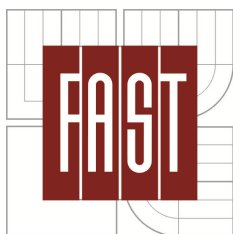


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

OPTIMALIZACE DOPRAVNÍ SÍTĚ TRANSPORT NETWORK OPTIMIZATION

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE
ANOTATION OF Ph.D. THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. MARTIN VŠETEČKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. PETR HOLCNER, Ph.D.

BRNO 2015

ABSTRAKT

Práce se zabývá návrhem optimalizačního algoritmu využívajícího genetický algoritmus. Optimalizační úloha je předvedena na problematice levého odbočení, které splňuje předpoklady pro systematickou optimalizaci - komplexnost problému, který nejde řešit analyticky, a zároveň možnost použití šablon, které umožní automatizaci návrhu a výpočtu všech variant.

KLÍČOVÁ SLOVA

Dopravní síť, Dopravní model, Optimalizace, Levá odbočení, Genetický algoritmus

ABSTRACT

The thesis proposes an optimization algorithm used a genetic algorithm. Optimization problem is demonstrated on issues of left turn which meets the requirements for systematic optimization - complexity of the problem, which can not be solved analytically, and the possibility of using templates, which enable automation of design and calculation of all variants.

KEYWORDS

Transport Network, Transport Model, Optimization, Left Turnes, Genetic Algortihm

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

Ústav pozemních komunikací a Knihovnické a informační centrum FAST VUT v Brně

LOCATION OF THESIS STORAGE

Institute of Road Structures; Faculty Library and Information Centre

OBSAH

1 ÚVOD	4
1.1 Motivace.....	4
1.2 Cíle práce	5
2 DOPRAVNÍ SÍŤ	6
2.1 Mrtvá dopravní síť	6
2.1.1 Komplexnost a uspořádání mrtvé dopravní sítě.....	6
2.1.2 Hierarchizace mrtvé dopravní sítě	7
2.2 Živá dopravní síť	8
3 OPTIMÁLNÍ DOPRAVNÍ SÍŤ	8
4 DOPRAVNĚ-INŽENÝRSKÉ VÝPOČTY	8
4.1 Matematické modelování dopravy	9
4.1.1 Strategické modely dopravní sítě	9
5 SYSTEMATICKÁ OPTIMALIZACE.....	11
5.1 Pokusná versus systematická optimalizace.....	12
5.2 Heuristika	12
5.3 Genetický algoritmus	12
5.3.1 Princip optimalizace.....	13
6 HLEDÁNÍ VHODNÉ ÚLOHY PRO OPTIMALIZACI.....	14
6.1 Zákaz levého odbočení.....	15
6.1.1 Rozsah úlohy levého odbočení	16
7 NAVRŽENÝ OPTIMALIZAČNÍ ALGORITMUS.....	18
7.1 Vytvoření sítě.....	19
7.2 Postupné přidělování dopravní zatížení	20
7.3 Křižovatky.....	21
7.3.1 Návrh signálního plánu	21
7.3.2 Výpočet kapacity a doby zdržení	24
7.4 Optimalizace – genetický algoritmus.....	25
7.5 Výsledek optimalizačního algoritmu	26
8 ZÁVĚR A DOPORUČENÍ.....	27
8.1 Postřehy z řešení úlohy	28
8.2 Praktické využití	30
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	31
ŽIVOTOPIS	35

1 ÚVOD

Cílem disertační práce bylo ověřit použitelnost vhodného optimalizačního algoritmu pro nalezení takových parametrů dopravní sítě, kdy bude dosahována nejlepší kvalita dopravy.

Dopravní síť je velmi široký pojem, neboť doprava je realizována po pozemních komunikacích, dráhách, vodních cestách, v leteckých koridorech, v produktovodech či dopravnících. S ohledem na odborné zaměření ústavu, kde byla disertační práce vypracována, se práce více soustředí na síť pozemních komunikací – laicky silnic, odborně ale kromě silnic také městských a účelových komunikací a dálnic. I síť pozemních komunikací je příliš široký pojem, neboť tato nabývá mnoha různých parametrů od vlastností vozovek, přes geometrii ovlivňující bezpečnost provozu až po kapacitu a kvalitu dopravy.

Snahou tedy bylo vybrat konkrétní úlohu a najít řešení, které by mohlo být zevšeobecněno i na obdobné úlohy. Jako konkrétní úlohu byla v průběhu práce vybrána koncepce levých odbočení, která často snižují kapacitu křižovatek a jsou proto ad hoc omezována, což sice sníží zatížení dané křižovatky, ale zvýší zátěž křižovatky jiné, snad zkrátí dobu zdržení vozidlům neodbočujícím vlevo a asi prodlouží celkovou dobu jízdy vozidlům, jejichž řidiči potřebovali odbočit vlevo a nemohou. Věc totiž nemusí být zcela jednoznačná, jak by se mohlo na první pohled zdát, což se pokusím vysvětlit dále v textu této práce.

Samotná optimalizace probíhá s využitím genetického algoritmu. Výpočet se provádí na matematickém modelu dopravní sítě, který umožňuje zatížit dopravní síť dopravní poptávkou a najít pro všechny cesty nejvýhodnější trasu při respektování zakázaných levých odbočení. Model pochopitelně umožňuje výpočet hodnoty optimalizačního kritéria – průměrné doby jízdy, na základě běžných dopravně-inženýrských zvyklostí.

Jistou zajímavostí související s použitým genetickým algoritmem je, že výchozí obor, genetika, vznikl před sto padesáti lety půldruhého kilometru od místa, kde byla zpracována tato disertační práce – v Augustiniánském opatství na Starém Brně, kde tehdy působil zakladatel genetiky Gregor Mendel¹.

1.1 MOTIVACE

Motivací k tvorbě této práce je koncepce (nejenom) českých technických předpisů v oblasti dopravního inženýrství, přesněji řečeno předpisů pro posuzování pozemních komunikací z hlediska kapacity a kvality dopravy. Tyto předpisy dávají návod pro řešení mezikřižovatek úseků i křižovatek – je tak možno propočítávat, kolik má mít silnice pruhů, a jakého má být křižovatka typu. Výsledky je možno porovnat s požadovanými hodnotami nazývanými úroveň kvality dopravy a rozhodnout tak, zda dotyčná dopravní stavba budoucímu provozu vyhoví či nevyhoví.

Tento postup má ale zásadní problém – prakticky lze řešit jen jednotlivou křižovátku. Je tedy možné spočítat, jakou úpravu křižovatka potřebuje, aby se například

¹ 1822 Hynčice – 1884 Brno; opat augustiniánského kláštera na Starém Brně [Wikipedia]

odstranily časté dopravní zácpy. Řidiči by pak místem měli projet s menším zdržením a místním obyvatelům by se mělo zlepšit životní prostředí, neboť se dá předpokládat, že plynule jedoucí vozidla spálí méně paliva, než vozidla popojíždějící v kongesci. To je ten optimistický pohled. Pesimista bude čekat, že zvýšení kapacity křižovatky přiláká vozidla, která stávající zácpu objížděla, a to v takové míře, dokud zvýšení dopravní zátěže kapacitu křižovatky opět nevyčerpá. Jinými slovy – vozidla vždy vyčerpají kapacitu komunikace. Realista by se zřejmě měl dívat někam mezi a měl by umět vyčíslit dopad opatření ve vztahu k celé síti.

Způsob výpočtu dopravní sítě, zohledňující zvyšování či snižování kapacity jednotlivých komunikací a křižovatek, je znám a využíván a nazývá se strategický dopravní model. S různou mírou zjednodušení lze modelovat pohyb osob, zboží a vozidel mezi výchozím bodem cesty (např. domov) do bodů cílového (např. zaměstnání). V modelu lze měnit kapacitu či jiné parametry zvolené křižovatky a pak sledovat, jak se změna projeví a jestli řidiči nezačnou měnit trasu svých cest.

Při hledání nejvhodnější konfigurace křižovatky, tzn. optimalizaci jejích parametrů ve vztahu k dopravní síti, nutně vyvstává otázka, zda by nebylo lepší optimalizovat rovnou celou síť. Místo úprav nějaké jedné křižovatky by se upravovaly úplně všechny křižovatky, tzn. prováděla by se optimalizace celé dopravní sítě. Je zřejmé, že s rostoucí velikostí dopravní sítě roste počet variant, které je nutno prověřit. Pokud by se u každé křižovatky prověřovalo 10 variant a v síti bylo 100 křižovatek, tak bylo nutné dopravní model propočítat 10^{100} krát. Metoda pokus-omyl, která je v rozumném čase zvládnutelná u jednotlivé křižovatky, musí být při optimalizaci celé sítě nahrazena systematickým postupem.

V různých oborech lidské činnosti se optimalizace, to znamená určitý algoritmus pro hledání nejlepší (tzn. optimální) varianty, běžně používá. Výzva je tak jasná – sestavit algoritmus pro hledání nejlepšího uspořádání dopravní sítě.

1.2 CÍLE PRÁCE

Za cíle práce byly, jak vyplývá z předchozí kapitoly a koneckonců i z názvu práce, zvoleny: **Algoritmus pro systematické hledání nejlepší konfigurace dopravní sítě (optimalizace dopravní sítě)**

Vzhledem ke zmatení jazyků, ke kterému běžně dochází včetně textů odborných, je vhodné upozornit na odlišnosti dvou pojmů:

1. Optimalizace (dopravní sítě) – proces hledání nejlepšího (tzn. optimálního) řešení.
2. Optimální (dopravní síť) – nalezené nejlepší řešení.

2 DOPRAVNÍ SÍŤ

Je-li názvem a tím v podstatě zadáním práce optimalizace dopravní sítě, tak je jistě na místě otázka, co to je optimální dopravní síť. Odpověď není, jak bude ukázáno níže, zcela jednoznačná a vyplýne z požadavků, které na dopravní síť poklademe. Nejdříve ale bude nutné definovat, co je myšleno termínem dopravní síť.

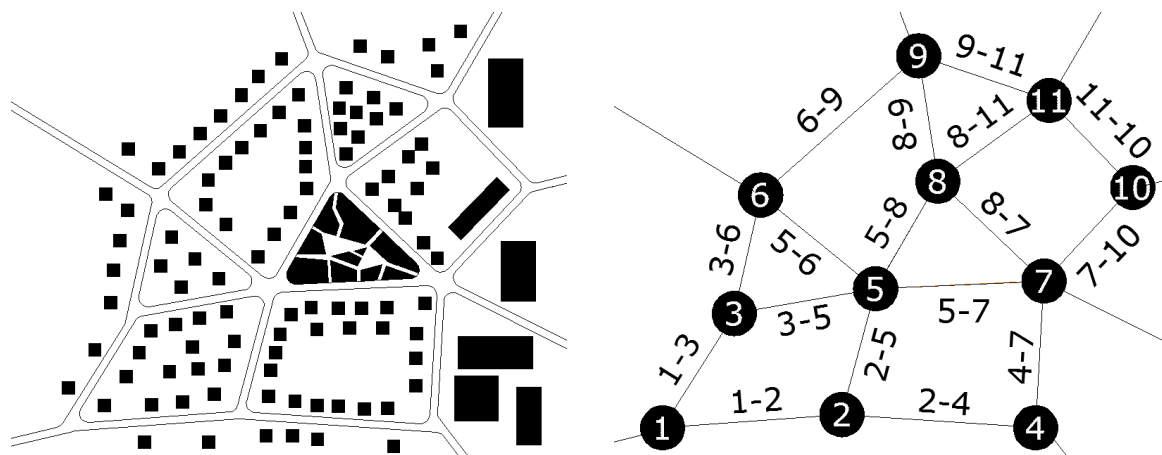
Pojem dopravní síť je používán pro dva související, ale rozdílné systémy:

- komunikace a jejich křižovatky a slouží pro jízdu dopravních prostředků, případně přímo přepravovaných předmětů. Takto se dá hovořit o síti pozemních komunikací, drah, vodních a leteckých cest, produktovodů apod. Taková síť je v této práci označena jako **mrtvá dopravní síť** a je definována parametry komunikací;
- dopravní prostředky, které se systematicky pohybují po mrtvé síti a které přepravují osoby či náklad. Příkladem může být síť linek hromadné dopravy nebo síť poštovních spojů. Taková síť je v této práci označena jako **živá dopravní síť** a je definována jízdním řádem.

Mrtvé dopravní sítě je tedy určena v prostoru, kdežto živá dopravní síť je určena jak v prostoru, tak v času.

2.1 MRTVÁ DOPRAVNÍ SÍŤ

Pro řešení různých úloh lze mrtvou dopravní síť reprezentovat síťovým grafem, ve kterém jsou komunikace zobrazeny jako hrany a křižovatky jako uzly.

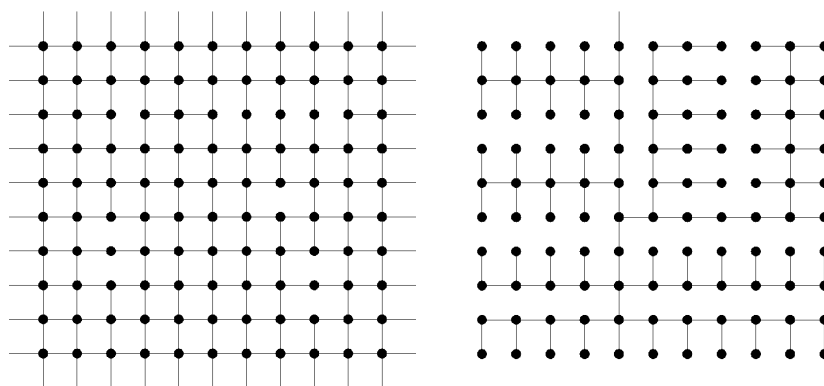


Obr. 2-1. Vlevo síť komunikací a jejich křižovatek v městské zástavbě, vpravo jejich zobrazení síťovým grafem. Uzly jsou očíslovány, hrany jsou označeny dle uzlů, se kterými jsou incidentní – pořadí uzlů může v případě potřeby označit směr. Toto imaginární město nemá drážní dopravu, čímž se dopravní síť redukuje na síť pozemních komunikací.

2.1.1 Komplexnost a uspořádání mrtvé dopravní sítě

Osamocené studium a úprava jednotlivých prvků sítě, hran a uzlů, bez zohlednění chování celé sítě, je nesprávné, protože poptávka po dopravě je flexibilní, jak co do počtu jízd, tak do trasy jízd. Hovoříme-li totiž o síti, měli bychom předpokládat vy-

soký počet různých tras mezi dvěma body zajištěný vzájemným propojování uzlů dopravní sítě. V případě výstavby slepých komunikací se o síti nedá hovořit, protože komunikace netvoří síť, svoji topologií připomínají spíše strom a jeho větve, resp. kořeny. Trasa je v tomto případě determinována, řidiči nemohou hledat alternativní trasy a celá tato práce pozbývá smysl. Pro účely této práce se síť, která bude pro vnitřní dopravu funkční i po výpadku kteréhokoli uzlu, definuje jako **pravá síť**. Naopak síť, kde výpadek kteréhokoli uzlu způsobí nefunkčnost sítě a nemožnost cesty odkudkoli kamkoli, bude nazývána jako **nepravá síť**.



Obr. 2-2. Vlevo pravá dopravní síť, vpravo nepravá dopravní síť.

V případě pravé dopravní sítě lze pro libovolný dvojici výchozího a cílového uzlu najít více než jednu trasu. Uživatel si tak může trasu vybírat podle nejrůznějších kritérií. To zároveň znamená, že změna na jednom z prvků sítě ovlivní stav jiných prvků, které mohou být i velmi vzdálené. Příkladem nechť je zákaz jednoho odbočení. Řidiči budou nuceni jet jinou trasou. Tím zvýší zatížení této jiné trasy, na které se zvýší doba zdržení, čímž se sníží její atraktivita a část z její dosavadní zátěže se přesune jinam. Tento cyklus se opakuje do ustáleného stavu, který může znamenat jiné, neočekávané zatížení různých prvků sítě. Výhoda dopravní sítě spočívající v široké nabídce tras umožňující objet neprůjezdné nebo obtížně průjezdné úseky znamená mnoho nejistot pro toho, kdo chce provoz na dopravní síť studovat nebo dokonce prognózovat.

2.1.2 Hierarchizace mrtvé dopravní sítě

Ne všechny komunikace jedné a téže dopravní sítě jsou stejně důležité. Význam komunikace můžeme rozlišit dle hledisek:

- formálních – dle kategorie pozemní komunikace, dráhy apod., přičemž ale toto zařazení nemusí být pro uživatele rozhodující, nebo dokonce zřetelné;
- omezení přístupu – některé z komunikací mohou mít omezený přístup například dle druhu vozidla (nákladní), hmotnosti vozidla či ekologických aspektů; někteří z uživatelů tak danou komunikaci nemohou využít, přičemž obdobné omezení může platit i pro pohyb v uzlech (zákazy odbočení apod.);
- atraktivity – o významu komunikace dobře svědčí její používání uživateli.

2.2 ŽIVÁ DOPRAVNÍ SÍŤ

Uživatel mrtvé dopravní sítě hledá trasu, kudy pojede (půjde, poletí, popluje) a samotný přesun si zajišťuje sám. Naopak uživatel živé dopravní sítě si hledá spojení a přesunuje se dopravními prostředky, které jsou provozovány v rámci dopravní sítě. Uživatele tedy nutně zajímá jízdní řád, tzn. pohyb vozidel v prostoru a v čase.

Nejvýraznějším příkladem živé dopravní sítě je hromadná doprava, která zajišťuje přepravu osob dle jízdního řádu. Živá dopravní síť existuje i v nákladní branži – typickým představitelem je pošta.

3 OPTIMÁLNÍ DOPRAVNÍ SÍŤ

Cílem optimalizace je najít optimální (nejlepší) řešení, kvůli čemuž je nutno určit kritérium, podle kterého se určí, zda nalezené řešení je dobré či špatné, resp. nejlepší nebo nejhorší. Je tedy nezbytné určit, co se od dopravní sítě požaduje. Z podstaty se jedná o subjektivní pohled a navíc pohled různých skupin uživatelů.

Základní přehled uvažovaných požadavků včetně jednotek počitatelných (měřitelných) veličin je v následujícím seznamu:

- Z hlediska uživatele – řidiče, resp. cestujícího
 - doba jízdy [s]
 - délka jízdy [km]
 - cena jízdy (spotřeba PHM, mýto) [Kč]
 - bezpečnost (průjezd "vyhlášenými" nehodovými lokalitami)
 - spolehlivost [pravděpodobnost dosažení cíle cesty]
 - příjemnost, pohodlnost, dobrý dojem z trasy, kvalita vozovky apod.
 - nutnost přestupů (prostředí terminálu apod.)
- Z hlediska správce komunikace
 - náklady životního cyklu (investiční náklady, náklady na údržbu) [Kč]
 - administrativní a organizační překážky (projednání stavebních úprav)
- Z hlediska sousedů
 - negativní ovlivnění životního prostředí – hluk, prach, škodlivé plyny zábor veřejného prostranství, resp. krajiny Je zřejmé, že výběr kritéria ovlivní výsledek hodnocení, resp. výsledek optimalizace.

Uvedená kritéria lze kombinovat, tzn. vytvořit multikriteriální hodnocení. Jednou z metod je hodnocení dle Metodického pokynu Ministerstva dopravy ČR 11/1995. Jinou možností je finanční ohodnocení všech kritérií, což je základem metodiky HDM-4.

4 DOPRAVNĚ-INŽENÝRSKÉ VÝPOČTY

Pro kvantitativní i kvalitativní posouzení dopravní sítě je nutné použít některý z postupů dopravního inženýrství. Kvantitativní posouzení obnáší výpočet kapacity a porovnání kapacity s intenzitou, tzn. určení, zda očekávaný počet vozidel sítě pro-

jede. Kvalitativní posouzení obnáší posouzení řady kritérií zmíněných v kap. 3, zejména doby zdržení. Pro zřehlednění lze dopravně-inženýrské postupy rozdělit na modely a výpočty dle technických předpisů.

4.1 MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ DOPRAVY

Možností, jak predikovat chování cestujících, nákladu a vozidel na dopravní síti, je použít modelování dopravy, tzn. náhradu skutečného dopravního provozu matematickým modelem. Modelem nějakého reálného objektu se nazývá jiný objekt, který má s původním objektem (vzorem, originálem) některé shodné předem stanovené vlastnosti, podstatné pro daný účel [Tuzar, 1997, s. 29].

Existuje řada různých dopravních (přepravních) modelů vzniklých pro různé typy úloh a s využitím různých předpokladů. Modely, které se používají pro potřeby dopravního inženýrství, lze rozdělit na dva základní: **Modely dopravního proudu** a **strategické modely dopravní sítě**.

4.1.1 Strategické modely dopravní sítě

Cílem strategických modelů je vypočítat poptávku po dopravě a přidělit ji na (multimodální) dopravní síť, tzn. určit zatížení jednotlivých komunikací, křižovatek a nebo také linek a zastávek hromadné dopravy.

Model se dá rozdělit do 4 kroků (stupňů), pročež se nazývá také čtyřstupňový, byť některé z těchto stupňů mohou vynechány, sloučeny či prohozeny. Tyto čtyři stupně lze popsat následujícím způsobem [Medelská, 1991; Landa, 2003; Martalos, 2008; DMRB]:

- **Kolik?** Jde o určení počtu osob, které cestují z každé zóny a do každé zóny.
- **Kam?** Jde o rozdělení počtu vyjíždějících z každé zóny dle zóny cílové, tzn. tvorbu matice přepravních vztahů.
- **Čím?** Jde o dělbu přepravní práce (modal split), tedy rozdělení cest mezi různé druhy dopravy – pěší, cyklistická, individuální automobilová, veřejná, příp. jiné.
- **Kudy?** Posledním krokem je přidělení cest na dopravní síť, tzn. určení po kterých komunikacích (linkách veřejné dopravy) se pojedje ze zóny x do zóny y.

Z kroků strategického algoritmu je v této práci použit 4. krok – přidělení cest na síť/zatížení dopravní sítě s využitím Dijkstrova algoritmu, proto jsou popsány podrobněji.

Dijkstrův algoritmus

Dijkstrův² algoritmus slouží k nalezení cesty nejmenšího odporu mezi jedním (výchozím) uzlem a zbylými uzly. Odporem může délka, doba jízdy, cena apod.; odpor může být jiný v každém z obou směrů každé hrany. Postupuje se v krocích od

² Edsger Dijkstra (1930 Rotterdam, Nizozemí – 2002 Nuenen, Nizozemí; zdroj: wikipedia)

výchozího uzlu k sousedním uzlům, přičemž se zapisuje odpor každého uzlu od uzlu výchozího. U toho uzlu, který má v daném kroku nejmenší odpor od výchozího uzlu, již s jistotou víme, že jsme našli nejkratší cestu, neboť všechny sousední uzly jsou dále než on sám.

Jistou nevýhodou Dijkstrova algoritmu ve světle další podkapitoly je nalezení pouze právě nejkratší cesty, nikoli druhé nejkratší, třetí nejkratší atd., což vychází z podstaty algoritmu.

Kromě Dijkstrova algoritmu existují i podobné algoritmy, např. Dantzigův či Floydův algoritmus [Tuzar, 1997]

Přiřazení cest na síť

Nechť jsme v situaci, že známe počet cest mezi zónou x a zónou y a chceme tyto jízdy přiřadit na konkrétní hrany sítě, tzn. na konkrétní na sebe navazující pozemní komunikace, tzn. na nějakou konkrétní trasu, která bude z pohledu těchto automobilistů optimální. Úlohu komplikuje několik nejistot.

- Budou řidiči znát optimální trasu?
- Budou řidiči touto optimální trasou jezdit?
- A co je vlastně ta optimální cesta?

Běžným předpokladem je, že optimální trasa je nejrychlejší, tzn., že s jejím využitím je automobilista v cíli nejrychleji, resp. může nejpozději vyjet z východiště. Automobilisté ale mohou být motivováni i jiným cílem, např. kvůli ceně mohou hledat nejkratší trasu nebo trasu vynechávající placené úseky. Toto lze teoreticky řešit přiřazování cest částečně podle rychlosti, částečně podle délky, s rozdělením např. dle průzkumu chování obyvatel.

Další okolností je existence více tras, které mají obdobné, nebo dokonce shodné parametry. Existuje více přístupů k rozdělení zátěže mezi více dobrých tras, Medelská [1991] uvádí:

- metoda nejrychlejší trasy, tzn. všechno nebo nic – veškerá zátěž se převede na nejrychlejší trasu.
- metodu přidělení na více tras – zátěž se převede na více dobrých tras, uváděno je 2 až 3 např. s využitím Kirchhoffových zákonů.
- metoda omezené kapacity – jde o iterační metodu, kdy se přiděluje zátěž po částech a tím se původně atraktivní komunikace stávají dříve zatíženými a při uvažování vztahu mezi zatížením a dobou jízdy dochází k jejich "zneatraktivnění" a tím se další zátěž přesouvá na další komunikace.

Třetí z uvedených metod má významnou výhodu v zohlednění odporu dopravní sítě. Zároveň vylučuje najetí nesmyslného výsledku, kdy by zatížení komunikací jako výsledek modelování překročilo kapacitu daných komunikací. Stejně jako chování řidičů představuje jakousi dlouhodobou iteraci, tak i dopravní model je založen na iteraci, přičemž kromě výše uvedeného, tzn. postupného zatěžování sítě, se v praxi používá i iterace plného zatížení – nultý krok přidělení tras je prováděn na nezatíženou síť, v dalších krocích je přidělováno opět plné zatížení, ovšem na síť zatíženou

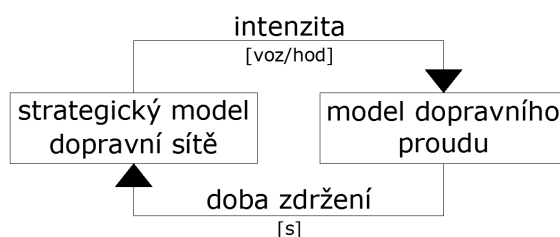
předchozím krokem. Postup se opakuje tak dlouho, dokud se přidělení nestabilizuje (dle předem zvolené podmínky). Tento postup využívá např. software Matsim³.

Odpor sítě může být vyjádřen její kapacitou, tedy prostým počtem vozidel, které mohou danou hranou nebo daným uzlem projet, nebo dobou zdržení, tedy nárůstem cestovní doby oproti prázdné komunikaci. Odpor sítě může být dán i délkou hrany, resp. cenou jízdy po hraně, resp. kombinací uvedených kritérií.

Kapacita komunikace či křižovatky může být stanovena paušálně, pro jeden jízdní pruh se standardně uvádí 1800 až 2000 vozidel za hodinu. Nevýhodou využití kapacity je nutnost použít postupného zatěžování, kdy po kroku, kdy je kapacita prvku vyčerpána, se již na tento prvek další zatížení nepřirazuje.

Doba zdržení umožňuje plynulejší samoregulaci, neboť na rozdíl od diskrétních stavů kapacity vyhoví/nehoví může doba zdržení nabývat spojitých hodnot od nuly do nekonečna. Výpočet doby zdržení lze provést vícero způsoby, běžným je stanovení závislosti doby zdržení na míře vytižení komunikace. Se vzrůstajícím zatížením vzrůstá doba zdržení, nárůst doby zdržení se výrazně zvyšuje při přiblížení zatížení ke kapacitě, po překročení kapacity postupně roste doba zdržení nade všechny meze.

Přesnějším způsobem může být modelování dopravního proudu na jednotlivých komunikacích a křižovatkách. Využitelný může být i výpočet doby zdržení podle technických předpisů. Výstup ze strategického modelu (počty vozidel) se stává vstupem pro model dopravního proudu, jehož výstup (doba zdržení) se stane vstupem pro další iteraci strategického modelu a tak cyklicky dále dle obr. 4-1.



Obr. 4-1. Vnoření modelu dopravního proudu do strategického modelu.

Pro zatížení dopravní sítě je také důležitý čas cesty. U jednodušších a v praxi běžných modelů se čas cesty neuvažuje a pracuje se pouze s celodenní nebo jednohodinovou intenzitou. Sofistikovanější modely umožňují přidělovat cesty na síť nejenom z hlediska trasy, ale i z hlediska času.

5 SYSTEMATICKÁ OPTIMALIZACE

Optimalizace je proces pro hledání extrému funkce, která popisuje zkoumaný jev. Je-li popsán vztah mezi parametry systému a užitek, pak lze hledat takové parametry, při kterých je dosaženo největšího užitku. Záleží na charakteru hledaného užitku, zda se jedná o hledání maxima (např. největší cestovní rychlost) nebo minima (např. nejkratší cestovní doba). Náročnost optimalizace do značné míry závisí na složitosti funkce a množství vstupních parametrů.

³ Můj stručný přehled o tomto SW vychází z letní školy SW Matsim ve Znojmě v září 2013.

5.1 POKUSNÁ VERSUS SYSTEMATICKÁ OPTIMALIZACE

Běžný postup při návrhu dopravní sítě lze označit za **pokusnou optimalizaci**. Projektant na základě svých znalostí, zkušeností a intuice navrhne varianty, které pomocí dostupných prostředků může posoudit a vybrat z nich tu optimální. Potom vypočte kapacitu a kvalitu dopravy a řekne, která z variant kapacitně vyhoví a která bude pro řidiče představovat menší zdržení. V lepším případě projektant udělá ještě model dotčené dopravní sítě, na kterém se může projevit dopad řešení na celou síť. Je evidentní, že výsledek hodnocení je do značné míry závislý na návrzích konkrétních variant, které projektant provedl. Není-li po hodnocení s výsledkem spokojen, např. proto, že žádná z variant nevyhoví může stávající varianty pozměnit či navrhnout zcela nové a tento postup může opakovat.

Alternativním postupem je definice všech reálně možných variant a jejich vyhodnocení, tzn. určení, která z nich je nejlepší. Tento postup je v této práci nazván jako **systematická optimalizace**. Využití systematické optimalizace naráží na dva zásadní související problémy. Jednak je třeba popsat všechny varianty, které mohou nastat, a dále je nutné je všechny propočítat. Jako nezbytná se tedy jeví automatizace jak výpočtu optimalizačního kritéria, tak v lepším případě i samotných variant uspořádání silniční sítě. Tyto podmínky nejsou v praxi triviální, naopak mohou provedení systematické optimalizace zcela znemožnit.

5.2 HEURISTIKA

V jednoduchých případech lze optimální řešení hledat analyticky. Jednoduchým příkladem je dělba cyklu na dobu zelené dle intenzit – doba zelené se rozdělí ve stejném poměru, v jakém jsou k sobě intenzity (podrobněji kap. 7, vztah 7.3). Použitelnost analytického řešení je ovšem z podstaty omezena a pro složitější, resp. komplexnější úlohy je nutno použít metody numerické. V tom případě existují v zásadě dvě cesty. První je spočítat všechny varianty a pak ukázat na nejlepší. Nevýhoda této cesty se objeví, pokud variant je velmi hodně a není je reálně spočítat všechny. Druhou možností je vybírat si, které varianty budeme počítat, podle nějakého klíče. Při vhodně zvoleném klíči (algoritmu) nalezneme dobrou variantu, která sice je nejlepší nám známou variantou, ale nemusí být nutně skutečně nejlepší variantou. Takový postup, kdy nevíme, zda naše nejlepší řešení je skutečně nejlepší je všeobecně označován jako heuristický. Nejlepší nalezené řešení se pak označuje jako **pseudooptimální**.

V průběhu věků byla vyvinuta řada optimalizačních algoritmů, z nichž podrobněji je popsán genetický algoritmus, který bude využit pro praktický optimalizační úkol.

5.3 GENETICKÝ ALGORITMUS

Genetický algoritmus napodobuje evoluci organismů, která pomocí křížení a mutací vedla k zdokonalování organismů. Stejně, jako se z méně dokonalých prvků

stali dokonalejší lidé, by se užitím evoluce⁴ měla stát např. dokonalejší konfigurace dopravní sítě. Genetický optimalizační algoritmus je postup heuristický.

5.3.1 Princip optimalizace

Nechť existuje populace, kdy každý jedinec nese svoji genetickou informaci, tvořenou řetězcem genů. V případě optimalizace dopravní sítě jedinec může představovat variantu a každý gen křížovatkový pohyb. Jednotlivé geny mohou nabývat různých hodnot označených jako alely – např. křížovatkový pohyb může nabývat hodnot "povoleno" nebo "zakázáno".

Nultá generace je vygenerována náhodně. Další generace vznikají kombinací reprodukce, křížení a mutace, a to tak dlouho, dokud se již jedinci dále nezdokonalují. Reprodukce v této souvislosti znamená přenos genetické informace na další generaci tak, jak je (tedy beze změn). Důležitým aspektem je, že pro další generaci se vybírají ti nejlepší jedinci, tzn. jedinci s nejvyšším fitness (selekce).

Optimalizační kritérium, tzn. kvalita jedince je označována jako **fitness** [Teda, 2005] nebo užitková funkce [Šíma, 1996]. Je pochopitelně nutné, aby mohla být spočítána z informací uložených v chromozomu. Slouží pro výběr rodičů i pro hodnocení, že algoritmus lze ukončit (nejlepší fitness se již dále nezlepšuje).

Výběr jedinců pro reprodukci založený na jejich fitness se nazývá **selekce** a je odvozen z Darwinovy teorie přirozené selekce – silnější, obratnější, šikovnější a všeobecně lepší samec má větší šanci získat a oplodnit samičku a vytvořit své potomstvo, už proto, že není předtím např. uloven jiným živočichem. Selekcce během genetického algoritmu je realizována náhodným výběrem, který zohledňuje fitness jedinců – šance na výběr konkrétního jedince jako rodiče je úměrná jeho fitness.

Křížení znamená výměnu náhodně vybrané části genetické informace mezi dvojicí rodičů Šíma [1996] rozlišuje křížení jednobodové, kdy výměna genů probíhá od náhodně vybraného bodu; křížení vícebodové, kdy náhodně vybraných bodů je více, a křížení uniformní, kdy se u každé genu (náhodně) rozlišuje zvlášť, zda bude podroben křížení, nebo ne.

Jedinec	Chromozom										Fitness
otec	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	5
matka	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	3
<i>náhodné číslo</i>	<i>0,38</i>	<i>0,59</i>	<i>0,96</i>	<i>0,45</i>	<i>0,15</i>	<i>0,28</i>	<i>0,73</i>	<i>0,62</i>	<i>0,42</i>	<i>0,35</i>	
1. potomek	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	4
2. potomek	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	4

Tab. 5-1. Příklad jednobodového křížení se zvolenou 20% pravděpodobností (náh. číslo > 0,8).

⁴ Evoluce je samovolný dlouhodobý proces rozvíjející a diverzifikující život. Autorem první evoluční teorie byl Jean-Baptiste Lamarck (1744 Bazentin-le-Penit, Francie – 1829 Paříž); dodnes respektovanou teorii zahrnující i přirozený výběr definoval Charles Darwin (1809 Shrewbury, Anglie – 1882 Kent, Anglie). Základy genetiky (dědičnosti) položil Johann Gregor Mendel (1822 Hynčice – 1884 Brno) v Brně, tzn. ve stejném městě, v jakém vznikla tato diskrétní práce. Zdroj: Wikipedie

Jedinec	Chromozom										Fitness
otec	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	5
matka	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	3
náhodné číslo	0,38	0,59	0,96	0,45	0,15	0,28	0,73	0,62	0,42	0,35	
1. potomek	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	6
2. potomek	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	2

Tab. 5-2. Příklad uniformního křížení se zvolenou 60% pravděpodobností (náhodné číslo > 0,4).

Mutace je náhodná změna některého z genů. Tím se do chromozomu zanelela nová informace, která může znamenat lepší fitness. Odstraňuje se tím také zvyšující se jednotvárnost populace. K mutaci dochází s řádově menší pravděpodobností než ke křížení [Šíma, 1996].

Jedinec	Chromozom										Fitness
potomek	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	5
náhodné číslo	0,38	0,59	0,96	0,45	0,15	0,28	0,73	0,62	0,42	0,35	
zmutovaný potomek	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	6

Tab. 5-3. Příklad mutace se zvolenou 5% pravděpodobností (náhodné číslo > 0,95).

Pro urychlení optimalizace Teda [2005] doporučuje upravit náhodnost křížení a mutace dle heuristické funkce sledující zisk lepšího řešení přímo při samotném křížení/mutaci.

6 HLEDÁNÍ VHODNÉ ÚLOHY PRO OPTIMALIZACI

Z nekonečné řady parametrů, které lze na různých dopravních sítích optimalizovat, je nutné pro další práci vybrat takové, které budou vhodné pro ukázkou systematické optimalizaci. Je tedy nutné definovat vhodnou optimalizační úlohu.

Při výběru, resp. definici optimalizační úlohy je třeba respektovat následující kritéria:

- objektivní
 - schopnost automatizovat návrh a výpočet variant uspořádání optimalizované dopravní sítě
 - velký dopad opatření na dopravní síť jako celek a z toho vyplývající komplexnost řešení
- subjektivní
 - zaměření ústavu autora této práce a s tím spojený praktický význam, tzn. navrhování pozemních komunikací také z hlediska plynulosti provozu
 - zaměření úloh řešené autorem této práce v minulosti, tzn. diplomová práce s názvem Simulace dopravní sítě v oblasti Veverí a cílem ověřit přínosy zjednosměrnění souběžných ulic, komerční zakázky za-

měřené na dopravně-inženýrské posouzení a výzkumné projekty orientované na modelování dopravy.

Po dlouhých úvahách o rozličných tématech se jako nejlepším ukázalo levé odbočení na světelně řízených křižovatkách, a to z následujících důvodů:

- zákaz levého odbočení je docela časté opatření ke zvýšení plynulosti dopravy;
- dopad na uživatele dopravní sítě není intuitivně jednoznačný – části uživatelů (odbočující dosud vlevo) může zákaz levého odbočení přinést komplikace, naopak jiné části uživatelů (dosud neodbočující vlevo) může přinést zrychlení;
- předpoklad výrazného dopadu na celou síť – vynuceně se mění trasy některých cest a zásadně se mění odpor sítě v místech zakázaného levého;
- výpočet kapacity jednotlivé křižovatky je známý;
- výpočet zatížení dopravní sítě se zohledněním odporu sítě je známý;
- zrušení levého odbočení umožní zrušit odbočovací pruh vlevo a jeho prostor využít pro jiné řadicí pruhy – předpoklad automatizovaného návrhu uspořádání křižovatky dle univerzální šablony;
- zrušení levého odbočení umožní při světelném řízení křižovatky zrušit fázi pro odbočení vlevo – předpoklad automatizovaného návrhu signálního plánu dle univerzální šablony;

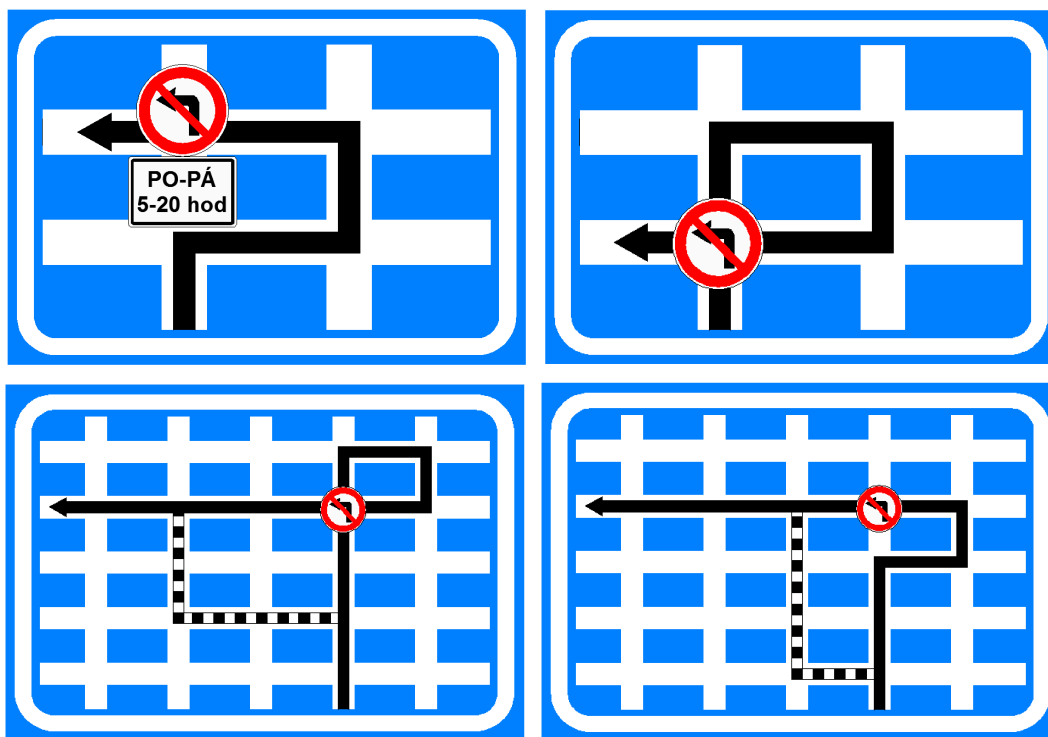
Z výše uvedených bodů je zřejmé, že tuto komplexní úlohu lze automatizovat, což je rovněž zásadní okolnost umožňující její řešení systematickou optimalizací.

6.1 ZÁKAZ LEVÉHO ODBOČENÍ

V zemích s pravostranným provozem musí vozidla odbočující vlevo dávat přednost vozidlům jedoucím v protisměru. To u úrovnových křižovek vyvolává nutnost zřídit samostatný řadicí nebo odbočovací pruh, aby vozidla jedoucí přímo nebo odbočující vpravo nebyla blokována vozidly odbočujícími vlevo čekajícími na mezeru v protisměrném dopravním proudu.

Při nedostatku místa je lákavým řešením nápravy kapacitně nevyhovující úrovnové křižovatky zákaz levého odbočení, a tím uvolněním společného řadicího pruhu od vozidel čekajících na odbočení vlevo, nebo zrušení samostatného pruhu pro odbočení vlevo a jeho využití pro ostatní směry. Ke zlepšení intuitivně dojde, je-li vysoká intenzita vozidel jedoucích přímo nebo vpravo a nízká intenzita vozidel odbočujících vlevo.

Zároveň se zákazem levého odbočení zjednoduší návrh signálního plánu, jedná-li se o křižovátku řízenou. Není tak nutno zřizovat samostatnou fázi pro levé odbočení a tím ukrajovat z doby zelené pro zbylé směry. V kombinaci více pruhů pro směr přímo a řízení křižovatky lze dosáhnout násobného zvýšení celkové kapacity křižovatky. Rovněž se snížením počtu fází dochází ke snížení počtu mezičasů, tzn. ke snížení neproduktivní doby cyklu.



Obr. 6-1. Alternativní trasy k zakázanému levému odbočení ve formátu značky IS 9e Návěst před křižovatkou.

6.1.1 Rozsah úlohy levého odbočení

Na jedné průsečné křižovatce jsou 4 potenciální levá odbočení. Zakázat lze kterákoli z nich, aniž by zákaz ztrácel, resp. zákazy ztrácely smysl. Jedno levé odbočení nabývá dvou hodnot (povoleno, zakázáno), které nastávají na čtyřech vjezdech do křižovatky, což lze zapsat vztahem 6.5.

$$PZ,K = PS^{PV} = 2^4 = 16 \text{ variant} \quad (6.5)$$

kde

PZ,K je počet variant zákazů na jedné průsečné křižovatce
 PS počet stavů, kterých může vjezd nabýt (vlevo povoleno, vlevo zakázáno)
 PV počet vjezdů, které jsou na jedné průsečné křižovatce

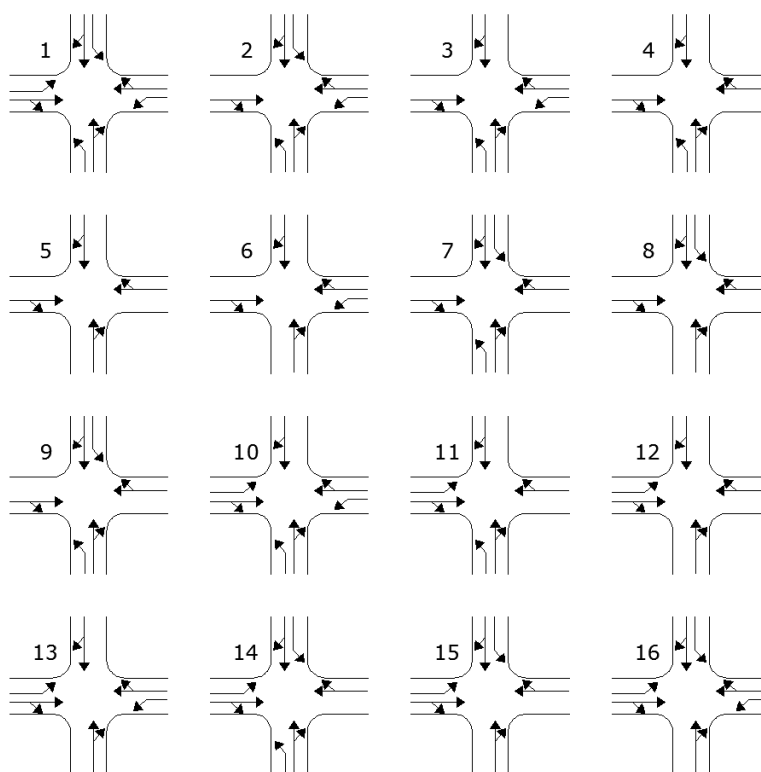
Počet variant roste s uvažováním více křižovatek, na kterých by se levá odbočování zakazovala. Obdobně jako vztah (6.5) pro počet zákazů na jediné křižovatce lze vytvořit i vztah (6.6) pro počet zákazů na více křižovatkách.

$$PZ,S = PZ,K^{PK} \quad (6.6)$$

kde

PZ,S je počet variant zákazů na síti
 PZ,K počet variant zákazů na jedné průsečné křižovatce

PK počet křižovatek v síti, na kterých se zvažují zákazy



Obr. 6-2. 16 kombinací zákazů levých odbočení na jedné průsečné křižovatce

Z tabulky 6-3 je patrný vysoký nárůst počtu variant s narůstajícím počtem křižovatek. Při 50 křižovatkách je to v řádu 10^{60} variant.

počet křižovatek	1	2	3	4	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
počet variant	16	256	4096	10^5	10^6	10^{12}	10^{24}	10^{36}	10^{48}	10^{60}	10^{72}	10^{84}	10^{96}	10^{108}	10^{120}

Tab. 6-3. Počty variant zákazů levých odbočení dle počtu křižovatek, u kterých se zákazy uvažuje. Od 4 řešených křižovatek je v tabulce z důvodu rozsahu uveden pouze řád.

Rozšířila-by se úloha i o opak zákazu levého odbočení, totiž o zákaz jízdy přímo, vedlo by to k dalšímu nárůstu počtu variant. Jeden vjezd do křižovatky by tak mohl nabývat tří hodnot (povoleno vše, zakázáno levé odbočení, zakázána jízda přímo). Čtvrtý stav není uvažován, protože by z vjezdu nebylo možno jet nikam. Pravé odbočení může být zakázáno společně s jízdou přímo, nebo může být ponecháno, viz kap. 6.2.5. Vztah 6.5 je nutno upravit na vztah 6.7.

$$PZ,K = PS^{PV} = 3^4 = 81 \text{ variant} \quad (6.7)$$

kde

PZ,K je počet variant zákazů na jedné průsečné křižovatce

PS počet stavů, kterých může vjezd nabýt (vše povoleno, zak. vlevo, zak. přímo)

PV počet vjezdů, které jsou na jedné průsečné křižovatce

Ne všech 81 variant zákazů na jedné křižovatce je efektivních – z hlediska sledovaného přínosu, totiž odstranění jednoho ze dvojice kolizních pohybů (jízda vlevo a protisměrná jízda přímo), jsou některé varianty nesmyslné. Celkem je to 32 variant, kde nejsou odstraněny navzájem kolizní pohyby, ale naopak pohyby navzájem nekolizní. Z 81 tak zbývá 49 efektivních variant zákazů na jedné křižovatce, které vykazují znak potenciální efektivity.

Počet variant s počtem křižovatek pochopitelně roste ještě rychleji než případě zakazu pouze levých odbočení – přijme-li se možnost zakazovat i jízdu přímo, počet variant je (dle vztahu 6.7) při 100 řešených křižovatkách v řádu 10^{169} .

počet křižovatek	1	2	3	4	5	10	20	30	40	50	100
počet variant	49	2401	10^5	10^6	10^8	10^{16}	10^{33}	10^{50}	10^{67}	10^{84}	10^{169}

Tab. 6-4. Počty variant zákazů levých odbočení a jízdy přímo dle počtu křižovatek, u kterých se zakazy uvažuje. Od 4 řešených křižovatek je v tabulce z důvodu rozsahu uveden pouze řád.

7 NAVRŽENÝ OPTIMALIZAČNÍ ALGORITMUS

Tato kapitola popisuje samotný algoritmus, který byl autorem této práce navržen pro otestování možnosti řešit komplexní úlohu návrhu dopravní sítě pomocí systematické optimalizace.

Celý algoritmus včetně modelování sítě byl autorem zakódován v jazyce VBA – alternativou bylo využít nějaký z softwarů určených pro strategické modelování dopravní sítě, kdy by si optimalizační algoritmus pouze volal již existující SW se zadáním varianty a s dotazem na hodnocení této varianty. Výhodou použití již existujícího SW je, že za desetiletí práce mnoha lidí poskytuje velmi sofistikované řešení problematiky zatížení dopravní sítě. Nevýhodou použití již existujícího SW je, že tento je do značné míry "černou skříňkou", tzn. vlastní výpočet je obestřen jistým tajemstvím, kdežto při použití vlastního SW je plná kontrola nad celým výpočtem za cenu většího zjednodušení modelu. Pro účely disertační práce se jevil vhodnější postup s vlastním SW – pro případné pozdější použití v projekční praxi by zřejmě vhodnějším bylo volat si během optimalizace komerční SW.

Obecným cílem algoritmu je tedy najít takové rozložení zakazu křižovatek pohybů v celé řešené síti, při kterém bude dosaženo optimálního stavu. Za optimální stav bude považována ta varianta zákazů, při které bude prognózován nejkratší průměrný cestovní čas.

Pro ověřovací algoritmus je nutné najít vhodnou síť. Po úvahách, zda práci držet více prakticky a řešit konkrétní lokalitu, nebo více teoreticky a řešit síť zcela obecnou, byla vybrána možnost druhá poskytující jistou míru zobecnění úlohy. Zde je nutno zdůraznit, že každá síť je jiná, ať co se týče topografie, kapacity či dopravní zatížení. Nelze tedy najít univerzálně platné schéma, podle kterého by se síť měla

navrhovat tak, aby byla optimální. Opakovaným volením obecné náhodné sítě se ale dle předpokladu dá omezit vliv konkrétních parametrů konkrétní sítě na běh algoritmu určeného pro obecné použití.

Zvolena byla síť imitující síť městských komunikací, protože právě města spojují dvě protichůdná východiska pro návrh dopravní sítě – nedostatek prostoru a velké dopravní zatížení. Tomu tedy odpovídá vzdálenost křižovatek a také to, že modelovány jsou křižovatky průsečné, světelně řízené.

Zatížení dopravní sítě vychází z náhodně generované matice dopravních vztahů a je na síť přidělováno postupně tak, aby další vozidla respektovala již vyčerpanou kapacitu dříve přidělenými vozidly – tento postup se používá ve strategických modelech určených k prognóze jakéhosi rovnovážného stavu, ke kterému v dopravní síti dochází. Pro hledání nejrychlejší trasy slouží Dijkstrův algoritmus. Odpor jednotlivých uzlů sítě, tzn. křižovatek, je počítán standardně, tzn. tak, jak k němu přistupují české technické předpisy – nebylo cílem práce je ověřovat, resp. zpochybňovat. Návrh signálního plánu je plně automatizován, aby mohl běžet v rámci automatizované optimalizace.

Optimalizace samotná probíhá pomocí genetického algoritmu, který z nejlepších jedinců (v tomto případě nejlepších variant zákazů) sestavuje křížením a mutacemi další generaci, a to tak dlouho, dokud se populace zlepšuje, tzn. dokud se zatím známé nejlepší řešení dále zlepšuje.

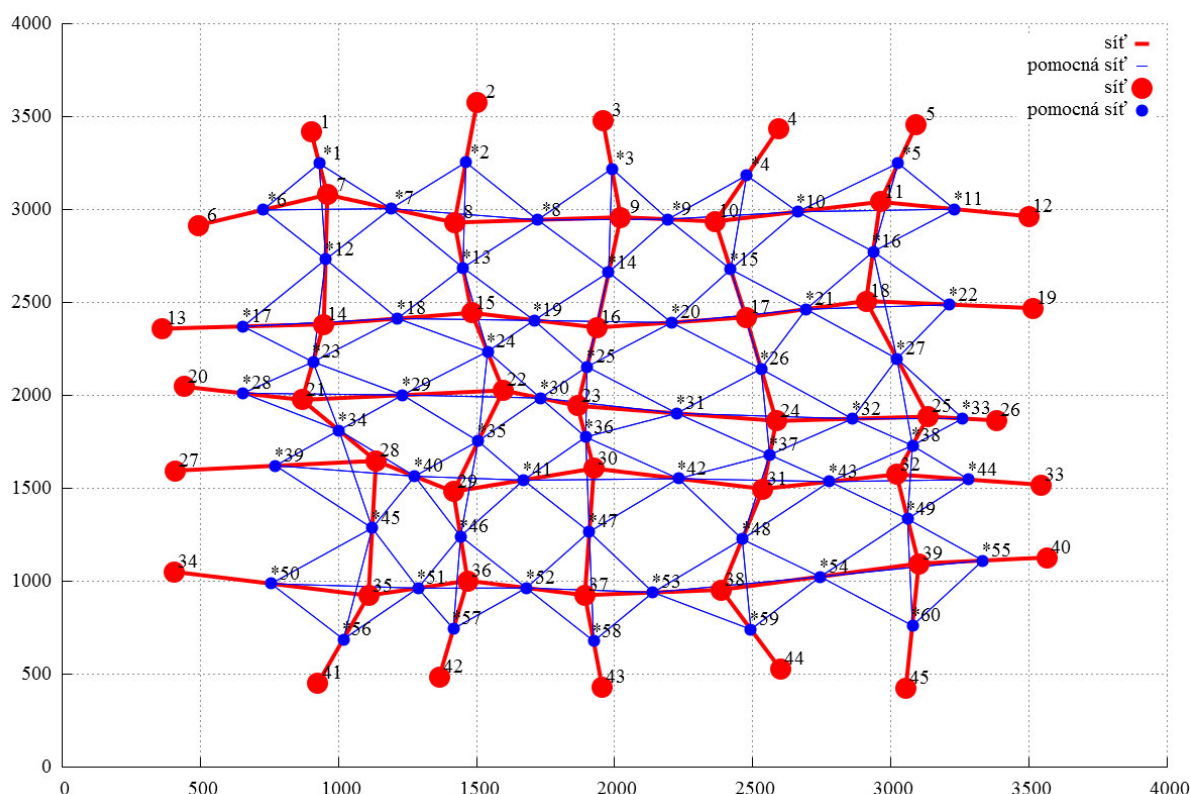
Princip genetického algoritmu vyžaduje, aby se celý výpočet odehrával v několika úrovních vnoření cyklů. V prvním cyklu se opakuje přidělování dopravního zatížení, až si svoji trasu najdou postupně všechna vozidla. Nejrychlejší trasa se hledá Dijkstrůvým algoritmem, přičemž odpor sítě se počítá dle zatížení z předchozího cyklu. Druhý cyklus opakuje výpočet přidělení dopravního zatížení pro každé jedince, totiž pro každou variantu zákazů. Třetí cyklus opakuje výpočet všech jedinců jedné generace pro jednotlivé generace teoreticky tak dlouho, dokud se hledané řešení zlepšuje. Čtvrtý cyklus opakuje celý výpočet, tzn. celý genetický algoritmus pro náhodné dopravní síť s náhodným zatížením.

7.1 VYTVOŘENÍ SÍTĚ

Rozsah sítě byl zvolen jako kompromis výpočtové náročnosti algoritmu a požadavku na složitou síť umožňující komplexní jevy. Dopravní síť je tak tvořena 45 uzly, z nichž 25 vnitřních uzlů tvoří pole $5 * 5$ (křižovatky) a zbylých 20 vnějších uzlů tvoří obvod (vjezdy, resp. výjezdy ze sítě). Křižovatky jsou v rastrovém systému navzájem propojeny obousměrnými hranami. Uzly po obvodu jsou připojeny k nejbližší křižovatce. V souhrnu to znamená, že každá křižovatka má právě 4 ramena (tzn. jedná se o křižovatku průsečnou). Souřadnice uzlů x i y jsou v násobcích 500 metrů opravené o náhodný odstup plus/minus 150 m (rovnoměrné rozdělení odstu- pu).

Optimalizace spojení mezi dvojicemi uzlů (Dijkstrův algoritmus) je závislá na ohodnocení hrany (doba jízdy, cena jízdy, délka jízdy). Jako rozhodující se ale předpokládá doba zdržení na křižovatkách (uzlech), nikoli na mezikřižovatkových úse-

cích (hranách) – proto je potřeba ohodnocovat také/především uzly. Proto je použita přesmyčka, kdy uzly jsou nahrazeny hranami a hrany jsou nahrazeny uzly.



Obr. 7-1. Výchozí dopravní síť (tlustě) doplněna o pomocnou síť (tence), která vznikla prohozením uzlů a hran výchozí sítě. Číslo u uzlů je číslem uzlu (bez hvězdičky číslo uzlu hlavní sítě, s hvězdičkou číslo uzlu pomocné sítě).

Hrany sítě tak vytvoří uzly pomocné sítě a uzly sítě jsou nahrazeny hranami pomocné sítě. Dvojice nových uzlů je propojena dvojicí jednosměrných hran, které se na obrázku překrývají. Každá hrana pomocné sítě tak vlastně vytvoří jeden křižovatkový pohyb. Neupravený Dijkstrův algoritmus je tak možné použít pro hledání nejkratší cesty se zohledněním různé doby zdržení na křižovatce pro různé křižovatkové pohyby.

Dopravní zatížení se generuje čistě náhodně pro každou dvojici 60 uzlů pomocné sítě.

7.2 POSTUPNÉ PŘIDĚLOVÁNÍ DOPRAVNÍ ZATÍŽENÍ

Zvolena byla metoda postupného zatěžování dopravní sítě. První vozidla si najdou nejkratší cestu po nezatížené síti, tzn. kdy odpor jednotlivých hran je tvořen pouze dobou jízdy 50km rychlostí. Další vozidla hledají nejkratší cestu po síti zatížené předchozími vozidly – vynechávají již přetížené křižovatky. Tento cyklus se opakuje, dokud nejsou na síť přidělena všechna vozidla. Počet kroků postupného zatěžování byl s ohledem na dobu výpočtu zvolen 10.

7.3 KŘÍŽOVATKY

Vždy dvanáct hran pomocné sítě obklopujících jeden uzel výchozí sítě reprezentuje dvanáct křižovatkových pohybů. Obecné uspořádání se předpokládá: společný řadicí pruh pro směr rovno a přímo a samostatný řadicí pruh pro směr vlevo. Ovlivnění pěší, cyklistickou ani veřejnou dopravou se explicitně neuvažuje, což tyto módy dopravy nevylučuje, pouze to znamená, že jejich signální plán bude podřízen signálnímu plánu pro motorová vozidla.

7.3.1 Návrh signálního plánu

Pro každou křižovátku každé varianty a každého kroku zatížení je nutno automaticky navrhnout signální plán. Vzhledem k charakteru použitého dopravního zatížení, které se v čase nemění, není možno a nutno navrhovat dynamické řízení. Nepravidelné délky hran znemožňují zavést v síti plošnou koordinaci, proto jsou signální plány pro jednotlivé křižovatky navrhovány izolovaně. Základní parametry pro všechny křižovatky jsou následující:

- Zvolená doba cyklu – 80 sekund
- Mezičas
 - vozidla-vozidla – 4 sekundy (dle výpočtu v příloze B)
 - vozidla-chodci – 7 sekund (dle výpočtu v příloze B)
- levé odbočení je řešeno jako nekolizní

Cyklus lze v našem případě rozdělit do fází několika způsoby:

- dvě fáze s kolizními odbočeními vlevo (nesplňuje předpoklad nekolizního odbočení)
- čtyři fáze, z toho dvě fáze pro protisměrná levá odbočení
- čtyři fáze, každá fáze pro jeden vjezd
- šest fází, dvě základní fáze pro jízdu přímo doplněny o čtyři fáze pro jednotlivá levá odbočení

Poslední z uvedených schémat má oproti ostatním výhodu v možnosti vyřadit kteroukoli ze čtyřech fází odpovídajících čtyřem levým odbočením. Celkově tak lze z tohoto schématu vytvořit 16 dalších schémat odpovídajících 16 konfiguracím zákazu levého odbočení. Tento postup lze algoritmizovat, tedy automatizovat.

Šest fází lze rozdělit na dvě hlavní fáze, které obě mají tři podfáze – v tomto smyslu je také použito jejich označení. Fáze #.1 (1.1 nebo 2.1) a #.3 (1.3 nebo 2.3) jsou v podstatě prodloužením fází #.2 (1.2 nebo 2.2), kdy se povoluje levé odbočení na úkor ukončeného protisměru. V době povoleného nekolizního levého odbočení lze realizovat pravé odbočení, které ale nemá svůj řadicí pruh, tzn. je využitelné jen pokud v něm nestojí vozidlo jedoucí přímo a proto s ním nebude při kapacitním posudku uvažováno.

Doby zelených jsou rozděleny v poměru intenzit, a to nejprve pro hlavní fáze a poté pro podfáze. Intenzita je předtím přepočtena na jeden řadicí pruh. Obecně zapísáno:

$$\frac{\frac{I_1}{PP_1}}{\frac{I_2}{PP_2}} = \frac{Z_1}{Z_2} \quad (7.3)$$

kde

I_1 (I_2)	je intenzita ve směrech 1 (2)
PP_1 (PP_2)	počet řadicích pruhů ve směrech 1 (2)
Z_1 (Z_2)	doba zelené ve směrech 1 (2)

Dělbba mezi hlavní fáze je zřejmá: Jeden směr (označme 1) zahrnuje vjezdy VB a VD, druhý vjezd (označme 2) zahrnuje vjezdy VA a VC. Dělbba mezi podfáze je o něco složitější a je prováděna čtyřikrát:

1. dělbba: Vjezdy VBA a VBD oproti vjezdu VDA (v rámci hlavní fáze 1)
2. dělbba: Vjezd VBC oproti vjezdům VDB a VDC (v rámci hlavní fáze 1)
3. dělbba: Vjezdy VAC a VAD oproti vjezdu VCD (v rámci hlavní fáze 2)
4. dělbba: Vjezd VAB oproti vjezdům VCA a VCD (v rámci hlavní fáze 2)

Každá hlavní fáze se rozděluje nadvakrát – tím se všem vjezdům (řadicím pruhům) přidělí doba zelené přesně odpovídající jejich podílu na intenzitě. Na konkrétním poměru intenzit pak záleží, zda se překryjí doby zelených pro jízdy přímo a vpravo a podfáze #.2 tak bude zahrnovat vzájemně nekolizní jízdy přímo a vpravo podle obr. 7-2 (scénář 1), nebo zda se překryjí doby zelených pro jízdy vlevo a podfáze #.2 tak bude zahrnovat vzájemně nekolizní jízdy vlevo podle obr. 7-2 (scénář 2). Blíží-li se k sobě doby zelené vjezdů ze stejného paprsku, tak doba podfáze #.2 se blíží nule (obr. 7-2, scénář 3).

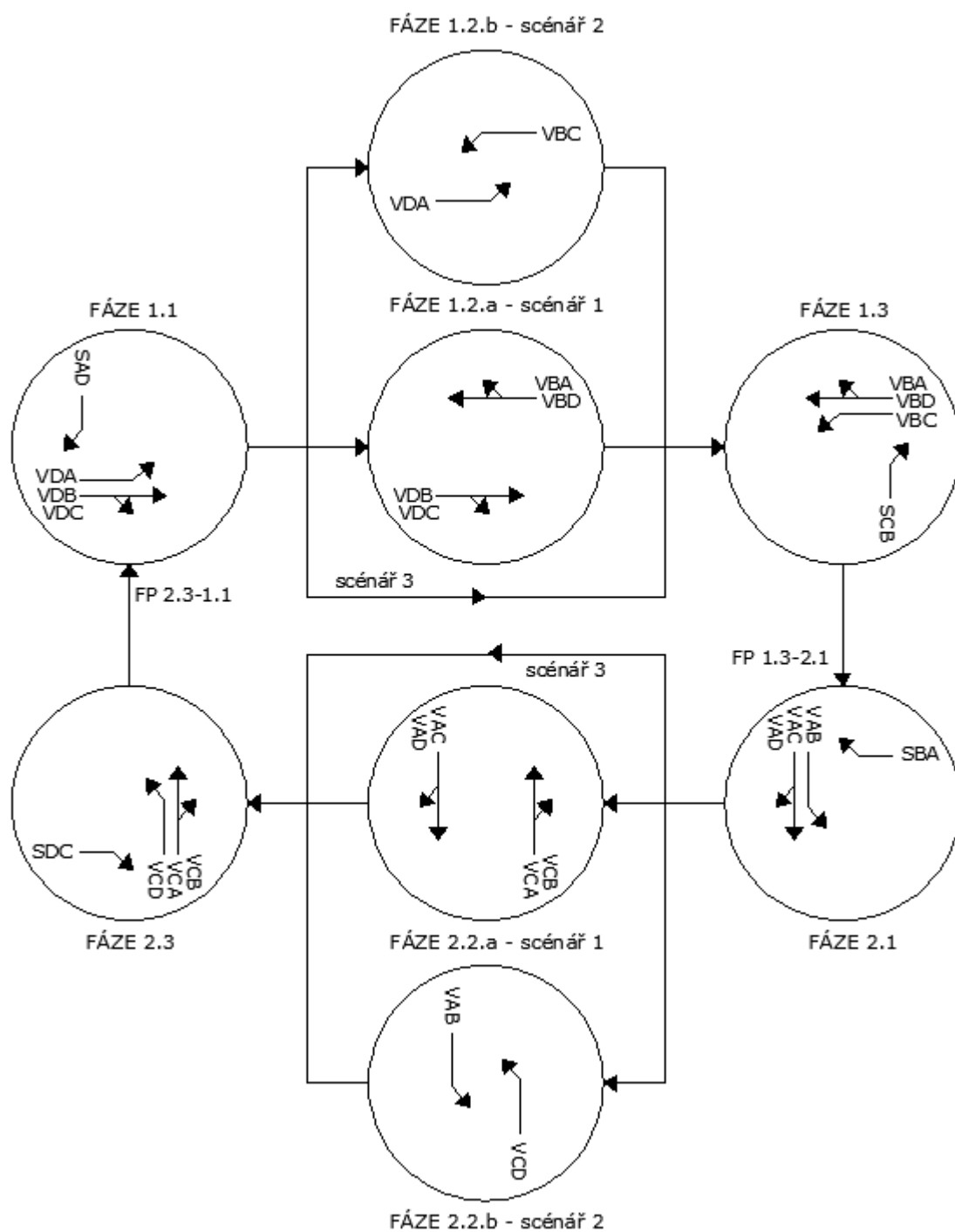
Pro první kolo – rozdělení doby zelené pro hlavní fáze

$$Z_{F,1} = \min \left(\max \left(\frac{I_{F,1} \frac{C - P_M M}{I_{F,1} + I_{F,2}}}{10}, C - P_M M - 10 \right) \right) \quad (7.4)$$

$$Z_{F,2} = C - P_M M - Z_{F,1} \quad (7.5)$$

kde

$Z_{F,1}$ ($Z_{F,2}$)	je doba zelené pro fázi 1 (2) [s]
$I_{F,1}$ ($I_{F,2}$)	součet intenzit ve směrech zařazených do fáze 1 (2) [voz/h]
C	doba cyklu (stanovena na 80 s) pro 1. kolo, resp. fáze pro 2. kolo [s]
M	doba mezičasu (stanovena na 3 s) [s]
P_M	počet mezičasů v celém cyklu (4, viz obr. 7-15)



Obr. 7-2. Univerzální schéma fází použité v algoritmu pro návrh signálního plánu

Pro druhé kolo – rozdělení doby zelené hlavní fáze mezi kolizní pohyby podfáze

$$Z_1 = \min \left(\max \left(\frac{I_1}{PP_1} \frac{Z_F}{\frac{I_1}{PP_1} + \frac{I_2}{PP_2}}, 5 \right), Z_F - 5 \right) \quad (7.6)$$

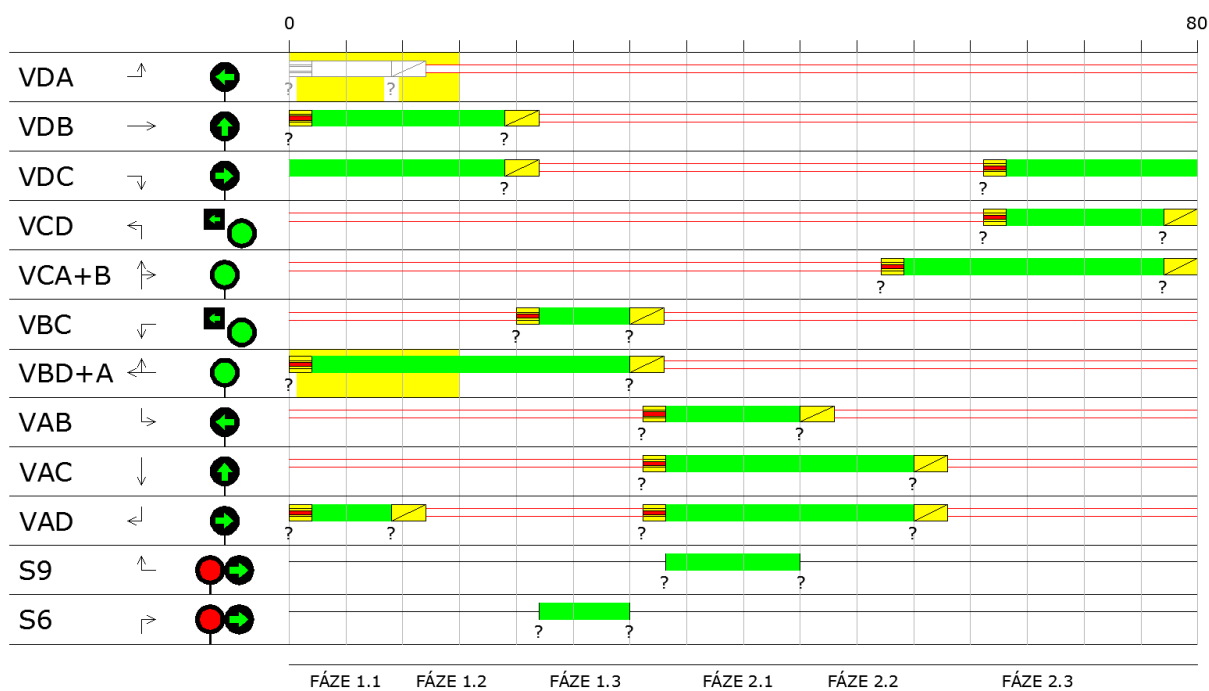
$$Z_2 = Z_F - Z_I \quad (7.7)$$

kde

Z_1 (Z_2) je doba zelené pro směry 1 (2) [s]
 I_1 (I_2) součet intenzit ve směrech 1 (2) [voz/h]
 PP_1 (PP_2) počet pruhů ve směru 1 (2)
 Z_F doba fáze [s]

V případě, že některé levé odbočení je zakázáno, resp. některá levá odbočení jsou zakázána, tak doba zelené přechází zcela na kolizní křižovatkový pohyb. Princip je tedy zachován – v zakázaném směru je nulová intenzita, resp. nulový podíl na celkovém zatížení, tzn. nulový podíl na době zelené. Uplatňována ale není podmínka minimální doby zelené (pro zakázané odbočení).

Pro potřeby Dijkstrova algoritmu a hledání trasy nejmenšího odporu se zakázanému odbočení přiřazuje prohibitivní sazba 300 s.



Obr. 7-3. Signální plán při zákazu křižovatkového pohybu č. 1. O jeho dobu zelené a dobu jednoho mezičasu je prodloužena signální skupina protisměrných pohybů č. 8 a 9.

7.3.2 Výpočet kapacity a doby zdržení

Pro každý vjezd se v duchu TP 235 vypočte kapacita jednotlivých vjezdů a poté výpočet střední doby zdržení. Vjezdem se zde rozumí jeden řadičí pruh. Je-li zakázáno levé odbočení, tak v protisměru je uspořádání pravý pruh pro jízdu vpravo a přímo a levý pruh pro jízdu přímo. Tato dvojice pruhů je potom považována za jeden vjezd.

Je-li kapacita křižovatky překročena, nelze výpočet doby zdržení použít přidělí se prohibitivní sazba doby zdržení 300 s, která odradí další řidiče (z následujících pří-

růstků zatížení) od použití této již přetížené křižovatky. Není-li kapacita křižovatky překročena, dojde k výpočtu doby zdržení dle TP 235. Všechny vstupy pro tento výpočet jsou již známy, efektivní doba zelené je zjednodušeně a na stranu bezpečnou uvažována v totožné výši jako doba zelené.

Cestovní doba, tzn. odpor hrany pro běh Dijkstrova algoritmu v dalším kroku postupného zatěžování sítě, je vypočtena jako doba zdržení způsobená křižovatkou dle postupu v předchozích odstavcích plus doba, za kterou je možno ujet vzdálenost od předchozí křižovatky rychlostí 50 km/h. Tento postup vychází z předpokladu, že limitujícím prvkem sítě je uzel (křižovatka), nikoli hrana (mezikřižovatkový úsek).

7.4 OPTIMALIZACE – GENETICKÝ ALGORITMUS

Použitou metodou optimalizace je genetický algoritmus. Jedince představují varianty zákazů odbočení, přičemž jednotlivými geny jsou jednotlivé dvojice protisměrných křižovatkových pohybů – hodnoty genů (alely) mohou nabírat hodnotu 0 (oba pohyby povoleny), 1 (levé odbočení zakázáno) nebo 2 (pravé odbočení a jízda přímo zakázány – nakonec použito jen v prvotním testování).

Nulová generace vzniká náhodně – pravděpodobnost alely č. 0 je zvolena 1/15, č. 1 je 13/15 a č. 2 je 1/15. Uvedené pravděpodobnosti byly zvoleny vzhledem k tomu, že při zkušebním nastavení samých nul, jedniček a dvojek vyšla nejlépe varianta s jedničkami. Tito tři nestandardní jedinci jsou v nulové generaci ponechání, tzn. náhodných je zbylých 57 jedinců.

Nová generace vzniká kombinací prosté reprodukce, křížení a mutace. Dvojice rodičů má vždy dva potomky.

Dvojice rodičů z množiny jedinců se vybírá náhodně se zohledněním fitness, což je součet cestovních dob všech vozidel (menší hodnota je lepší). Postupuje se od nejlepšího k nejhoršímu jedinci a u každého jedince se losuje – je-li náhodné číslo (0 až 1) menší než ξ , hledání rodiče se zastaví.

	Jedinci										
Pořadí	1	2	3	4	5	6	7	8	...	60	61
Fitness	1875	1890	1920	1952	2010	2068	2160	2205	...	3560	3800
Náhodné číslo	> ξ	> ξ	> ξ	> ξ	< ξ						
vybraný rodič	ne	ne	ne	ne	ano						

Tab. 7-4. Příklad hledání rodiče. Losování začíná u jedince s fitness 1875 a k dalšímu jedinci se přesouvá tak dlouho, dokud nepadne číslo menší než ξ .

Poté se losuje, zda se provede křížení, nebo prostá reprodukce. Při náhodném čísle větším než ξ se provádí uniformní křížení, tzn. pro každý gen se losuje, zda se prohodí. Pravděpodobnost prosté reprodukce se zvyšuje tím, že algoritmus hledání rodičů může vybrat stejného otce i matku, kdy výsledek křížení je stejný jako prosté reprodukce.

Po křížení nebo prosté reprodukci, kdy se u každého genu jedince nové generace losuje, zda nemá dojít k přiřazení náhodné alely. Pravděpodobnost přiřazení konkrétní alely je stejná jako u nulté generace.

7.5 VÝSLEDEK OPTIMALIZAČNÍHO ALGORITMU

V tabulce 7-18 je ukázka výsledku optimalizačního algoritmu popsaná v předchozích odstavcích. Parametry sítě byly zvoleny:

- dopravní zatížení celé sítě 2 500 voz/h
- rozsah sítě 25 průsečných křižovatek
- vzdálenost křižovatek 500 ± 150 m
- rychlost mezi křižovatkami 50 km/hod

Pro kalibraci genetického algoritmu bylo na základě průběžných pokusů zvoleno $\alpha = 0,1$ a $\beta = 0,1$. Zadáno bylo 7 simulací vždy s 60 jedinci po dobu 20 generací.

generace	simulace						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1219	1303	1363	1192	928	1533	1025
2	1217	1328	1353	1179	928	1537	1016
3	1191	1317	1323	1169	928	1537	1016
4	1191	1323	1350	1169	928	1444	1014
5	1187	1321	1312	1162	926	1402	1014
6	1187	1323	1306	1162	924	1396	1014
7	1187	1321	1306	1157	924	1396	1014
8	1187	1323	1299	1155	919	1388	1016
9	1187	1323	1299	1155	921	1388	1014
10	1187	1323	1293	1155	921	1379	1014
11	1187	1323	1293	1155	919	1379	1016
12	1187	1323	1293	1155	919	1379	1014
13	1187	1323	1295	1155	921	1379	1014
14	1187	1323	1295	1155	919	1379	1014
15	1187	1323	1295	1155	919	1379	1014
16	1187	1323	1295	1155	919	1379	1014
17	1187	1323	1295	1155	919	1379	1014
18	1187	1323	1295	1155	919	1379	1014
19	1187	1323	1295	1155	921	1379	1014
20	1187	1323	1295	1155	921	1379	1014
pokles	-3%	2%	-5%	-3%	-1%	-10%	-1%
vše zakázáno	2730	2767	2288	2002	1556	2862	2382
vše povoleno	1333	1493	1491	1306	942	1572	1025

Tab. 7-5. Ukázka výsledku běhu optimalizačního algoritmu. Provedeno bylo sedm simulací, každá s dvaceti generacemi. Uvedena jsou vždy fitness nejlepšího jedince dané generace, tzn. nejkratší celková cestovní doba [hod.] z posuzovaných uspořádání. Na spodních řádcích je ještě uvedeno zkrácení celkové cestovní doby a cestovní doba ve variantách „vše povoleno“ a „vše zakázáno“.

Je patrné, že v tomto příkladě dojde při jedné ze simulací ke snížení celkové cestovní doby (tj. nikoli pouze doby zdržení) o 10 %. Tento výsledek pochopitelně nelze paušalizovat, neboť vždy bude záležet na konkrétních parametrech optimalizo-

vané dopravní síť. Z tabulky 7-5 je vidět, že nejlepšího zlepšení bylo dosaženo při největší výchozí cestovní době, tzn. při nejhustší dopravě – to je logické, neboť nejsou-li křižovatky nadměrně vytíženy, nedochází na nich k zdržení odstranitelnému zakázáním některého z odbočení.

Je zajímavé, že na tomto i jiných pokusech prováděných s optimalizačním algoritmem se projevuje, že varianta „vše povoleno“ (žádná zakázaná odbočení) je dobrá, zatímco varianta „vše zakázáno“ (zakázána všechna levá odbočení) je špatná. Vždy se ale najde varianta lepší než „vše povoleno“, tzn. samotné hledání nejlepšího uspořádání levých odbočení se vyplatí.

Výpočet příkladu (7 simulací, 20 generací s 60 jedinci) běžel na běžném kancelářském počítači přibližně 8 hodin. Toto je v současné době výrazné omezení, neboť omezuje rozsah úlohy jak co se týče pokusů s různými nastaveními algoritmu.

8 ZÁVĚR A DOPORUČENÍ

Cílem této práce bylo navrhnout **Algoritmus pro hledání nejlepší konfigurace dopravní sítě**, tzn. pro **optimalizaci dopravní sítě**. Důvodem snahy o návrh tohoto algoritmu byla komplexnost dopravní sítě, kdy při možnosti volby trasy uživatelem není možné jednoduše stanovit dopad plánovaného opatření na křehkou rovnováhu mezi dopravním zatížením a plynulostí dopravy, neboť oba tyto faktory se vzájemně ovlivňují. Výpočet rovnovážného stavu je znám a provádí se pomocí strategického modelu dopravní sítě, jehož postupný nebo iterační běh dokáže prognózovat chování uživatelů dopravní sítě ve vztahu k reálné, tzn. omezené kapacitě dopravní sítě. Na dopravní síti lze realizovat nepřeberné množství opatření v ještě větším počtu variant. Stávající intuitivní hledání optimální varianty zkoušením různých opatření a modelováním jejich dopadu je zdoluhavé a o nalezení skutečně optimálního řešení ze všech možných variant, nikoli jen těch zvolených k posouzení, je možné dost dobře pochybovat. Nabízí se tak otázka, zda lze proces optimalizace učinit systémovějším a zároveň ještě i lépe plně automatickým. Právě systematické a zároveň automatické hledání optimální konfigurace dopravní sítě bylo předmětem algoritmu, který je spolu s východiský ke své tvorbě popsán v předchozích kapitolách.

Obecnými požadavky pro použití navrženého algoritmu bez ohledu na konkrétní úlohy a konkrétní dopravní síť jsou:

- schopnost definovat optimalizační kritérium, tzn. stanovit, která z variant je nejlepší;
- schopnost navrhovat všechny reálně možné varianty a navrhovat je automaticky, tzn. jen s použitím univerzální šablony;
- schopnost všechny varianty ohodnotit z hlediska dopadu na dopravní síť.

Jsou-li uvedené podmínky splněny, tak již stačí aplikovat vhodnou optimalizační metodu, kterou byl v této práci zvolen genetický algoritmus.

Z celé řady opatření na celé řadě různých dopravních sítí byla vybrána jedna úloha, na které byl navržený algoritmus otestován. Bylo to levé odbočení, které na křižovatkách pozemních komunikací působí větší či menší problémy. Proto je také běžně omezováno, přičemž zákaz odbočení způsobí nutnost jistému počtu vozidel

změnit trasu, čímž se spolu se změnou doby zdržení na křižovatce se zakázaným odbočením změní dosavadní odpor jednotlivých prvků silniční sítě a dojde k menšímu či většímu přerozdělení dopravní zátěže. Na každé křižovatce jsou čtyři levá odbočení, což dělá šestnáct variant jen na jediné křižovatce. Při uvažování zákazů na všech křižovatkách dochází k růstu počtu variant do astronomických hodnot – v modelovém případě s dvaceti pěti křižovatkami se počet variant dostává do řádu deseti na třicátou. Velké množství variant znemožňuje prosté vypočtení všech variant a jejich následné seřazení od nejlepší – nezbytné je použít sofistikovanější optimalizační metodu. Ta je zkomplikována nutností počítat jednotlivé varianty strategickým dopravním modelem.

Vlastní optimalizace probíhá pomocí genetického algoritmu, tj. postupu, který stejně jako v přírodě nechává přežít nejsilnějším-nejlépeším jedincům-variantám. Tato metoda je heuristická, tzn. nabízí nám řešení, o kterém nelze s jistotou říct, zda je skutečně nejlepší, ani se nedá říct, jak moc je nalezené řešení vzdáleno od skutečného řešení. Hovoří se proto o pseudooptimálním řešení.

Při testu optimalizačního algoritmu bylo dosahováno úspory až deset procent z cestovní doby. Tento výsledek samozřejmě nemůže být paušalizován, neboť závisí na typu úlohy, dopravní síti a jejím zatížení.

8.1 POSTŘEHY Z ŘEŠENÍ ÚLOHY

Cíl práce, návrh funkčního algoritmu se podařilo splnit. Algoritmus byl navržen jak z ideového hlediska, tzn. metodiky výpočtu, tak z funkčního hlediska ve formě funkčního zdrojového kódu. Druhý aspekt je sice nezbytný pro běh algoritmu, ale z hlediska dopravního inženýra je mnohem zajímavější aspekt první, který bude dále rozebrán.

Základní rozdělení algoritmu je na část optimalizační a na část dopravního modelu. Dopravní model počítá jednotlivé varianty, které pak podléhají optimalizaci. Pro funkční návrh dopravního modelu bylo nezbytné řešit přidělení zatížení dopravní sítě, výpočet odporu dopravní sítě, tzn. doby zdržení na jednotlivých křižovatkách. Nutné bylo také generovat všechny možné, ale přitom nikoli nesmyslné varianty zákazu levých odbočení.

Přidělení cest na síť vychází z Dijkstrova algoritmu, který slouží pro hledání trasy nejmenšího odporu, v tomto případě trasy nejkratší. Dijkstrův algoritmus pracuje s odporem hran (komunikací), což se ukázalo jako nevhodné, protože z podstaty úlohy je spíše rozhodující odpor uzlů (křižovatek), který je navíc různý pro jednotlivé křižovatkové pohyby. Proto byla použita inverzní síť – hrany sítě byly nahrazeny uzly a tyto nové uzly propojeny hranami, reprezentujícími jednotlivé křižovatkové pohyby.

Automatický návrh signálního plánu si vyžádal přípravu obecného schématu fází, které bylo s to postihnout všech šestnáct variant zákazů na jedné křižovatce a zároveň různé kombinace dopravního zatížení. Navržené univerzální schéma kombinuje běžné fáze pro levé odbočení, přičemž obsahuje v sobě varianty jak pro větší intenzitu při jízdě přímo, tak pro větší intenzitu při odbočení vlevo. Schéma umožňuje

vypustit každou ze čtyř signálních skupin pro odbočení vlevo včetně všech kombinací tak, aby celý koncept signálního plánu nebyl narušen při žádné z šestnácti variant zákazů levého odbočení.

Výpočet doby zdržení byl použit standardizovaný českými technickými předpisy – kalibrace modelu byla tedy zajištěna předpokládanou kalibrační hodnotou a postupů zavedených TP 235, resp. jejich německým vzorem HBS. Jako významný problém se projevil výpočet cestovní doby, resp. doby zdržení při překročení kapacity. Použitou metodiku výpočtu doby zdržení nelze při překročení kapacity použít, což koncem vyplývá z podstaty překročení kapacity – ke křižovatce přijíždí více vozidel, než kolik jich může projet, následkem čehož se fronta vozidel stejně jako doba zdržení zvětšují do nekonečna; v praxi se zvětšují do doby snížení dopravní zátěže vlivem denních fluktuací dopravní zátěže. Dobu zdržení tak bylo při překročení nutno nastavit fixně, a to větší, než při zatížení jen o trochu nižším než je kapacita. Při iteracím výpočtu ale kvůli této fixní, v podstatě prohibitivní sazbě došlo k rozkmitání tras mezi dvojicí variant, kdy se střídaly křižovatky s překročenou a nepřekročenou kapacitou. Jako řešení bylo úspěšně zvoleno postupné zatěžování dopravní sítě, kdy se další přidávané části zátěže vyhýbají křižovatkám s již vyčerpanou kapacitou, neboť ty jsou pro běh Dijkstrova algoritmu penalizovány prohibitivní sazbou.

Běh genetického algoritmu se ukázal velmi citlivý na zvolené pravděpodobnosti, které předurčují výskyt mutací, křížení a obecně výběr jedinců stávající generace pro generaci budoucí a které slouží jako jeho kalibrace. Obecně se dá říct, že buď se nastaví konzervativní hodnoty, které zaručí pomalou, ale relativně jistou konvergenci, nebo se zvolí méně konzervativní hodnoty, které zajistí sice rychlou konvergenci, která je ale zpravidla vystřídána ještě rychlejší divergencí, kdy se místo lepších řešení začínou vracet řešení horší. Ladění genetického algoritmu by si zasloužilo další pozornost, dá se říct, že by bylo vhodné navrhnout jeho optimalizaci, tzn. optimalizaci optimalizačního algoritmu. Osvědčilo se nastavení náhodně generovaných jedinců-variant nulté generace v obdobných parametrech, tzn. s obdobným počtem zákazů jako byly výsledky předchozích optimalizací.

Přestože byly varianty zákazů pro nultou generaci genetického algoritmu vybírány náhodně, vždy mezi ně byly vloženy povinné varianty, kdy zakázána byla všechna levá odbočení, a kdy naopak byla všechna levá odbočení povolena. Varianta "vše zakázáno" vycházela suverénně nejhůře, naopak varianta "vše povoleno" vycházela velmi dobře, ale nikoli nejlépe – nejlepší varianta byla z hlediska cestovního času zhruba až o 10 % lepší (viz kap. 7.8). Zde je ale nutné zdůraznit, že cílem navrženého algoritmu není a nemůže být definovat obecně platné nejlepší řešení, protože každá síť je jiná, ať už rozsahem, tvarem, kapacitou, dopravním zatížením či dalšími aspekty. Algoritmus je určen právě pro řešení jednotlivých sítí, které jsou vždy z toho či onoho hlediska originálem.

8.2 PRAKTICKÉ VYUŽITÍ

Modelování dopravní sítě je běžnou činností při návrhu strategických dokumentů, jako jsou generely dopravy, územní plány či studie hodnotící zásadní dopravní stavby. Vytvoření dobrého modelu, jehož výsledky lze brát vážně i pro důležitá rozhodnutí, je náročná a drahá záležitost, a to zejména, je-li dělán ad hoc pro jednotlivou zakázku namísto průběžné aktualizace dlouhodobě využívaného modelu. Pořád se ale jedná o zlomek prostředků, které se vynakládají na výstavbu, údržbu a provoz dopravní sítě, nemluvě o nákladech uživatelů a o externalitách jen obtížně vyčíslitelných penězi. Využití optimalizační nadstavby nad strategické modely dopravní sítě by vedlo s nízkými náklady k významnému užitku.

Algoritmus vytvořený v rámci této disertační práce byl popsán na příkladu levých odbočení na náhodně vytvořené síti a náhodně vytvořeného zatížení. To ale neznamená, že je použitelný jen pro levá odbočení a jen pro náhodnou síť. Pro řešení jiného konkrétního úkolu jej lze modifikovat, pokud bude možné dodržet podmínky uvedené výše, tzn. schopnost automatické tvorby a hodnocení jednotlivých variant. Pro řešení konkrétní dopravní sítě pak stačí místo náhodných parametrů zadat parametry skutečné, což je sice velmi pracné, ale běžně dělané pro účely běžných modelů. Zároveň je možné a velmi vhodné algoritmus použít nad již využívaným SW pro strategické modelování, např. nad Matsimem. Dlouhodobě vyvíjené nástroje pochopitelně nabízejí více možností než nástroj ad hoc připravený pro potřeby ověření optimalizačního algoritmu.

Jistou překážkou pro aplikace optimalizace je výpočetní náročnost – místo jednoho výpočtu modelu je nutné počítat řadu variant, byť díky použití genetického algoritmu se jedná o naprostý zlomek celkového počtu variant. Řešení je v míře přesnosti modelu, tzn. v míře zjednodušení, kterou při modelování přijímáme – v zásadě každý model je pouze zjednodušením skutečnosti a pro předvýběr vhodné varianty z velkého množství variant se jeví velké zjednodušení jako přijatelné.

Závěrem komentáře o praktickém využití zkušeností z této disertační práce je vhodné připomenout okřídlené přísloví měněné dle okolností, kde je použito – dopravní model je dobrý sluha, ale zlý pán. Není záhodno bezmezně věřit výsledkům modelu, byť se zdá, resp. byť je prezentován jako sebelepší. Na druhou stranu umožňuje dobrý dopravní model svým autorům nahlédnout do budoucího chování uživatelů dopravní sítě výrazně lépe, než spekulování, intuice a kvalifikovaný odhad.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

PŘEDPISY

Tuzemské

BÍLÁ KNIHA. Plán jednotného evropského dopravního prostoru – vytvoření konkurenceschopného dopravního systému účinně využívajícího zdroje; 2011

Zákon č. 266/1994 Sb., o dráhách

Zákon č. 13/1997 Sb., o pozemních komunikacích

Zákon č. 361/2000 Sb., o provozu na pozemních komunikacích

Zákon č. 296/2009 Sb., o sčítání lidu, domů a bytů v roce 2011

Zákon č. 194/2010 Sb., o veřejných službách v přepravě cestujících

Vyhláška Ministerstva dopravy a spojů č. 104/1997 Sb., kterou se provádí zákon o pozemních komunikacích

Vyhláška Ministerstva dopravy č. 177/1995 Sb., kterou se vydává stavební a technický řád drah

ČSN 73 6100-1 Názvosloví pozemních komunikací – Část 1: Zákl. názvosloví; říjen 2008

ČSN 73 6101 Projektování silnic a dálnic;

ČSN 73 6102 Projektování křižovatek na pozemních komunikacích; listopad 2007
Změna Z1; srpen 2011

Edice 2; červen 2012

ČSN 73 6110 Projektování místních komunikací; leden 2006

Změna Z1; únor 2010

ČSN 73 6380 Železniční přejezdy a přechody; duben 2004

TP 81 Navrhování světelných signalizačních zařízení pro řízení silničního provozu; 1996

TP 135 Projektování okružních křižovatek na silnicích a místních komunikacích, 2000

TP 188 Posuzování kapacity neřízených úrovnových křižovatek; 2008

TP 189 Stanovení intenzit dopravy na pozemních komunikacích; 2007
II. vydání; 2012

TP 225 Prognóza intenzit automobilové dopravy; 2010
II. vydání; 2012

TP 234 Posuzování kapacity okružních křižovatek; 2011

TP 235 Posuzování kapacity světelně řízených křižovatek; 2011

TP 236 Posuzování kapacity mimoúrovňových křižovatek; 2011

Metodický pokyn (Ministerstva dopravy ČR) 11/1995 Hodnocení variant tras pozemních komunikací z technického, dopravního a ekonomického hlediska

Prováděcí pokyny (Ministerstva dopravy ČR) pro hodnocení ekonomické efektivity projektů silničních a dálničních staveb; 2012 (přílohy aktualizovány 2014)

Zahraniční

SLOVENSKÁ REPUBLIKA

TP 07/2013 Prognózovanie Výhľadových intenzít na cestnej sieti do roku 2040; 2013

TP 10/2010 Výpočet kapacít pozemných komunikácií; 2010

SPOJENÉ KRÁLOVSTVÍ

Design Manual for Roads and Bridges; 2014

SPOJENÉ STÁTY AMERICKÉ

Highway Capacity Manual; 2010

SPOLKOVÁ REPUBLIKA NĚMECKO

Handbuch für die Bemessung von Strassenverkehrsanlagen; 2009

PUBLIKACE

ADÁMEK, Jan, 2011. *Vliv otevření části Pražského okruhu v úseku Slivence-Modletice (dálnice D1) na automobilovou dopravu*. Silniční obzor. Praha: Česká silniční společnost, roč. 72, č. 2.

ADÁMEK, Jan, 2011b. *Intenzita, nehodovost a kapacita neřízených a řízených křižovatek v Praze 2009-2010*. Silniční obzor. Praha: Česká silniční společnost, roč. 72, č. 12.

ADÁMEK, Jan, 2014. *Preference MHD světelnou signalizací: ano či ne*. Česko-slovenský dopravák. XIII, č. 5, s. 34-48.

Akçelik, Rahmi, 1991. *Travel time functions for transport planning purposes: Davidson's function, its time-dependent form and an alternative travel time function*. Australian Road Research 21 (3), pp. 49–59. (Minor revisions: December 2000).

APELTAUER T, 2010. *Generické vlastnosti modelů dopravního proudu*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav automatizace inženýrských úloh a informatiky. 133 s., 26 s. příloh. Doktorská práce. Vedoucím práce byl doc. RNDr. Jiří Macur, CSc.

APELTAUER, Tomáš, 2011. *Rozvoj moderních dopravních inteligentních systémů: Využití simulačních modelů v dopravě*. [online]. s. 36 [cit. 2014-11-18]. Dostupné z: www.romodis.cz

BRAUNOVÁ, Dagmar, 2010. *Nová expresní autobusová linka 125 po Jižní spojnici spojí Smíchovské nádraží s Jižním Městem*. BUSportal. Dostupný také z: <http://www.busportal.cz/modules.php?name=article&sid=8017>.

ČEJKA, Jiří, 2008. *Návrh systému veřejné linkové dopravy: s podporou matematických metod*. Disertační práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera.

ČÍHAL, Robert, 2009. *Možnosti popisu soukromých drah a vlečků v integrovaném IS o železniční dopravní cestě v ČR*. [online]. [cit. 2015-02-25]. Dostupné z: <http://popis-trati.fd.cvut.cz/clanky-a-prispevky/soukromi-provozovatele-drahy-a-vleckari/moznosti-standardizovaneho-popisu-soukromych-drah-v-integrovanem-is-o-zeleznicni-dopravni-cestech-v-cr>

DOKOUPIL, Jaroslav a kol., 2010. ARCH.DESIGN. *Územní plán města Brna: Koncept*.

HALL, Fred L, 2011. *Traffic Flow Theory: Traffic Stream Characteristics*. Transportation Research Board.

HROMÁDKA, Vít, Tomáš CHORÁZY, Martin SMĚLÝ, Martin VŠETEČKA a Tomáš VOLAŘÍK, 2014. *Systém sdílení kol Bike Sharing System: Studie proveditelnosti*.

JASTRZEBSKI, Wacław P, 2000. *Volume delay functions*. In: 15th International EMMU/2 Users' Group Conference.

KOKEŠ, Ondřej, 2011. *Úprava křižovatky silnic I/34 a II/164 u Jindřichova Hradce*. Brno, s přílohami a výkresy. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Michal Radimský, Ph.D.

KŘIVDA, Vladimír a Václav ŠKVAIN, 2013. *Městské komunikace a křižovatky: Modelování v dopravě*. [online]. [cit. 2014-11-18]. Dostupné z: <http://kds.vsb.cz/mkk/>

KUTIL, Michal. 2010. *Modeling and Optimization of Traffic Flow in Urban Areas*. Prague, Doctoral Thesis. Czech Technical University in Prague, Faculty of Electrical Engineering, Department of Control Engineering. Vedoucí práce Zdeněk Hanzálek.

LANDA, Jiří a kol. CITYPLAN, 2003. *Aplikace dopravně logistických přístupů v městských aglomeracích*.

MACHUTOVÁ, Marcela, Jiří ČADEK, Čeněk SUDEK a Leoš TRŽIL, 2009. *Historie dopravní policie*. Vyd. 1. Praha: Milpo media, ISBN 978-80-87040-14-0.

MARTALOS, Jan a Aleš RICHTER, 2008. *Metody prognóz automobilové dopravy*.

MEDELSKÁ, Viera, Petr JIRAVA, Dušan NOP a Jiří ROJAN, 1991. *Dopravné inženýrstvo*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 374 s. ISBN 80-050-0737-X.

POLACH, Vlastimil a Tomáš VICHÉREK, 2012. *Automatizace řízení dopravy*. Reportér AŽD Praha: Technický zpravodaj. 2/2012.

ŘSD, 2013. *Silnice a dálnice v České republice*.

SKOVAJSA, Ján, 2013. *Nové pojetí dálniční sítě*.

SÚKENNÍK, Peter, Petr HOFHANSL, Martin VARHULÍK, Zuzana VOLFOVÁ, Marek ŠÍDA, Tomáš APELTAUER, Martin VŠETEČKA, Jiří APELTAUER, Michal RADIMSKÝ a Martin SMĚLÝ, 2013. *Příručka pro tvorbu a hodnocení mikroskopických simulací*. Praha.

ŠLEGR, Petr, 2012. *Rychlá železnice i v České republice: High speed rail even in the Czech Republic*. Praha: Centrum pro efektivní dopravu, 2012, 246 s. ISBN 978-80-905005-0-1.

ŠÍMA, Jiří a Roman NERUDA, 1996. *Teoretické otázky neuronových sítí*. Praha, 390 s. ISBN 80-858-6318-9.

TEDA, Jaroslav, 2005 *Genetické algoritmy a jejich aplikace v praxi*. Programujte.com. Dostupné z: <http://programujte.com/clanek/2005072601-geneticke-algoritmy-a-jejich-aplikace-v-praxi/>

TUZAR, Antonín, Petr MAXA a Vladimír SVOBODA, 1997. *Teorie dopravy*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, 278 s. ISBN 80-010-1637-4.

VANČURA, Pavel, 2008. *Racionalizace dopravní obslužnosti regionu*. Disertační práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra technologie a řízení dopravy.

DATABÁZE A ZDROJE DAT

Celostátní sčítání dopravy v roce 2010, dostupné na <http://www.rsd.cz>

Sčítání lidu, domů a bytů 2011, dostupné na <http://www.czso.cz/>

ŽIVOTOPIS

Narozen: 11. února 1986 v Brně

Bydliště: Gorazdova 1, 602 00 BRNO

Kontakt: vsetecka.m@fce.vutbr.cz

VZDĚLÁNÍ

- Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební
obor Konstrukce a dopravní stavby – specializace pozemní komunikace
 - doktorský studijní program od roku 2011
 - magisterský studijní program 2009 – 2011
 - bakalářský studijní program 2005 – 2009
- Gymnázium Matyáše Lercha, Brno
 - všeobecné střední vzdělání (zakončeno maturitou) 1997 – 2005

ZAMĚSTNÁNÍ

- Od roku 2014 akademickým pracovníkem (asistentem) VUT v Brně, Fakulty stavební, Ústavu pozemních komunikací
- Od roku 2011 technicko-hospodářským zaměstnancem VUT v Brně, úvazek se váže na níže uvedené projekty

VÝZKUMNÉ PROJEKTY (výběr)

- Projekt TA ČR TA04031141 Inovativní způsob dynamického řízení světelně řízených křižovatek...
- Projekt TA ČR TA01030582 Jednotný systém dat ve veřejné dopravě Projekt TA ČR TA01030305 Zvýšení plynulosti dopravy a průjezdní kapacity vozovky v místech s dočasným omezeným průjezdem...
- Projekt TA ČR TA01031193 Aplikace mikroskopických simulačních nástrojů k evaluaci a optimalizaci dopravně-inženýrských řešení...
- Projekt specifického výzkumu VUT v Brně FAST-S-15-2881 Jízda přes dva jízdní pruhy (řešitel)

PUBLIKACE (výběr)

VŠETEČKA, M. Rychlá autobusová doprava. In Mobilita obyvatelstva 2014. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2014. s. 78-86. ISBN: 978-80-214-4860- 5.

VŠETEČKA, M.; NOVÁK, M. Optimalizace dopravní sítě s využitím genetického algoritmu. In RDIT 2014. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2014. s. 19-22. ISBN: 978-80-248-3613- 3.

APELTAUER, J.; VŠETEČKA, M.; APELTAUER, T.; SMĚLÝ, M.; ŠČERBA, M. Portable Active Traffic Management in Working Zones. In 2013. ISBN: 978-80-905442-0- 8.

ŠČERBA, M.; APELTAUER, J.; VŠETEČKA, M.; APELTAUER, T. Dynamic traffic management on motorways during reconstruction works. Archives of Transport Systems Telematics, 2013, roč. 6, č. 3, s. 33-37. ISSN: 1899- 8208.

VŠETEČKA, M.; RADIMSKÝ, M.; APELTAUER, T.; NOVÁK, M. Jízda přes dva jízdní pruhy. Silnice a železnice, 2013, roč. 8, č. 5/ 2003, s. 114-116. ISSN: 1801- 822X.

VŠETEČKA, M.; APELTAUER, T. Zatěžovací dopravní modely – nástroj k efektivní dopravě. Nová železniční technika, 2013, roč. 2013, č. 3, s. 11-23. ISSN: 1210- 3942.

APELTAUER, J.; KRČMOVÁ, I.; APELTAUER, T.; VŠETEČKA, M. Traffic flow microsimulation. In CMDTUR 2012. 1. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, 2012. s. 401-403. ISBN: 978-80-554-0512- 4.

VŠETEČKA, M. Infrastruktura pro rychlou autobusovou dopravu. In XI. International Scientific Conference FCE TUKE. 2012. s. 1-6. ISBN: 978-80-553-0905- 7.

VŠETEČKA, M. Koncepce zastavování v městské hromadné dopravě. In RDIT 2012. Ostrava: VŠB - TUO, 2012. s. 149-158. ISBN: 978-80-248-2829- 9.

HOLCNER, P.; VŠETEČKA, M.; APELTAUER, J.; NOVÁK, J. Cíle regulace statické dopravy. Dopravní inženýrství, 2012, roč. 2012, č. 2, s. 29-30. ISSN: 1801- 8890.

PEDAGOGICKÁ ČINNOST

BM01 Pozemní komunikace I; BN03 Výuka v terénu; CM04 Dopr. inženýrství

PROJEKČNÍ ČINNOST

- Kapacitní posouzení řízení křižovatky silnic I/50 x II/416 a III/0501 formou SSZ –Slavkov u Brna, zadavatel Město Slavkov u Brna, 2015, SMĚLÝ, M.; VŠETEČKA, M., NOVÁK, M.; PATOČKA, M.; APELTAUER, J.; TILLHONOVÁ, V.
- Senica, Dopravní průzkum a kapacitní posouzení křižovatek v blízkosti autobusové stanice, zadavatel Slovenský hodváb PLUS, s.r.o., 2014, SMĚLÝ, M.; VŠETEČKA, M.,
- Kapacitní posouzení křižovatek ulic Vídeňské a K Železnici v Brně, zadavatel ABB, s.r.o., 2014, RADIMSKÝ, M.; VŠETEČKA, M., MATUSZKOVÁ, R.
- Dopravní průzkum a kapacitní posouzení křižovatek silnic II/608, III/0081 a III/00811 u Kralup n/V, 2013, SMĚLÝ, M.; VŠETEČKA, M., KRČMOVÁ, I.
- Dopravní průzkum a kapacitní posouzení křižovatek silnic I/55 a I/54, zadavatel Město Veselí nad Moravou, 2012, SMĚLÝ, M.; VŠETEČKA, M.