálního řízení s účelem snížení emisí, spotřeby paliva a prostojů vozidel na křižovatkách. Optimalizační metoda je kombinací Paramics – mikroskopického simulačního softwaru, Comprehensive Modal Emission Model (CMEM, komplexní modální model emisí) a genetického algoritmu. Výsledky studie ukazují, že optimální časové schéma získané touto metodou je lepší než schéma podle Webster. Z výsledků byl vyvozen závěr, že vícekritériální optimalizace založená na Genetickém algoritmu (GA) je více efektivní pro dané cíle.

### 4.5 Metoda modifikovaného mnohoprvkového GA [13]

V článku je prezentována strategie, jak optimalizovat parametry světelného řízení pro řešení dopravních kolon použitím modifikovaného mnohoprvkového genetického algoritmu (MEGA) a metody optimalizace hejnem částic (Particle swarm optimization – PSO) s cílem zvětšení propustnosti křižovatky. Modifikace MEGA je provedena přidáním Hash-Table pro uložení nejlepších populací pro zrychlení znovu zkombinování procesu MEGA (H-MEGA). Výsledky experimentu ukazují, že optimalizace založená na H-MEGA poskytuje lepší výsledky oproti MEGA a PSO metodám a dosáhne jich za kratší výpočetní čas. Aplikací metody na reálnou křižovatku byla zvýšena propustnost křižovatky o 20%.

## 4.6 Optimalizace prodlení použitím Meta-Heuristických Search algoritmů [14]

Autoři v článku adresují nelineárnost a stochastické chování dopravní situace. Proto si kladou za cíl vytvoření metaheuristických metod pro inteligentní řízení dopravy na izolované řízené křižovatce. Byl použit GA a diferenciální evoluce (DE) pro zlepšení průjezdnosti a minimalizaci prostojů optimalizací signálního plánu. Jako primární výkonnostní ukazatel a účelovou funkci algoritmu byl vybrán průměrný čas zpoždění vozidla při průjezdu křižovatkou (hodnoty zpoždění vozidla jsou zobrazeny na obr. 2) v městě Dhahran v Saudské Arábii. Výsledky studie ukazují že časování signálního plánu vytvořené pomocí GA a DE evoluce významně snížily prostoje a to o 15 až 35% ve srovnání se současnými podmínkami. I když DE konvergoval k účelové funkci mnohem rychleji, GA překonává DE, pokud jde o kvalitu řešení, tj. minimální zpoždění vozidla. K ověření výkonnosti navrhovaných metod byly porovnány délky cyklů a zpoždění GA a DE s výstupem optimalizace ze systému pro simulaci a optimalizaci řízení dopravy TRANSYT 7F. Výsledky ověření prokázaly vhodnost a robustnost navrhovaných metod.



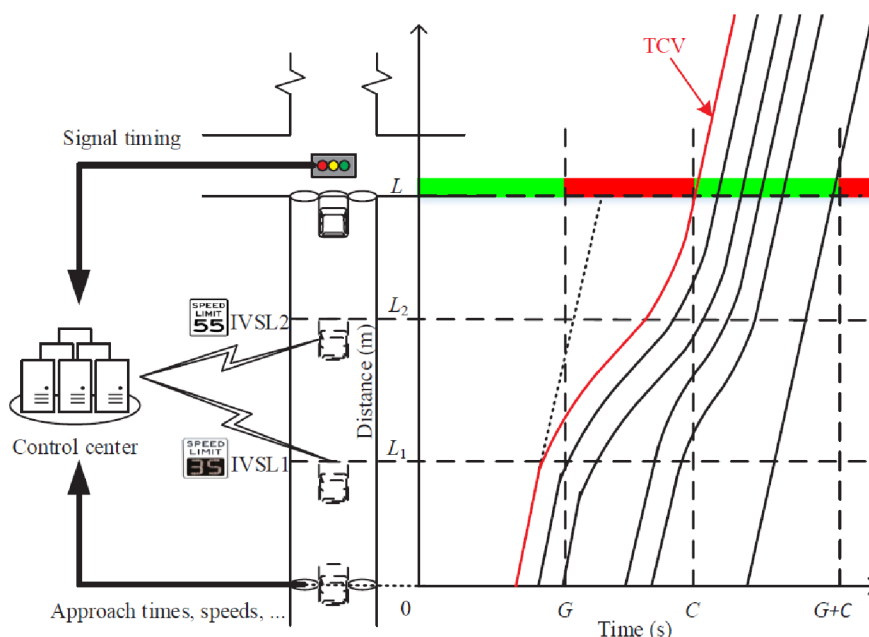
Obr. 2: Ilustrační schéma různých měr zpoždění [14]

## 4.7 Metoda založená na fuzzy řídicí jednotce [15]

Studie [15] se zabývá adaptivním řízením křižovatky pomocí fuzzy řídicí jednotky, která byla sestrojena pomocí genetického algoritmu. Model křižovatky zahrnuje hustotu provozu a velikost řady stojících vozidel jako vstupní parametry a řídí délku signálu volno tak, aby se minimalizovalo čekání všech vozidel. Srovnáním s jinými metodami (založených jak na pevně daném časovém plánu, tak na různých adaptivních přístupech) autoři ukázali použitelnost a robustnost tohoto přístupu jak pro izolované, tak i pro složitější křižovatky.

#### 4.8 Metoda vyhlazení dráhy automobilů při průjezdu křižovatkou pro optimalizaci spotřeby [16]

Moderní problematikou spojenou s řízením křižovatek je zahrnutí samoříditelných vozidel se schopností „Vehicle to Infrastructure“ komunikace. Článek [16] se zabývá problémem optimalizace trajektorie takovýchto vozidel s přihlédnutím na co nejnižší spotřebu paliva. Metoda pro vyhlazení trajektorie vozidla, kterou autoři použili, se nazývá „Individual Variable Speed Limits with Location Optimization“ a dokáže dynamicky nastavit rychlostní limity pro vybraná vozidla. Metoda předpokládá, že světelná signalizace funguje s pevně danými intervaly. Ilustrace toho, jak systém funguje, je zobrazena na Obr. 3.

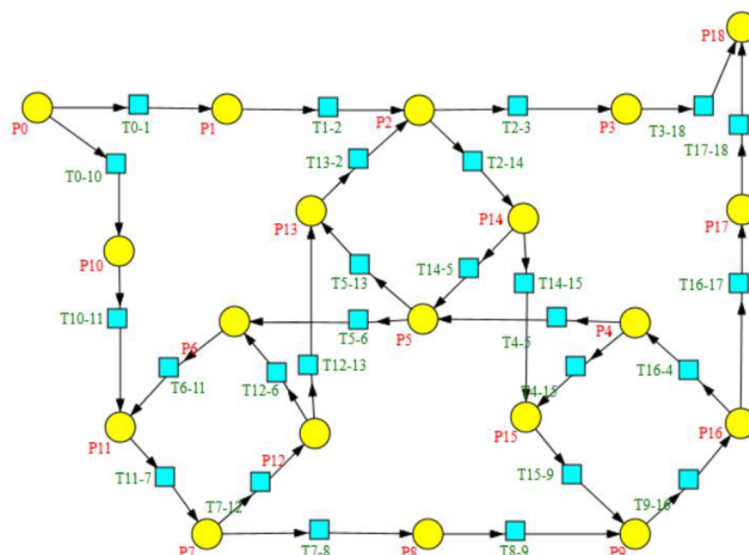


Obr. 3: Schéma fungování systému pro optimalizaci trajektorie vozidel při průjezdu světelnou křižovatkou [16].

#### 4.9 Optimalizace a určení tras genetickými algoritmy při použití modelu toku dopravy založené na Petriho sítích [17]

Studie prezentuje algoritmus pro optimalizaci městského dopravního toku, který počítá trasy vozidel a časy signálních světél v reálném čase. Pro optimalizace je použit genetický algoritmus, jehož fitness funkce se skládá z modelu vysokoúrovňových Petriho sítí toku městské dopravy (Obr. 4), jehož simulační výsledky poskytují hodnoty vhodné pro fitness funkci. Výstupem této práce je optimalizace dopravního toku nepřetržitým navrhováním nejlepší možné cesty pro každé vozidlo a definici nejvhodnějšího načasování semaforů. Podle testů nepřetržitá optimalizace časování semaforů a tras vozidel snižuje celkový čas cesty v porovnání s optimalizací zohledňující pouze trasy vozidel.





Obr. 4: Model městského provozu založeno [17]

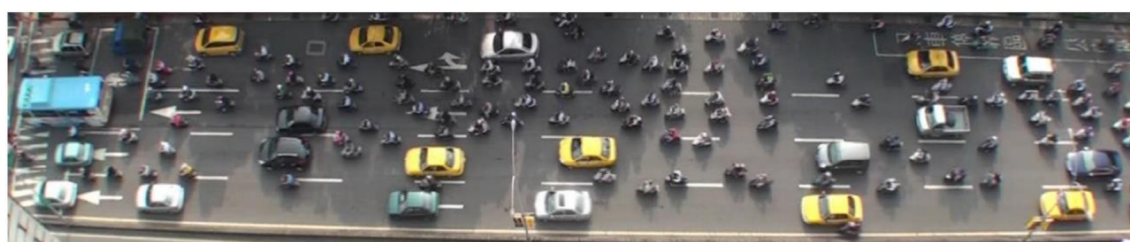
#### 4.10 Globální optimalizační přístup pro řešení synchronizačního problému [18]

Technika synchronizace dopravních signálů přizpůsobuje časy zelených signálů pro sérii křižovatek, aby byl umožněn volný průjezd maximálního počtu vozidel a tím i snížení dob zpoždění. Kriteriační funkcí použitou v této studii je vážený součet zpoždění, která byla zaviněna řízenými křižovatkami. Ve studii [18] byla aplikována metodologie zobecněného „surrogate problem“ (náhradního problému), který je založen na on-line řídicím schématu, které transformuje problém na „surrogate“ kontinuální optimalizační problém a pokračuje k řešení použitím standardního gradientního přístupu a zároveň aktualizuje oba surrogate stavy systému.

Přístup „surrogate problem“ byl rozšířen pro třídu stochastických problémů diskrétní optimalizace, aby bylo umožněno řešení problému se synchronizací dopravních signálů a minimalizovat tak celkové zpoždění. Numerické experimenty prováděné na základě testu a reálných studií ukazují, že náhradní metoda konverguje na velmi malé oblasti. Metoda byla testována na testovacích sítích s různými parametry a porovnána s různými přístupy na reálných sítích. Výsledky dokládají, že pro tento typ problému je nejlepšími výsledky dosaženo pomocí „Surrogate Method in Sequence“.

#### 4.11 Optimalizace světelného řízení pro magistrály s velkým počtem jednostopých vozidel [19, 20]

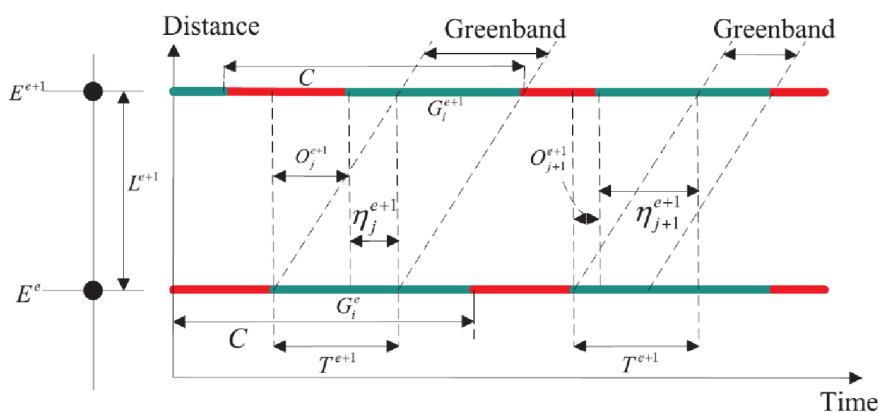
Velká popularita jednostopých vozidel ve městských oblastech a jejich specifické jízdní vlastnosti vyžadují speciální formu modelů křižovatek. Typická situace u křižovatky s velkým počtem jednostopých vozidel je zobrazena na Obrázku 5. Takovýto model křižovatky byl prezentován v [19]. Optimalizace obdobného modelu křižovatky s velkým počtem jednostopých vozidel byla popsána v [20]. Jako jedno z optimalizačních kritérií byla zvolena bezpečnost světelného řízení, která byla vyjádřena pravděpodobnostním modelem pro kolize a jejich závažnost. Výsledná vícekritériální nelineární optimalizační úloha byla vyřešena pomocí vícekritériální varianty GA.



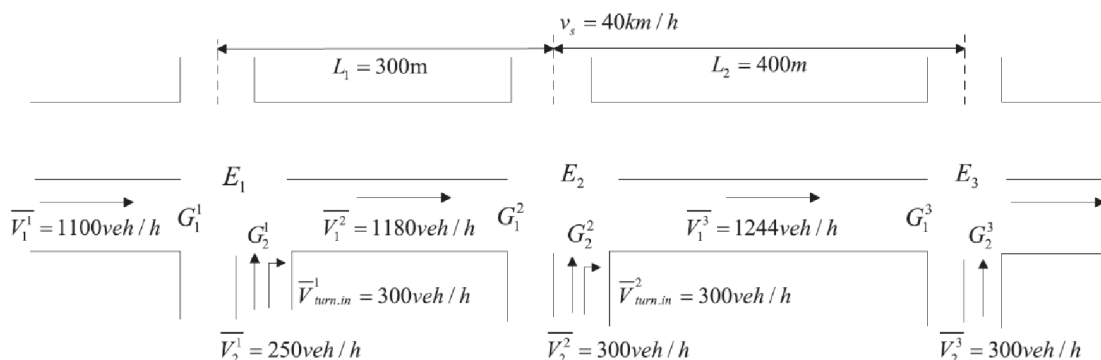
Obr. 5: Typická magistrála s velkým počtem jednostopých vozidel [19].

#### 4.12 Adaptivní koordinované světelné řízení [21]

Článek [21] popisuje adaptivní metodu pro světelné řízení koordinovaných křižovatek v situaci s neurčitou hustotou silničního provozu. Diagram signálů pro dvě koordinované křižovatky je zobrazen na obrázku 6 a schéma pro více koordinovaných křižovatek na obrázku 7. Výsledný model byl formulován jako dvojstupňová stochastická optimalizační úloha s kritériální funkcí, která vyjadřuje střední hodnotu zpoždění vozidel v systému. Modifikovaná gradientní metoda byla použita pro nalezení řešení.



Obr. 6: Časoprostorový diagram dvou koordinovaných křižovatek [21].



Obr. 7: Schéma několika koordinovaných křižovatek [21].

#### 4.13 Adaptivní světelné řízení pro případy narušení provozu [22]

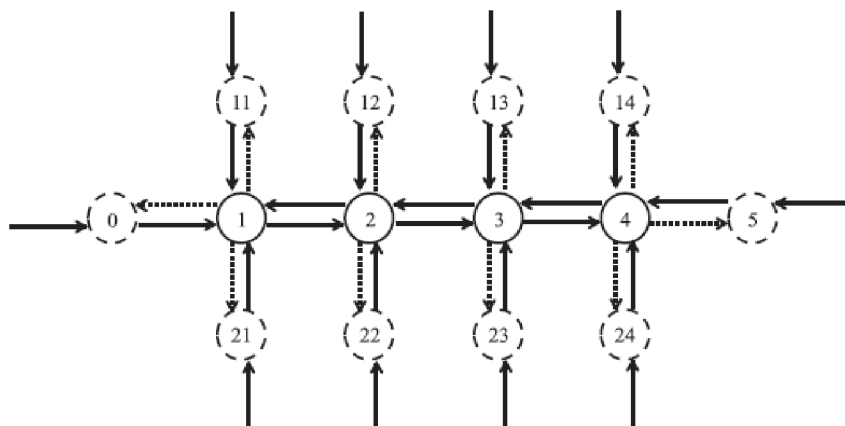
Ve článku [22] se autoři zaměřili na real-time světelné řízení v případě různých narušení provozu (zácpy, havárie, vběhnutí chodců do provozu, apod.). Pro tento účel zvolili tzv. „continuous state actor-critic algorithm“, což je jeden z algoritmů zpětnovazebního učení („Reinforcement learning“). Jimi zvolená metoda je poté porovnána s dalšími metodami (pevné časy, Q-učení, Bayesovské Q-učení) na sadě simulací, z nichž vychází jako nejlepší pro daný typ problému.

#### 4.14 Signalizace na dopravních tepnách zohledňující zpoždění jednotlivých osob [23]

Tato studie prezentuje systém řízení signálu v reálném čase, který optimalizuje nastavení signalizace založené na minimalizaci zpoždění jednotlivých účastníků provozu na dopravních tepnách. Základní model systému má tvar úlohy celočíselného programování a minimalizuje zpoždění účastníků provozu s ohledem na obsazenost vozidel pasažéry.

Tímto přístupem lze poskytnout prioritu vozidlům s větší kapacitou efektivním způsobem i když cestují v konfliktních proudech. Dále připouští důležitost dodržování harmonogramu pro spolehlivou přepravu a zohledňuje jej přidělením dalšího váhového faktoru pro zpoždění dopravy. Současně systém udržuje automatický postup vozidel zavedením příslušných zpoždění souvisejících s narušením skupin vozidel.

Kromě skutečnosti, že k získání vstupů pro optimalizaci využívá metoda dostupné technologie, aplikovatelnost systému v reálných podmínkách je zvýšena krátkým výpočetním časem. Navrhovaný systém řízení je testován na čtyřnásobné křižovatce San Pablo Avenue v Californii (Obr. 8). Výsledky ukazují schopnost systému překonat efektivitu optimálních signálních systémů s pevným nastavením, a to snížením celkového zpoždění jednotlivých osob. Úspěch byl také demonstrován snížením zpoždění osob cestujících v autobusech upřednostněním vozidel s větší kapacitou osob v případech kolizních proudů.



Obr. 8: Zobrazení řešené dopravní tepny [23]

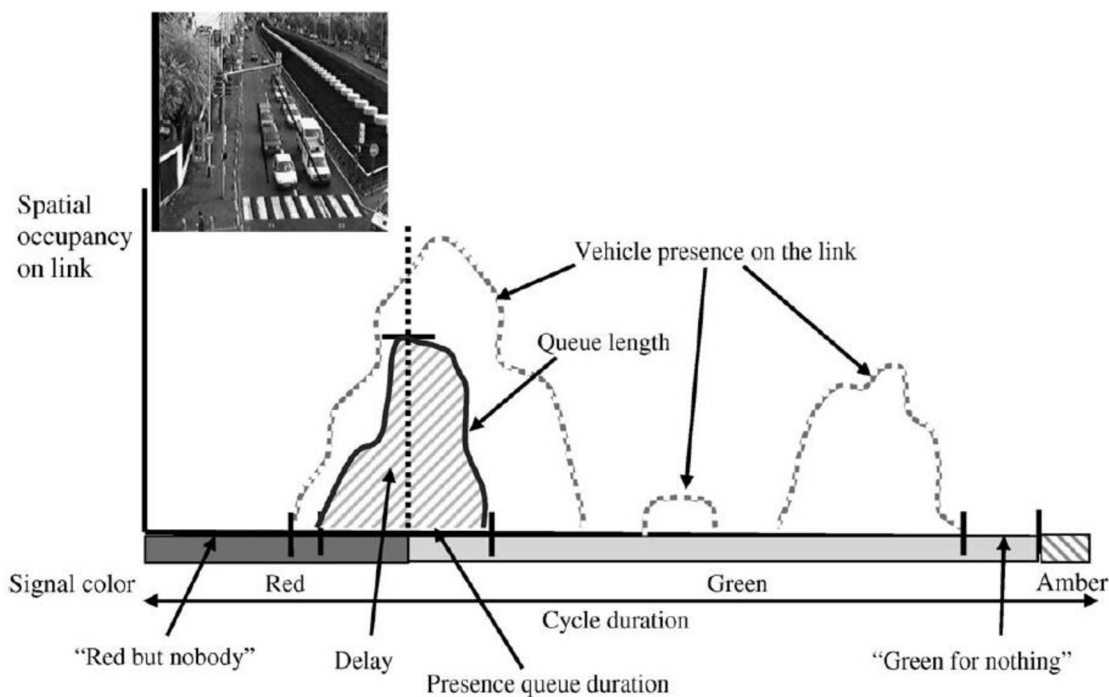
#### 4.15 Metoda aproximativního dynamického programování („approximate dynamic programming“) [24]

Tato studie se věnuje možnosti použití metody aproximativního dynamického programování (ADP) pro řídicí jednotky světelných křižovatek v reálném čase. Řídicí jednotka se zaměřuje na tři cíle: dynamickou alokaci času zelené, automatické přizpůsobení řídicích parametrů a rychlou revizi signálního plánu. Metoda ADP podstatně snižuje výpočetní zátěž pomocí aproximace účelové funkce. Autoři zkoumají „temporal-difference learning“ a „perturbation learning“ jako učební techniky pro ADP. Simulací bylo zjištěno, že řídicí jednotky s ADP dosahují podstatného snížení zpoždění vozidla ve srovnání s pevnými signálními plány. Podstatného zvýhodnění může být dosaženo zvýšením frekvence vyhodnocování signálního plánu, což může být jednoduše dosaženo při použití ADP.

#### 4.16 Řízení v reálném čase systémem CRONOS [25]

Článek se věnuje hodnocení algoritmu CRONOS porovnáním s lokální a centralizovanou strategií pro řízení. CRONOS byl vyvinut v 90. letech. Jedná se o vysoce adaptivní izolovaný řídicí systém s proměnným cyklem a fázemi řízenými „real-time“. Pro vyhodnocení byly studovány opakující se dopravní situace (např. dopravní špička, nízká doprava) a jejich dopad na dopravu z pohledu plynulosti použitím různých kritérií. Také bylo zkoumáno obvyklé chování systému CRONOS s různými parametry dopravy. Většina zkoumaných parametrů je zobrazena na Obr. 9. Některá kritéria jsou inovativní díky přesným datům z pořízených videozáznamů.

Proměnné prezentované v článku [25] demonstrují možnost popisu obvyklého chování systému CRONOS v různých dopravních skupinách i přes jeho „black box“ charakter.



Obr. 9: Vizuální reprezentace proměnných během jednoho cyklu [25]

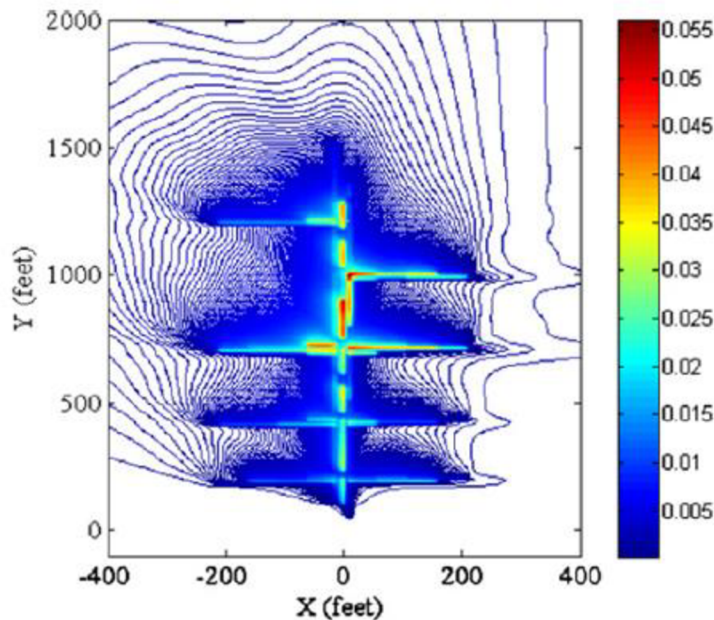
#### 4.17 Model adaptivního řízení [26]

Autoři se zabývají návrhem řídicího modelu pro síť křižovatek se světelnou signalizací za použití diskrétního stacionárního Markova rozhodovacího procesu. V modelu jsou začleněny pravděpodobnosti předpovědi aktivace indukčních smyček jednotlivými vozidly na navazujícím segmentu pozemní komunikace. Model byl následně testován na typické křižové izolované křižovatce i na jednoduché síti, která se skládá z pěti křižových křižovatek a porovnán s „fully-actuated“ řízením. Fully-actuated představuje řízení, kdy je monitorována aktivita na každém proudu vstupujícím do křižovatky. Analýza simulací indikuje větší efektivitu oproti „fully-actuated“ řízením, a to především při zvýšeném provozu. Upozorňují na: Při řešení rozsáhlých modelů by byl model výpočetně velmi náročný, což představuje limitaci řízení v reálném čase.

#### 4.18 Robustní optimalizace signálního plánu s ohledem na životní prostředí [27]

V článku je formulován vícekriteriální model optimalizace pro stanovení koordinovaných signálních plánů na magistrále pro snížení dopravního zpoždění a snížení rizik spojených s působením výfukových plynů na lidský organismus. Na základě reprezentace dopravy metodou „cell-transmission“ je použit přístup pro odhad míry výfukových plynů pro každou buňku magistrály. K zachycení disperze znečištění ovzduší a výpočet koncentrace znečištění byl použit Gaussův buněčný model pro rozptyl vzduchu. Proto byla definována průměrná míra nadměrné expozice tak, aby představovala riziko spojené s vystavením

člověka výfukovým plynům při nejistém pohybu větru (grafické znázornění šíření emisí v okolí magistrály je zobrazeno na Obr. 10). Optimalizační model byl formulován tak, aby se optimalizovala délka cyklu, offsety, doby zelené, fázové sekvence a míra nadměrné expozice zároveň. Vícekriteriální optimalizační model je řešený pomocí simulačního GA pro nalezení optimálních Pareto řešení.



Obr. 10: Grafické znázornění šíření emisí [27]

#### 4.19 Decentralizované signální řízení pro sítě městské dopravy [28]

Autoři článku [28] navrhuji podmínky decentralizovaného řízení dopravních signálů v městské dopravní síti. Metoda řízení je adaptací takzvaného „BackPressure routing“ algoritmu, který byl široce uznáván jako způsob řízení optimální propustnosti. Simulací porovnali navržený postup s dalšími existujícími metodami distribuovaného řízení v různých dopravních situacích a pro různé dopravní sítě. Ze simulace bylo dosaženo závěru, že navrhovaná metoda je dosahuje dobrých výsledků jak z hlediska propustnosti, tak přetížení.

#### 4.20 Adaptivní řízení pro „connected vehicle environment“ [29]

Aktuálně používané metody pro řízení dopravy používají převážně detekci vozidel systémy instalovanými na pozemních komunikacích. Tato detekce může určit pozici vozidla pouze v jednom daném bodě detekce. S pokrokem komunikačních technologií jsou vozidla schopna komunikovat mezi sebou a také s infrastrukturou v nově vznikajícím systému propojených vozidel. Takto nasbíraná data poskytují mnohem detailnější popis stavu provozu a mohou být použita pro řízení světelné signalizace.

V článku [29] je představen algoritmus adaptivního přidělování fází signálu v reálném čase s využitím dat připojených vozidel. Algoritmus optimalizuje sled fází a jejich trvání řešením dvouúrovňové optimalizační úlohy. Uvažují se dvě účelové funkce: minimalizace celkového zpoždění vozidla a minimalizace délky fronty. Z důvodu velkého počtu nepřipojených vozidel je vyvinut algoritmus, který odhaduje stav nepřipojených vozidel na základě připojených, tak aby se vytvořila kompletní tabulka příjezdů pro algoritmus fázového přidělování. Pro ověření algoritmů byla namodelována reálná křižovatka v programu VISSIM, který je uznávaným nástrojem pro simulaci dopravy. Výsledky pro různou míru připojených vozidel byly porovnány s kvalitním plně automatickým systémem řízení dopravy. Ze simulace lze vyvodit závěr, že navrhovaný řídicí algoritmus překonává plně automatické řízení snížením celkového zpoždění až o 16,33% v případě vysoké míry připojených vozidel a podobné míry zpoždění při malém počtu připojených vozidel. Různé účelové funkce mají za následek odlišné chování časování signálu. Při minimalizaci celkového zpoždění vozidla je obvykle dosaženo nižšího zpoždění, zatímco minimalizací délky fronty slouží všem fázím více vyváženým způsobem.





## 5 OPTIMALIZACE DEKOMPOZIČNÍM PŘÍSTUPEM

### 5.1 Zvolený optimalizační model

Optimalizační model a řešení problému vychází z literatury [30, 31]. Tento postup byl navržen prof. Janem Černým, a publikován v roce 1991 [32].

Úloha je formulována pro úrovnovou křižovatku, na kterou přijíždí množina proudů  $I$ . Pro každý proud  $i$  z  $I$  je definována intenzita  $q_i$  v jednotkových vozidlech, minimální doba zelené  $t_i$  a doba potřebná pro vstup jednotkového vozidla do křižovatky v saturovaném proudu  $T_i$ . Pro každý přechod fází obsahující po sobě navazující kolizní proudy je definován mezičas přechodu mezi fázemi  $m$ .

Cílem pak je určit časy začátků a konců dob zelených pro jednotlivé proudy tak, aby se při dané hodnotě minimální poměrné rezervy  $Rez$  minimalizovala délka cyklu  $c$  signálního plánu.

Úloha návrhu signálního plánu je rozdělena do tří kroků. V prvním kroku se proudy  $i \in I$  vstupující do křižovatky uspořádají do maximálních podmnožin vzájemně nekolizních proudů. Následně se vybere minimální počet fází tak aby každý proud byl alespoň jedenkrát obsažen.

Druhým krokem je stanovení optimálního pořadí vybraných fází tak, aby součet mezičasů byl minimální.

Třetím krokem je určení optimálních časů začátků a konců zelených v průběhu cyklu pro všechny proudy úlohou lineárního programování se zvoleným optimalizačním kritériem.

#### Použité vstupní veličiny:

$I$  ... množina proudů

$Z_{min}$ ... minimální doba zelené pro proud  $i$  v rámci cyklu

$T_i$ ... doba potřebná pro vjezd 1 jednotkového vozidla do křižovatky v proudu  $i \in I$

$q_i$ ... hodinová intenzita jednotkových vozidel přijíždějících do křižovatky v proudu  $i \in I$

$m_{ij}$ ... mezičas mezi koncem vstupu kolizního proudu  $i \in I$  a začátkem vstupu kolizního proudu  $j \in J$

$x_i$ ... začátek doby zelené pro proud  $i \in I$

$y_i$ ... konec doby zelené pro proud  $i \in I$

$D_0$  ... množina uspořádaných dvojic kolizních proudů  $[i, j]$  pro fázové přechody uvnitř cyklu, kdy proud  $j$  se v cyklu vyskytuje ve fázi navazující na fázi obsahující proud  $i$

$D_1$ ... množina uspořádaných dvojic kolizních proudů  $[i, j]$  pro fázové přechody mezi cykly, kdy proud  $j$  se na rozhraní cyklů vyskytuje ve fázi navazující na fázi obsahující proud  $i$

Rez... minimální poměrná rezerva mezi nabízenou a průměrně požadovanou délkou zelené pro proud  
 c... délka cyklu

Matematický model řešení úlohy minimalizace délky cyklu:

$$\min f(x, y, c) = c \quad (5.1)$$

Za podmíněk:

$$y_i - x_i \geq z_i \quad \text{pro } i \in I \quad (5.2)$$

$$y_i - x_i \geq \frac{T_i q_i c u}{3900} \quad \text{pro } i \in I \quad (5.3)$$

$$x_j - y_i \geq m_{ij} \quad \text{pro } [i, j] \in D_0 \quad (5.4)$$

$$x_j - y_i \geq m_{ij} - c \quad \text{pro } [i, j] \in D_1 \quad (5.5)$$

$$y_i \leq c \quad \text{pro } i \in I \quad (5.6)$$

$$x_i \geq 0 \quad \text{pro } i \in I \quad (5.7)$$

$$y_i \geq 0 \quad \text{pro } i \in I \quad (5.8)$$

$$c \geq 0 \quad (5.9)$$

Výraz (5.1) reprezentuje účelovou funkci pro úlohu minimalizace délky cyklu. Výraz (5.2) stanovuje podmínky minimální doby zelené pro každý proud. (5.3) Pak zajišťuje, aby nabízená doba zelené neklesla pod hodnotu průměrně požadované doby zelené při zohlednění podmínky minimální poměrné rezervy  $u$ . Skupiny podmínek (5.4) a (5.5) zajišťují dodržení mezičasů. Podmínka (5.6) zajišťuje, že doby zelených jednotlivých proudů skončí nejpozději na konci cyklu. (5.7), (5.8) a (5.9) určují definiční obory proměnných. Výsledný problém je spojitou lineární optimalizační úlohou.

## 5.2 Prostředí CVX

CVX [33] je modelování systém pro konvexní optimalizační úlohy, který byl vyvinut pro programovací jazyk Matlab. CVX dokáže Matlab přeměnit na modelovací jazyk vhodný pro řešení optimalizačních úloh, kde se jednotlivé kriteriální funkce a omezení mohou zadávat pomocí známé Matlab syntaxe. Na příklad, následující konvexní optimalizační problém

$$\begin{aligned} &\text{minimalizovat} \quad \|Ax - b\|_2 \\ &\text{za podmínek} \quad Cx = d, \\ &\quad \quad \quad \|x\|_\infty \leq e, \end{aligned}$$

Ize pomocí CVX v Matlabu zapsat kódem, který je zobrazený na obrázku 11. Tento modelovací systém byl zvolen pro implementaci vybraného optimalizačního modelu.

```

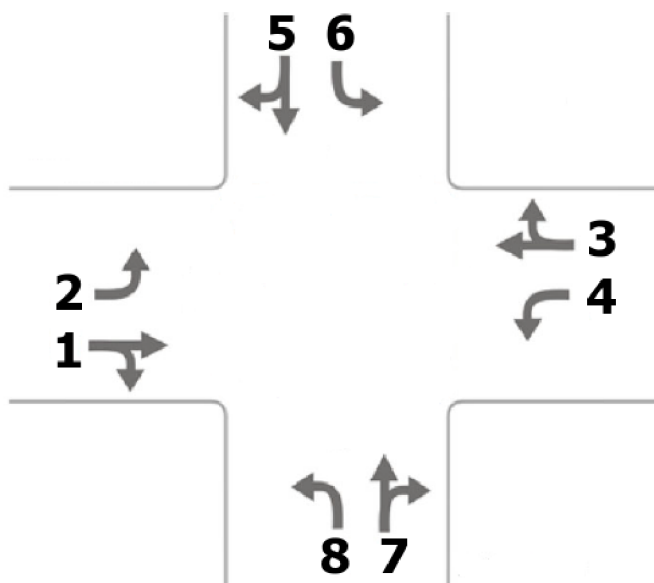
m = 20; n = 10; p = 4;
A = randn(m,n); b = randn(m,1);
C = randn(p,n); d = randn(p,1); e = rand;
cvx_begin
    variable x(n)
    minimize( norm( A * x - b, 2 ) )
    subject to
        C * x == d
        norm( x, Inf ) <= e
cvx_end

```

Obr. 11: Příklad CVX kódu [33]

### 5.3 Parametry křižovatky

Pro výpočet byla vybrána fiktivní křižovatka dle Obr. 12. Křižovatka je tvořena křížením hlavní a vedlejší komunikace. Hlavní směr představují proudy 1, 2, 3, 4 a vedlejší směr pak 5, 6, 7, 8. Parametry potřebné pro výpočet byly voleny v souladu doporučení TP 81 [3].



Obr. 12: Schéma modelované křižovatky

Množina nekolizních proudů udává, které proudy mohou zároveň vstupovat do křižovatky ve stejný okamžik bez toho, aby došlo ke kolizi. Tyto podmnožiny zároveň prezentují množinu všech možných fází.

Podmnožiny nekolizních proudů: [1,2], [1,3], [2,4], [3,4], [5,6], [5,7], [6,8], [7,8]

Z množin nekolizních proudů byl vybrán minimální počet fází, které obsahují všechny proudy.

Byly zvoleny fáze: [1,3], [2,4], [5,7], [6,8]

Množiny uspořádaných dvojic kolizních proudů pak jsou:

$$D_0 = [1,4; 3,2; 2,5; 2,7; 4,5; 4,7; 5,8; 7,6]$$

$$D_1 = [6,1; 8,1; 6,3; 8,3]$$

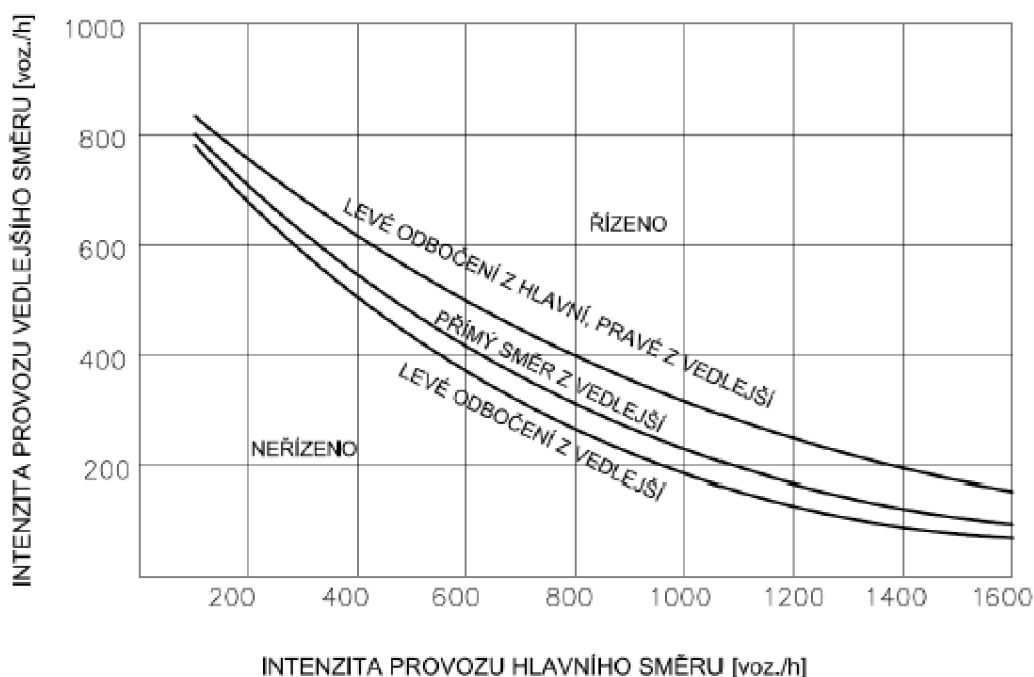
Mezičas je časový interval od konce signálu volno po začátek signálu volno dvou kolizních proudů. Mezičas byl zvolen konstantní pro všechny fáze.

$$m = 5 \text{ s}$$

Byly zvoleny doby potřebné pro vstup jednotkového vozidla do křižovatky v daném proudu.

$$T = [2, 2, 3, 3, 6, 6, 2, 2] \text{ s}$$

Intenzita provozu určuje počet vozidel, který v daném proudu vstupuje během daného časového úseku. Intenzita v proudech světelně řízené křižovatky se pohybuje v rozmezí 200 až 1600  $\text{voz} \cdot \text{h}^{-1}$  v hlavním směru a závisle na něm 200 až 1000  $\text{voz} \cdot \text{h}^{-1}$  ve směru vedlejším. Kritérium intenzity provozu pro zavádění SZZ je zobrazeno na Obr. XX.



Obr. 13: Kritérium intenzity provozu pro zavádění SZZ [3]

Intenzita provozu v daných pruzích pak byla zvolena:

$$q = [1000, 500, 1000, 500, 600, 400, 600, 400] \text{ voz} \cdot \text{h}^{-1}$$

Pro stanovení hodnot  $z_{min}$  minimálních dob zelené je potřeba nejdříve provést výpočet stupně saturace  $p_i$ , který je možné vypočítat ze saturovaného toku  $S_v$ . Dále stanovit hodnotu optimálního a reálného cyklu křižovatky a minimální poměrnou rezervu  $Rez$ .

### 5.3.1 Saturovaný tok

Saturovaný tok je definován jako maximální počet vozidel, která mohou projet profilem stop čáry za jednotku času při ideálních dopravních podmínkách. Hodnoty saturovaného toku řadičích pruhů se pak určí podle vztahu:

$$S_i = S_g \cdot k_{skl} \cdot k_{obl} \quad (5.10)$$

Kde je  $S_i$  saturovaný tok řadičích pruhů [ $voz \cdot h^{-1}$ ]  
 $S_g$  základní saturovaný tok = 2000 [ $voz \cdot h^{-1}$ ]  
 $k_{skl}$  koeficient podélného sklonu [-]  
 $k_{obl}$  koeficient oblouku [-]

Koeficient sklonu vyjadřuje vliv podélného sklonu. V této úloze je nemá sklon žádný vliv.

$$k_{skl} = 1 \quad (5.11)$$

Koeficient oblouku vyjadřuje vliv poloměru směrového oblouku při odbočování a podílu odbočujících vozidel.

$$k_{obl} = \frac{R_{obl}}{R_{obl} + 1,5 \cdot f} \quad (5.12)$$

Kde je  $k_{obl}$  koeficient oblouku [-]  
 $R_{obl}$  poloměr oblouku pro odbočení [m]  
 $f$  podíl vozidel odbočujících z jízdního pruhu [-]

Pro pruhů se společným řazením přímého směru a odbočení vpravo platí:

$$k_{obl1} = \frac{5}{5 + 1,5 \cdot 0,25} \doteq 0,93 \quad (5.13)$$

$$S_1 = 2000 \cdot 0,93 \doteq 1860,47 \text{ voz} \cdot h^{-1} \quad (5.14)$$

Pro pruhů s levým odbočením platí:

$$k_{obl2} = \frac{7}{7 + 1,5 \cdot 1} \doteq 0,82 \quad (5.15)$$

$$S_2 = 2000 \cdot 0,82 \doteq 1647,16 \text{ voz} \cdot h^{-1} \quad (5.16)$$

Hodnota saturovaného toku se potom určí jako součet saturovaných toků řadičích pruhů:

$$S_V = \sum S_i = 4 \cdot S_1 + 4 \cdot S_2 = 14030,10 \text{ voz} \cdot h^{-1} \quad (5.17)$$

Pro každý proud se určí stupeň saturace  $p_i$ . Pro každou fázi se pak vybere vjezd s nejvyšším stupněm saturace a ten je označen jako kritický vjezd ve fázi. Součet stupňů saturace kritických vjezdů pak udává celkový stupeň saturace  $P$ .

$$p_i = \frac{q_i}{S_V} \quad (5.18)$$

$$P = \sum p_{krit} = 0,071 + 0,071 + 0,043 + 0,043 \doteq 0,29 \quad (5.19)$$

### 5.3.2 Hodnoty minimální doby signálu volno a výsledek optimalizačního modelu

Pro určení minimálních hodnot signálů volno pro každý proud je třeba prvně stanovit součet ztrátových časů  $L$ , délku optimálního  $t_{Copt}$  a reálného  $t_C$  cyklu a minimální poměrnou rezervu  $Rez$ .

Minimální poměrná rezerva  $Rez$  se volí podle pravidla:

$$0 \leq Rez \leq (1 - Z) \cdot 100 [\%] \quad (5.20)$$

$$0 \leq Rez \leq (1 - 0,29) \cdot 100$$

Na koordinovaných vjezdech se doporučuje  $Rez$  v rozmezí 15% až 20%, na ostatních nekoordinovaných vjezdech nejméně 10%. Pro úlohu byla zvolena hodnota:

$$Rez = 20\%$$

Ztrátový čas  $L$  se určuje jako součet mezičasů každé fáze.

$$L = \sum m = 4 \cdot 5 = 20 \text{ s} \quad (5.21)$$

Délka optimálního cyklu  $t_{Copt}$  slouží jako základ pro návrh reálného cyklu  $t_C$  na izolované křižovatce. Je závislý na mezičasech a intenzitách provozu.

$$t_{Copt} = \frac{1,5 \cdot L}{1 - Z} = \frac{1,5 \cdot 20}{1 - 0,29} \doteq 38,86 \text{ s} \quad (5.22)$$

Reálný cyklus se pak navrhuje v rozmezí:

$$0,75 \cdot t_{Copt} \leq t_C \leq 1,5 \cdot t_{Copt} [\text{s}] \quad (5.23)$$

$$29,15 \leq t_C \leq 58,30$$

Reálný cyklus pro danou úlohu byl stanoven:

$$t_C = 50 \text{ s}$$

Návrh minimální doby zelené  $z_{min}$  se určuje podle vztahu:

$$z_{min} = \frac{q \cdot t_C}{S} \cdot \frac{100}{100 - Rez} [\text{s}] \quad (5.24)$$

Vypočtené  $z_{min}$  se zaokrouhlují na celé sekundy vždy nahoru.

$$z_{min} = [34, 19, 34, 19, 21, 16, 21, 16] \text{ s}$$

Výsledné parametry byly zadaný do optimalizačního modelu (5.1) – (5.9) a problém byl řešen v programu Matlab s užitím doplňku CVX řešitelem SDPT3 4.0. Kód scriptu se nachází na konci práce v kapitole Přílohy. Řešitel SDPT3 vyřešil úlohu minimalizace v 11 iteracích s celkovým výpočetním časem 0,5 s. Bylo dosaženo výsledku délky cyklu  $c = 111,25 \text{ s}$ , který se blíží k horní hranici doporučené délky cyklu 120 s pro pevně dané řízení [1]. Výpočtem byly stanoveny začátky  $x$  a konce  $y$  zeleného signálu, které by byly dále použity pro řízení světelné signalizace na křižovatce.

$$x = [2.8878, 41.8878, 2.8878, 41.8878, 65.8878, 92.6377, 66.2173, 93.1378] \text{ s}$$

$$y = [36.8878, 60.8878, 36.8878, 60.8878, 88.1378, 108.7995, 87.4754, 109.1378] \text{ s}$$

## 6 ZÁVĚR

V první části je představen postup používaný při návrhu řízení signalizace. Třetí kapitola je věnována pojednání o základních optimalizačních modelech a přístupech pro jejich řešení.

V kapitole 4 byla provedena rešerše metod používaných pro optimalizaci světelného řízení izolovaných křižovatek a soustav křižovatek v dopravních sítích. Pro optimalizaci se často s výhodou používá vícekritériálních optimalizačních modelů. Hlavním cílem zmíněných metod bývá minimalizace času potřebného pro průjezd křižovatkou s určitou bezpečností v kombinaci s dalšími cíli jako jsou například snížení emisí a spotřeba paliva. Často používanými optimalizačními metodami s dobrými výsledky jsou genetické algoritmy. V posledních letech bylo několik studií věnováno také optimalizaci s použitím komunikace řídicího systému s vozidly.

V poslední části je řešena úloha návrhu parametrů světelného řízení fiktivní křižovatky. V úloze byly nejprve stanoveny potřebné parametry pro výpočet podle českých norem. Následně byla úloha řešena metodou lineárního programování v programu Matlab. Výsledky dosažené optimalizací jsou podle českých technických norem hodnoceny jako použitelné, i když ne ideální, pro nasazení na pozemních komunikacích.





## 7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] WEBSTER, F. V. *Traffic Signal Settings. Road research technical paper*. Londýn: H.M.S.O., 1958, (39).
- [2] ROBERTSON, D. I. *Transyt: a traffic network study tool*. Crowthorne: Ministry of transport, 1969.
- [3] *TECHNICKÉ PODMÍNKY – TP 81 Navrhování světelných signalizačních zařízení pro řízení provozu na pozemních komunikacích*. ČDS ČR, 3. vydání, 2015. Dostupné z: [http://www.pjpk.cz/data/USR\\_001\\_2\\_8\\_TP/TP\\_81.pdf](http://www.pjpk.cz/data/USR_001_2_8_TP/TP_81.pdf)
- [4] *TECHNICKÉ PODMÍNKY – TP 188 Posuzování kapacity křižovatek a úseků pozemních komunikací*. ČDS ČR, 1. vydání, 2018. Dostupné z: [http://www.pjpk.cz/data/USR\\_001\\_2\\_8\\_TP/TP\\_188\\_2018.pdf](http://www.pjpk.cz/data/USR_001_2_8_TP/TP_188_2018.pdf)
- [5] KLAPKA, J.; DVOŘÁK, J.; POPELA, P.: *Metody operačního výzkumu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2001.
- [6] KLAPKA, J.; DVOŘÁK, J.: *Úvod do operační a systémové analýzy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2002.
- [7] RARDIN, R.: *Optimization in Operations Research*. Druhé vydání, London: Pearson, 2016.
- [8] NOCEDAL, J.; WRIGHT, S.: *Numerical Optimization*. Druhé vydání, Berlin: Springer Science & Business Media, 2006.
- [9] LI, Xiang a Jian-Qiao SUN. Turning-lane and signal optimization at intersections with multiple objectives. *Engineering Optimization*. 2019, **51**(3), 484-502. ISSN 0305-215X. Dostupné z: doi:10.1080/0305215X.2018.1472250.
- [10] EOM, Myungeun a Byung-In KIM. The traffic signal control problem for intersections: a review. *European Transport Research Review*. 2020, **12**(1). ISSN 1867-0717. Dostupné z: doi:10.1186/s12544-020-00440-8
- [11] ERISKIN, Ekinhan, Sebnem KARAHANCER, Serdal TERZI a Mehmet SALTAN. Optimization of Traffic Signal Timing at Oversaturated Intersections Using Elimination Pairing System. *Procedia Engineering*. 2017, **187**, 295-300. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2017.04.378
- [12] ZHOU, Zhanhong a Ming CAI. Intersection signal control multi-objective optimization based on genetic algorithm. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2014, **1**(2), 153-158. ISSN 20957564. Dostupné z: doi:10.1016/S2095-7564(15)30100-8
- [13] WIJAYA, I Gede Pasek Suta, Keeichi UCHIMURA a Gou KOUTAKI. Traffic Light Signal Parameters Optimization using Modification of Multi-element Genetic Algorithm. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2018, **8**(1), 246-253. ISSN 2088-8708. Dostupné z: doi:10.11591/ijece.v8i1.pp246-253
- [14] JAMAL, Arshad, Muhammad TAUHIDUR RAHMAN, Hassan M. AL-AHMADI, Irfan ULLAH a Muhammad ZAHID. Intelligent Intersection Control for Delay Optimization: Using Meta-Heuristic Search Algorithms. *Sustainability*. 2020, **12**(5). ISSN 2071-1050. Dostupné z: doi:10.3390/su12051896
- [15] CHIOU, Yu-Chiun a Yen-Fei HUANG. Genetic fuzzy logic traffic signal control with cell transmission modeling. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*. 2013, **37**(4), 446-460. ISSN 0253-3839. Dostupné z: doi:10.1080/02533839.2013.814995

- [16] YAO, Handong, Jianxun CUI, Xiaopeng LI, Yu WANG a Shi AN. A trajectory smoothing method at signalized intersection based on individualized variable speed limits with location optimization. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2018, **62**, 456-473. ISSN 13619209. Dostupné z: doi:10.1016/j.trd.2018.03.010
- [17] DEZANI, Henrique, Norian MARRANGHELLO a Furio DAMIANI. Genetic algorithm-based traffic lights timing optimization and routes definition using Petri net model of urban traffic flow. *IFAC Proceedings Volumes*. 2014, **47**(3), 11326-11331. ISSN 14746670. Dostupné z: doi:10.3182/20140824-6-ZA-1003.01321
- [18] ADACHER, L. A Global Optimization Approach to Solve the Traffic Signal Synchronization Problem. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2012, **54**, 1270-1277. ISSN 18770428. Dostupné z: doi:10.1016/j.sbspro.2012.09.841
- [19] LAN, Chien-Lun a Gang-Len CHANG. Optimizing signals for arterials experiencing heavy mixed scooter-vehicle flows. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2016, **72**, 182-201. ISSN 0968090X. Dostupné z: doi:10.1016/j.trc.2016.09.011
- [20] WANG, Fen, Keshuang TANG, Keping LI, Zhigang LIU a Lin ZHU. A Group-Based Signal Timing Optimization Model Considering Safety for Signalized Intersections with Mixed Traffic Flows. *Journal of Advanced Transportation*. 2019, **2019**, 1-13. ISSN 0197-6729. Dostupné z: doi:10.1155/2019/2747569
- [21] LI, Lubing, Wei HUANG a Hong K. LO. Adaptive coordinated traffic control for stochastic demand. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2018, **88**, 31-51. ISSN 0968090X. Dostupné z: doi:10.1016/j.trc.2018.01.007
- [22] ASLANI, Mohammad, Mohammad Saadi MESGARI a Marco WIERING. Adaptive traffic signal control with actor-critic methods in a real-world traffic network with different traffic disruption events. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2017, **85**, 732-752. ISSN 0968090X. Dostupné z: doi:10.1016/j.trc.2017.09.020
- [23] CHRISTOFA, Eleni, Konstantinos AMPOUNTOLAS a Alexander SKABARDONIS. Arterial traffic signal optimization: A person-based approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2016, **66**(3), 27-47. ISSN 0968090X. Dostupné z: doi:10.1016/j.trc.2015.11.009
- [24] CAI, Chen, Chi Kwong WONG a Benjamin G. HEYDECKER. Adaptive traffic signal control using approximate dynamic programming: A person-based approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2009, **17**(5), 456-474. ISSN 0968090X. Dostupné z: doi:10.1016/j.trc.2009.04.005
- [25] BOILLOT, Florence, Sophie MIDENET a Jean-Claude PIERRELÉE. The real-time urban traffic control system CRONOS: Algorithm and experiments. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2006, **14**(1), 18-38. ISSN 0968090X. Dostupné z: doi:10.1016/j.trc.2006.05.001
- [26] YU, X.-H., W.W. RECKER a Jean-Claude PIERRELÉE. Stochastic adaptive control model for traffic signal systems: Algorithm and experiments. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2006, **14**(4), 263-282. ISSN 0968090X. Dostupné z: doi:10.1016/j.trc.2006.08.002
- [27] ZHANG, Lihui, Yafeng YIN a Shigang CHEN. Robust signal timing optimization with environmental concerns: Algorithm and experiments. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2013, **29**(4), 55-71. ISSN 0968090X. Dostupné z: doi:10.1016/j.trc.2013.01.003
- [28] LE, Tung, Péter KOVÁCS, Neil WALTON, Hai L. VU, Lachlan L.H. ANDREW a Serge S.P. HOOGENDOORN. Decentralized signal control for urban road networks: Algorithm

- and experiments. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2015, **58**(4), 431-450. ISSN 0968090X. Dostupné z: doi:10.1016/j.trc.2014.11.009
- [29] FENG, Yiheng, K. Larry HEAD, Shayan KHOSHMAHAM, Mehdi ZAMANIPOUR, Lachlan L.H. ANDREW a Serge S.P. HOOGENDOORN. A real-time adaptive signal control in a connected vehicle environment: Algorithm and experiments. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2015, **55**(4), 460-473. ISSN 0968090X. Dostupné z: doi:10.1016/j.trc.2015.01.007
- [30] Návrh signálního plánu světelně řízené křižovatky. TEICHMANN, Dušan. *Optimalizace technologických procesů* [online]. 2. dopl. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava/Univerzita Pardubice, 2017, s. 114-120 [cit. 2021-5-20]. ISBN 978-80-248-3269-2. Dostupné z: [https://issuu.com/michdor/docs/m14\\_text/114](https://issuu.com/michdor/docs/m14_text/114)
- [31] KREJČÍ, L. Zkušenosti s navrhováním signálních plánů křižovatek metodami lineárního programování v podmínkách složitých křižovatek. *Perner's Contacts*, 2011 **6**(3), 168-178. Dostupné z <https://pernerscontacts.upce.cz/index.php/perner/article/view/862>
- [32] ČERNÝ, Jan; KLUVÁNEK, Pavol. *Základy matematickej teórie dopravy*. Bratislava: Veda, 1991, 1. vydání, 280 s. ISBN 80-224-0099-8.
- [33] CVX Research: *CVX: Matlab Software for Disciplined Convex Programming*. [online], [cit. 2021-05-20], Dostupné z: <http://web.cvxr.com/cvx/doc>.



# PŘÍLOHY

## Příloha 1. skript v jazyku Matlab

```
%% Deklarace parametrů
T = [2;2;3;3;6;6;2;2];
t = [34;19;34;19;21;16;21;16];
q = [1000;500;1000;500;600;400;600;400];
u = 0.2;
m = 5;

D0 = [1,4; 3,2;
      2,5; 2,7;
      4,5; 4,7;
      5,8; 7,6];
D1 = [6,1; 8,1;
      6,3; 8,3];

%% Řešení úlohy minimalizace
cvx_begin

    variable x(8) nonnegative
    variable y(8) nonnegative
    variable c nonnegative

    minimize(c)

    subject to
        y - x >= t
        y - x >= T.*q*c*u/3600

        x(D0(:,2)) - y(D0(:,1)) >= m
        x(D1(:,2)) - y(D1(:,1)) >= m - c

        y <= c

cvx_end
```