

**Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera**

**Simulace silničního provozu v rámci průsečných křižovatek
jako podpora dopravního inženýrství**

Bc. Radek Beran

Diplomová práce

2008

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Radek BERAN**
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**
Studijní obor: **Applikovaná informatika v dopravě**

Název tématu: **Simulace silničního provozu v rámci průsečných křižovatek jako podpora dopravního inženýrství**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Diplomová práce bude sloužit k demonstraci využití experimentální výzkumné metody simulace pro podporu dopravního inženýrství, přičemž má následující základní cíle:

- a. návrh plánu světelné signalizace pro vybranou průsečnou křižovátku a vyhodnocení kapacitních rezerv navrženého signálního plánu,
- b. výstavbu simulačního modelu dopravního provozu zmíněné průsečné křižovátky a jejího přilehlého okolí,
- c. realizaci série simulačních experimentů s tímto modelem,
- d. zpracování výsledků simulačních experimentů s akcentem na ukazatele uplatnitelné v dopravním inženýrství, grafické vyhodnocení kapacitního vytížení modelovaných úseků silniční sítě.

Zmíněný simulační model bude realizován v rámci prostředí simulačního nástroje AIMSUN NG.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy: 50 normostran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury: viz příloha

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Antonín Kavička, Ph.D.**
Katedra informatiky v dopravě

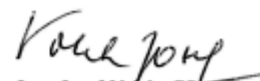
Datum zadání diplomové práce: **4. prosince 2007**

Termín odevzdání diplomové práce: **4. června 2008**



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.
děkan

L.S.



doc. Ing. Josef Vojtek, CSc.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 30. listopadu 2007

Příloha zadání diplomové práce

Seznam odborné literatury:

1. KŘIVÝ, I., KINDLER, E. *Simulace a modelování. Elektronická skripta Ostravské univerzity*, 2001. 146 s.
2. BANKS, J. *Handbook of simulation*. New York : Willey, 1998. 850 s. ISBN 0-471-13403-1.
3. HUŠEK, R., LAUBER, J. *Simulační modely*. Praha : SNTL/ALFA, 1987. 349 s.
4. KAVIČKA, A., KLIMA, V., ADAMKO, N. *Agentovo orientovaná simulácia dopravných uzlov*. Žilina : EDIS, 2006. 210 s. ISBN 80-8070-477-5.
5. KAVIČKA, A. *Závěrečná zpráva k simulační studii : provozní prověření variant dopravního řešení ulice Studentská v Pardubicích*. Pardubice : Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2004.
6. *Navrhování světelných signalizačních zařízení pro řízení silničního provozu : technické podmínky*. Ministerstvo dopravy České republiky. Odbor pozemních komunikací. 1. vydání. Brno: Centrum dopravního výzkumu, 1996. 109 s. ISBN 80-902141-2-6.
7. KAŠPAR, J., KAŠÍK, J., BARTEKOVÁ, L. *Dopravní řešení centra Pardubic : modelové hodnocení vlivu dopravy*. 2004. Závěrečná zpráva simulační studie firmy DHV CR, spol. s r. o.
8. PIPKOVÁ, B., et al. *Dopravní inženýrství : návod pro cvičení*. ČVUT. Fakulta stavební. 2. vydání. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1994. 144 s. ISBN 80-01-01226-3.
9. SLABÝ, P., UHLÍK, M. *Dopravní inženýrství I*. 1. vydání. Praha : Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2006. 101 s. ISBN 80-01-03365-1.

Souhrn

Práce demonstruje použití experimentální výzkumné metody simulace na případové studii, která prověřuje prognózovaný silniční provoz na Studentské ulici v Pardubicích, zaústěné do okružní křižovatky a světelně řízené průsečné křižovatky. Plán světelné signalizace, používaný v simulačním modelu, je navržen pomocí metody saturovaného toku, přičemž jsou uvedeny i další metody návrhu. Práce popisuje modelovací možnosti mikroskopického simulátoru silniční dopravy AIMSUN NG, v kterém je simulační model implementován. Je provedena podrobná verifikace modelu s důrazem na prověření nalezených slabých míst zmíněného simulačního softwaru a návrh řešení problematických situací při implementaci simulačních modelů v AIMSUN NG.

Klíčová slova

mikrosimulace; simulační studie; AIMSUN; silniční doprava; dopravní inženýrství; signální plán; metoda saturovaného toku

Title

Simulation of road traffic in scope of crossroads as a support for transport engineering

Abstract

The work demonstrates usage of simulation as an experimental research method in a case study, which checks up the predicted road traffic in the Studentská street in Pardubice. This street leads into the roundabout and the cross-roads with traffic lights. The traffic control plan which is used in the simulation model is designed through the use of saturated flow method, nevertheless, other design methods are also presented. The work describes modelling possibilities of microscopic simulator for urban and non-urban networks AIMSUN NG, which the simulation model is implemented in. A detailed verification of the model is accomplished, with emphasis on examination of found weak points of mentioned simulation software and proposal of solving problematic situations in implementation of simulation models in AIMSUN NG.

Keywords

mikrosimulace; simulační studie; AIMSUN; road transport; transport engineering; traffic control plan; saturated flow method

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé diplomové práce, doc. Ing. Antonínu Kavičkovi, Ph.D., za podnětné připomínky, cenné rady a odborné vedení této práce. Také bych chtěl poděkovat Ing. Viktoru Patrasovi za konzultace, které mi napomáhaly při rozšiřování obzorů v oblasti dopravního inženýrství.

Obsah

1 Úvod.....	11
2 Cíle diplomové práce.....	13
3 Simulace jako experimentální výzkumná metoda.....	14
3.1 Základní pojmy modelování a simulace.....	14
3.2 Životní cyklus simulační studie.....	17
3.3 Modelování a analýza vstupů simulátoru.....	20
3.4 Výstupní analýza simulačního experimentu.....	22
3.4.1 Získávání výstupních charakteristik simulačního výpočtu.....	22
3.4.2 Stanovení doby náběhu simulátoru.....	22
3.4.3 Klasifikace simulace z hlediska výstupní analýzy.....	23
3.4.4 Stanovení počtu replikací simulačního výpočtu.....	24
4 Světelně řízené křižovatky.....	26
4.1 Režimy světelného řízení.....	27
4.2 Koordinace světelně řízených křižovatek.....	28
4.3 Výhody a nevýhody světelně řízených a okružních křižovatek.....	28
4.4 Návrh pevného signálního plánu.....	29
4.4.1 Podkladové materiály.....	30
4.4.2 Stanovení mezičasů mezi signálními skupinami.....	30
4.4.3 Návrh fází signálního plánu.....	31
4.4.4 Stanovení délky cyklu a signálních dob zelené.....	33
4.4.5 Okrajové podmínky při návrhu signálního plánu.....	35
4.4.6 Výpočet cyklu a zelených pomocí metody saturovaného toku.....	36
4.5 Přehled metod pro kapacitní výpočty křižovatek.....	38
5 Výpočet signálního plánu vybrané průsečné křižovatky.....	40
5.1 Vymezení křižovatky a popis současného stavu.....	40
5.2 Podklady pro výpočet.....	43
5.3 Výpočet mezičasů.....	45
5.4 Stanovení sledu fází signálního plánu.....	49
5.5 Stanovení délky cyklu a zelených.....	51
5.5.1 Výpočet provedený pomocí metody saturovaného toku.....	51
6 Integrované simulační prostředí AIMSUN NG.....	54
6.1 Základní vlastnosti a charakteristiky produktu.....	54
6.1.1 Komponenty simulačního prostředí AIMSUN NG.....	55
6.2 Principy tvorby simulačního modelu v AIMSUN NG.....	56
6.2.1 Modelování dopravní infrastruktury.....	57
6.2.2 Parametrizace řízení dopravy.....	62
6.2.3 Modelování dopravní poptávky.....	67
6.2.4 Provádění simulačních experimentů.....	68
6.3 Možnosti výstupní analýzy simulačních experimentů.....	69
6.3.1 Výstupní statistické ukazatele v simulačním prostředí AIMSUN NG.....	69
6.3.2 Nastavení výstupů simulačního experimentu.....	71
6.3.3 Získání a zpracování výstupních údajů.....	73
6.3.4 Nahrávání záznamů z běhu simulačních výpočtů.....	76
7 Kapacitní porovnání analytického výpočtu signálního plánu s výsledky simulačních experimentů.....	78

8	Případová simulační studie provozu na Studentské ulici a přilehlých křižovatkách.....	91
8.1	Úvod k simulační studii.....	91
8.2	Formulace problému a vymezení objektu zkoumání.....	91
8.3	Cíle simulační studie.....	92
8.4	Vymezení systému na objektu zkoumání.....	92
8.5	Konceptuální model vymezeného systému.....	94
8.6	Vstupní data pro simulační model.....	94
8.7	Tvorba simulačního modelu.....	96
8.8	Verifikace simulačního modelu.....	96
8.8.1	Porovnání očekávaných a skutečných intenzit provozu.....	96
8.8.2	Prověření vlivu simulačního kroku na intenzity v modelu.....	100
8.8.3	Problémy zjištěné verifikačními SQL dotazy a sledováním animace simulačního výpočtu.....	104
8.9	Validace simulačního modelu.....	109
8.10	Plán simulačních experimentů.....	110
8.11	Provedení experimentů a analýza výstupních údajů.....	110
8.11.1	Délka běhu jedné replikace simulačního výpočtu.....	111
8.11.2	Doba náběhu simulátoru.....	111
8.11.3	Počet replikací simulačního výpočtu.....	114
8.11.4	Provedení simulačního experimentu.....	118
8.11.5	Posouzení celkové propustnosti silniční sítě.....	118
8.11.6	Posouzení charakteru provozu.....	121
8.11.7	Vizualizace výsledků simulačních výpočtů na úsecích silniční sítě.....	129
8.11.8	Porovnání výsledků simulační studie s výsledky předchozí studie Ing. Davida Svozila.....	129
8.12	Závěry simulační studie.....	135
9	Závěr.....	136
	Soupis bibliografických citací.....	138

Seznam obrázků

Obr 1. Životní cyklus simulační studie.....	18
Obr 2. Přehledná situace – podsít' tzv. 5. varianty komunikačního systému města Pardubic.....	41
Obr 3. Schéma uspořádání křižovatky a rozmístění návěstidel.....	42
Obr 4. Mapový podklad křižovatky Hradecká – Studentská – Bělehradská.....	43
Obr 5. Grafikon prognózy křižovatkových pohybů.....	44
Obr 6. Znárodnění dopravních proudů a kolizních ploch.....	46
Obr 7. Sestavení fázových skupin – graf bezkoliznosti.....	49
Obr 8. Fázové schéma.....	50
Obr 9. Integrované prostředí aplikace AIMSUN NG.....	57
Obr 10. Definice dopravních pohybů v křižovatce.....	60
Obr 11. Modelování propojení jízdních pruhů a vnitřních trajektorií v křižovatce.....	60
Obr 12. Modelování okružní křižovatky.....	61
Obr 13. Definice zelených v signálním plánu.....	63
Obr 14. Definice dopravní poptávky pomocí centroidů a O/D matic.....	67
Obr 15. Dávkové provedení všech replikací zahrnutých do průměru.....	69
Obr 16. Dialog pro nastavení výstupů simulátoru.....	72
Obr 17. Časové řady zobrazující vývoj průměrných hodnot ukazatelů.....	74
Obr 18. Označení vjezdů a rozmístění detektorů na křižovatce HSB.....	79
Obr 19. Obtížné zařazování odbočujících vozidel do postranních řadicích pruhů při nadměrných intenzitách přímého směru.....	89
Obr 20. Identifikace komunikací a jejich částí pro účely značení dopravních proudů.....	93
Obr 21. Nevhodné najetí vozidla do prostoru křižovatky neoznačené příznakem „Yellow Box“.....	105
Obr 22. Vhodné lokální zrušení příznaku „Yellow Box“ na výjezdu z větší křižovatky.....	105
Obr 23. Vyznačení plných dělicích čar na vjezdu do křižovatky.....	106
Obr 24. Dlouhodobé zastavení nákladního vozidla před dvojicí křižovatek.....	106
Obr 25. Prodloužení úseku mezi blízkými křižovatkami.....	107
Obr 26. Vzájemné zablokování vozidel na okružní křižovatce.....	107
Obr 27. Vzájemné zablokování vlevo odbočujících vozidel.....	108
Obr 28. Řešení vzájemného zablokování vlevo odbočujících vozidel.....	109
Obr 29. Vývoj kumulativní průměrné hustoty entit při náběhu simulace.....	113
Obr 30. Vývoj kumulativní průměrné rychlosti entit při náběhu simulace.....	113
Obr 31. Vývoj kumulat. prům. rychlostí na ulici Studentská v úseku „Hrad. – U Josefa“.....	115
Obr 32. Vývoj kumulat. prům. rychlostí na ulici Studentská v úseku „U Josefa – Hrad.“.....	116
Obr 33. Vývoj kumulativního průměrného času zpoždění entity.....	118
Obr 34. Ilustrační pohled na typicky zaplněnou silniční síť ve špičkovém intervalu.....	123
Obr 35. Ilustrační pohled na vytížení silniční sítě v jedné z nejméně příznivých replikací.....	123
Obr 36. Ilustrační pohled na tvorbu front v jedné z nejméně příznivých replikací.....	123
Obr 37. Podíl zpoždění na celkové době jízdy v nejméně příznivé replikaci č. 913.....	124
Obr 38. Výsledné statistické ukazatele pro osobní a nákladní vozidla v celém systému.....	126
Obr 39. Výsledné ukazatele pro osobní vozidla v jednotlivých směrech Studentské ulice.....	127
Obr 40. Výsledné ukazatele pro nákladní vozidla v jednotlivých směrech Studentské ulice.....	128
Obr 41. Porovnání statistických ukazatelů pro osobní vozidla.....	130
Obr 42. Porovnání statistických ukazatelů pro nákladní vozidla.....	131
Obr 43. Porovnání výsledků experimentů pro osobní vozidla ve směru „H → J“.....	132
Obr 44. Porovnání výsledků experimentů pro osobní vozidla ve směru „J → H“.....	132
Obr 45. Porovnání výsledků experimentů pro nákladní vozidla ve směru „H → J“.....	133
Obr 46. Porovnání výsledků experimentů pro nákladní vozidla ve směru „J → H“.....	133

Seznam tabulek

Tab 1. Výhody a nevýhody světelně řízených a okružních křižovatek.....	29
Tab 2. Intenzity provozu ve skutečných a jednotkových vozidlech.....	45
Tab 3. Kolizní body dopravních proudů P1 – P14, ke kterým je potřeba stanovit mezičasy..	47
Tab 4. Vyklizovací dráhy (Lv) [m].....	47
Tab 5. Najížděcí dráhy (Ln) [m].....	48
Tab 6. Mezičasy mezi dvojicemi dopravních proudů [s].....	48
Tab 7. Univerzální tabulka mezičasů pro signální skupiny [s].....	49
Tab 8. Výpočet rozhodujících mezičasů mezi fázovými skupinami.....	50
Tab 9. Metoda saturovaného toku (Websterova metoda).....	52
Tab 10. Základní lokální parametry úseků.....	59
Tab 11. Základní globální parametry simulačního modelu.....	64
Tab 12. Základní atributy typů vozidel.....	65
Tab 13. Přehled dopravně-inženýrských ukazatelů v aplikaci AIMSUN NG.....	70
Tab 14. Kapacitní propustnost max. vytižené křižovatky při různých hodnotách sim. kroku.	81
Tab 15. Kapacitní propustnost křižovatky při různých intenzitách dopravních proudů.....	84
Tab 16. Kapacitní propustnost křižovatky při plném zatížení všech vjezdů.....	88
Tab 17. Prognózané proudy chodců přes Studentskou ulici ve špičkové hodině.....	95
Tab 18. Střední hodnoty maximálních rychlostí automobilů a chodců na úsecích.....	95
Tab 19. Porovnání popt. a skutečně naměřených intenzit provozu v rámci verifikace.....	98
Tab 20. Porovnání popt. a skutečně naměř. intenzit provozu z dlouhého běhu replikace.....	100
Tab 21. Prům. vstupní a výstupní počty entit pro různé hodnoty sim. kroku před opravou..	102
Tab 22. Prům. vstupní a výstupní počty entit pro různé hodnoty sim. kroku po opravě.....	103
Tab 23. Vývoj kumulativní průměrné hustoty všech entit při náběhu simulace.....	112
Tab 24. Klíčové ukazatele vybrané pro stanovení počtu replikací.....	114
Tab 25. Průměrná rychlost na ulici Studentská v úseku „Hradecká – U Josefa“.....	115
Tab 26. Průměrná rychlost na ulici Studentská v úseku „U Josefa – Hradecká“.....	116
Tab 27. Průměrný čas zpoždění entity (oproti ideálnímu průjezdu sítě).....	117
Tab 28. Porovnání poptávaných a skutečně naměřených intenzit provozu.....	119
Tab 29. Porovnání intenzit z O/D matic a naměřených intenzit na vstupních úsecích.....	120
Tab 30. Porovnání intenzit z O/D matic a naměřených intenzit na výstupních úsecích.....	121
Tab 31. Statistické ukazatele pro osobní dopravu v rámci celé sítě.....	125
Tab 32. Statistické ukazatele pro nákladní dopravu v rámci celé sítě.....	125
Tab 33. Statistické ukazatele pro jednotlivé jízdní směry Studentské ulice.....	127
Tab 34. Prům. hodnoty ukazatelů naměřené v experimentech SSZ a OK pro celý systém....	130
Tab 35. Prům. hodnoty ukazatelů naměřené v experimentech SSZ a OK pro směry Studentské ulice.....	131

1 Úvod

Silniční doprava je v České republice tradičně oblíbeným druhem dopravy a současně trendy spojené s moderním životním stylem pouze přispívají k navyšování její atraktivity. Některé rodiny si při svém rychlém životním tempu pořizují i více automobilů a rovněž v nákladní dopravě je silniční doprava hojně využívána, neboť je při nízkých celkových nákladech dostatečně výkonná a umožňuje realizovat velké množství malých dodávek, které zajistí přesné časové pokrytí spotřebitelské poptávky.

V případě rostoucích intenzit dopravních proudů, které projíždějí centrem měst, je třeba často navrhnout dopravní řešení, která odvedou část řidičů ze zatížených center a povedou ke zklidnění městského provozu, tj. ke snížení exhalací, hluku a zvýšení bezpečnosti chodců. Nejedná se přitom o jednoduchá rozhodnutí, protože jsou často spojena s vysokými investičními náklady. Navíc v oblasti dopravního inženýrství se jedná o rozhodnutí s dlouhým časovým dopadem, která jsou v zásadě nevratná. Jednou z metod, která může zajistit dostatečné podklady pro provádění kvalifikovaných rozhodnutí v oblasti dopravního inženýrství, je experimentální výzkumná metoda simulace. Provést exaktní posouzení dopadu navrhovaného dopravního řešení na provoz v rámci rozlehlejší silniční sítě je prakticky nemožné, proto nachází simulace při prověřování plánovaných variant silniční infrastruktury široké uplatnění.

Také v Pardubicích je zvažováno nákladné dopravní řešení v podobě vybudování dvou nových severovýchodních propojení, která se stanou součástí kompletního okružního silničního systému města a měla by vést k výraznému zklidnění provozu v centru města. Zatímco vnější dopravní síť města je koncepčně vyřešena, stále jsou diskutovány dílčí problémy vnitřní dopravní sítě. V návaznosti na plánovaná opatření lze například očekávat více než trojnásobné navýšení intenzity provozu na Studentské ulici, která prochází univerzitním kampusem, v důsledku napojování vozidel na obchvat, resp. výjezdu vozidel z obchvatu směrem do centra města (viz. [16]).

Tato práce navazuje na simulační studii [16], která byla vypracována na Dopravní fakultě Jana Pernera Univerzity Pardubice a jejímž cílem bylo prověření charakteru provozu na Studentské ulici pro intenzity vozidel prognózované pro rok 2020. Tyto intenzity odpovídají navrhovanému dopravnímu řešení s vybudovaným městským obchvatem.¹ Při realizaci simulační studie byla tehdy použita simulace silničního provozu na makroskopické úrovni v simulátoru Villon. Tato diplomová práce dále navazuje na alternativní simulační studii Ing. Davida Svozila [24], která byla vypracována v mikroskopickém simulačním prostředí AIMSUN NG, a na simulační model Studentské ulice, který byl v rámci této studie zkonstruován.

Obě uvedené simulační studie prověřují variantu silniční sítě, v níž je Studentská ulice zaústěna do dvou okružních křižovatek, přičemž simulační studie provedená v rámci této diplomové práce uvažuje při stejných intenzitách provozu na střetu Studentské a Hradecké ulice průsečnou světelně řízenou křižovatkou. Tuto křižovátku je třeba geometricky věrně namodelovat v simulačním modelu, včetně pohybů ve vnitřním prostoru křižovátky, a dále je nutné sestavit pro ni pevný signální plán, který bude ve výsledném simulačním modelu představovat vhodnou substituci dynamického světelného řízení pro intenzity uvažované v odpolední špičkové hodině.

¹ Jedná se o tzv. 5. variantu komunikační sítě města Pardubice, která byla navržena firmou Highway Design z Hradce Králové a roku 2003 schválena zastupitelstvem města Pardubice

Výsledkem simulační studie bude dostatečně široká škála dopravně-inženýrských ukazatelů, která umožní posoudit plynulost dopravního provozu na Studentské ulici a přilehlých komunikacích pro intenzity provozu prognózované v odpolední špičkové hodině roku 2020 a zhodnotit případná rizika zahlcování provozu. Naměřené údaje budou porovnány s údaji, které zjistil kolega Svozil ve své simulační studii, tj. bude porovnána varianta, v níž je na střetu ulic Hradecká – Studentská – Bělehradská uvažována průsečná světelně řízená křižovatka, s variantou, která uvažuje dvoupruhovou okružní křižovatku.

Aby byla zajištěna velká vypovídací schopnost zkonstruovaného simulačního modelu, bude provedena pečlivá verifikace modelu, včetně porovnání kapacit vjezdů křižovatky zjištěných při analytickém výpočtu signálního plánu s kapacitami, které je schopen propustit simulační model. Simulační model, který je důkladně verifikován a částečně validován na základě porovnání výsledků s analytickým výpočtem, se může stát vhodným podkladem pro rozhodování v oblasti dopravního inženýrství.

2 Cíle diplomové práce

V následujících bodech jsou přehledně shrnuty hlavní cíle, které byly stanoveny pro vypracování této diplomové práce:

- Demonstrovat využití experimentální výzkumné metody simulace pro podporu rozhodování v dopravním inženýrství na případové studii, v které bude navržen plán světelné signalizace na vybrané průsečné křižovatce a vyhodnocena kapacitní rezerva navrženého signálního plánu,
- vytvořit simulační model dopravního provozu zmíněné průsečné křižovatky a jejího přilehlého okolí (Studentské ulice v Pardubicích),
- provést důkladnou verifikaci tohoto modelu a realizovat sérii simulačních experimentů s tímto modelem,
- zpracovat výsledky simulačních experimentů a porovnat klíčové dopravně-inženýrské výstupní ukazatele s výsledky předchozí realizované studie [24],
- výsledky simulačních experimentů přehledně prezentovat pomocí grafického znázornění hodnot vybraných ukazatelů na úsecích silniční sítě,
- popsat postupy využití při implementaci a verifikaci simulačního modelu v prostředí simulačního nástroje AIMSUN NG a doporučení pro modelování úseků silniční sítě a křižovatek v tomto produktu.

3 Simulace jako experimentální výzkumná metoda

Tato kapitola slouží jako teoretický podklad pro simulační experimenty realizované v této práci. Zavádí a objasňuje nejdůležitější pojmy z oblasti modelování a simulace. Přehled pojmů byl sestaven na základě elektronických skript [18] a sylabů k přednáškám [15].

3.1 Základní pojmy modelování a simulace

Předmětem modelování a simulace je studium objektů, které již mohou existovat v realitě, nebo by v ní existovat mohly (jsou projektovány, mohou se v budoucnu vyskytnout). Při zkoumání těchto objektů často není možné popsat celý objekt racionálně v celé své komplexnosti (a ani to není pro vyřešení stanoveného problému nutné), proto je při popisu zkoumaných objektů aplikována *abstrakce*, tj. některé aspekty objektů, které nejsou při řešení daného problému důležité, jsou zanedbány a zanedbatelné vlastnosti jsou popsány způsobem, který vede ke zvládnutelnému řešení problému.

Abstrakce se v oboru modelování a simulace nazývají *systemy*. Na objektech zkoumání je tedy při jejich modelování prováděno vymezení systémů, přičemž na jednom objektu zkoumání lze vymezit různé systémy v závislosti na odlišném úhlu pohledu, pod kterým je objekt pozorován v různých oborech lidské činnosti.

Po provedení abstrakce (vymezení systému) na objektu zkoumání jsou jasně určeny zanedbatelné vlastnosti objektu, které budou podrobeny bližšímu zkoumání. Ostatní objekty, které nebyly vybrány pro účely zkoumání, ale přesto je nutné uvažovat jejich existenci kvůli jejich vtahům se zkoumaným objektem, nazýváme *okolím zkoumaného objektu*. Abstrakci okolí zkoumaného objektu nazýváme *okolím zkoumaného systému*.

System, v němž se zanedbává význam plynutí času, se nazývá *statickým systémem*. System, v němž uvažujeme plynutí času (ve smyslu klasické „newtonovské“ fyziky, kde je smysluplné hovořit o tom, že události nastaly současně, nebo jedna dříve než druhá), nazýváme *dynamickým systémem*. Množina časových okamžiků, v nichž dynamický system existuje, se nazývá (*časovou*) *existencí dynamického systému*. Tyto časové okamžiky, v nichž je chování objektu pro účely daného zkoumání zajímavé, jsou rovněž určeny v rámci abstrakce.

V modelování a simulaci uvažujeme, že system, tj. abstrakce na nějakém objektu zkoumání, se skládá z *prvků (entit, elementů)*, které mohou být chápány jako abstrakce fyzické (prostorové) nebo logické složky objektu. Někdy bývá výhodné uvažovat i hierarchickou dekompozici prvků systému na více dílčích prvků. V dynamickém systému můžeme rozlišovat *permanentní prvky*, které se v systému vyskytují po celou dobu jeho existence, a *temporární prvky*, které mohou do systému vstupovat a opět z něj vystupovat, nebo se v něm objevovat a zanikat v určitých časových okamžicích. Temporární prvky lze dále členit na prvky *exogenní*, které vznikají (zanikají) vně studovaného systému (v jeho okolí), a *endogenní*, které vznikají (zanikají) uvnitř systému. Prvky systému lze rovněž kategorizovat jako *stabilní (infrastruktura)* a *mobilní* – prvky, které se mohou přemisťovat v prostoru.

Prvky (entity) systému mohou mít různé vlastnosti, které nazýváme *atributy*. Rozlišujeme atributy *standardní* (reálná čísla, booleovské hodnoty a texty) a *referenční* (vazby na jiné prvky). Hodnoty atributů se mohou v dynamickém systému měnit v čase. Prvky přítomné v systému a hodnoty všech jejich atributů v čase t určují *stav dynamického systému*

v čase t . Stav systému může být změněn *událostí*, která se vyskytne v určitém časovém okamžiku existence dynamického systému.

Termínem *model* označujeme v modelování a simulaci analogii mezi *modelovaným systémem (originálem)* a *modelujícím systémem*. Vztah těchto systémů je dán tím, že každému prvku P_O modelovaného systému (provedené abstrakce) je přiřazen prvek P_M modelujícího systému a každému atributu a_O prvku P_O je přiřazen atribut a_M prvku P_M , přičemž pro hodnoty atributů a_O , a_M je dána nějaká relace (například úměrnost nebo tolerance). Pokud jsou modelovaný a modelující systém statické, hovoříme o *statickém modelu*. V simulaci se uplatňují výhradně tzv. *simulační modely*, které splňují následující vlastnosti uváděné v [18]:

- 1) Modelovaný i modelující systém jsou dynamické systémy.
- 2) Existuje zobrazení τ časové existence modelovaného systému do časové existence modelujícího systému. Je-li t_1 okamžik, v němž existuje modelovaný systém O , je mu přiřazen okamžik $\tau(t_1) = t_2$, v němž existuje modelující systém M . Zobrazením τ je také přiřazen stavu $S_1(t_1) = \sigma_1$ systému O stav $S_2(t_2) = \sigma_2$ systému M .
- 3) Mezi stavy σ_1 a σ_2 jsou splněny výše uvedené obecné požadavky na vztahy mezi prvky a jejich atributy (jejich vzájemné přiřazení v modelovaném a modelujícím systému).
- 4) Zobrazení τ je neklesající (platí-li kauzalita stavů v modelovaném systému, musí platit kauzalita jim odpovídajících stavů v modelujícím systému).

Stručně lze říci, že model váže dva systémy, jejich prvky a atributy těchto prvků a v případě simulačních modelů i časové existence obou systémů. V běžné praxi se pod slovem *model* rozumí modelující systém (což není zcela přesné vzhledem k tomu, že model popisuje vzájemný vztah mezi modelovaným a modelujícím systémem), místo termínu modelovaný systém se používá slovo *originál*. V případě simulačních modelů se používá označení simulovaný a simulující systém, ovšem namísto termínu simulující systém se používá spíše termín *simulační model* nebo také *simulátor*.

Modelování je v publikaci [18] vymezeno následovně: „**Podstatou modelování ve smyslu výzkumné techniky je náhrada zkoumaného systému jeho modelem (modelujícím systémem), jejímž cílem je získat pomocí pokusů s modelem informaci o původním modelovaném systému.**“

Pokud by cílem modelování bylo pouhé vytvoření modelu, jednalo by se sice o modelování, ovšem ne ve smyslu výzkumné techniky (metody). Modelování není při realizaci modelujícího systému omezeno pouze na aplikace výpočetní techniky, modelujícím systémem může být i abstraktní matematická struktura interpretovaná například na papíře nebo fyzikální analogie modelovaného systému.

Pojem *simulace* používaný v oblasti aplikované informatiky, resp. kybernetiky je v [18] definován následujícím způsobem: „**Simulace je výzkumná technika, jejíž podstatou je náhrada zkoumaného dynamického systému jeho simulátorem s tím, že se simulátorem se experimentuje s cílem získat informace o původním zkoumaném systému.**“

Podle zařízení, na kterém je simulátor realizován, můžeme rozlišovat simulaci elektromechanickou, hydrodynamickou, mechanickou, odporovou, galvanickou, analogovou, hybridní (analogově-číslicovou) nebo číslicovou, realizovanou na číslicovém počítači. Číslicová simulace je dnes zdaleka nejčastěji používána a v dalším textu se budeme zabývat pouze tímto druhem simulace.

U dynamických systémů často dochází ke změnám stavu v čase. Tyto změny jsou realizovány pomocí *aktivit*, které představují základní akční jednotku simulace. Aktivita je obrazem určité činnosti v simulovaném systému, má určité časové trvání a může měnit stav systému. Běh simulačního programu potom můžeme chápat jako vykonávání posloupnosti aktivit v pořadí, v němž se vykonávají jim odpovídající činnosti v simulovaném systému.

Aktivitu lze členit na spojitou a diskrétní. *Spojitá aktivita* může měnit stav systému během celé doby jejího trvání a její časová existence je charakterizována intervalem reálných čísel, kdežto *diskrétní aktivita* mění stav systému pouze v okamžiku svého ukončení a její časovou existenci chápeme pouze jako jednoprvkovou množinu reálných čísel – časový okamžik, na který je naplánováno ukončení aktivity. Ukončení diskrétní aktivity a související změnu stavu systému nazýváme *událostí*. Posloupnost aktivit, které na sebe přirozeně navazují a utvářejí určitý logický celek, nazýváme *procesem*.

V číslicové simulaci rozlišujeme tři hlavní podoblasti: Jestliže simulovaný systém obsahuje pouze spojitou aktivitu, tj. jestliže se hodnoty atributů jeho entit mění v čase jen spojitě, mluvíme o *spojité simulaci*. Jestliže simulovaný systém obsahuje pouze diskrétní aktivity, tj. hodnoty atributů entit se mění jen v diskrétních časových okamžicích, hovoříme o *diskrétní simulaci*. Obsahuje-li simulovaný systém jak spojitou, tak i diskrétní aktivity, jedná se o tzv. *kombinovanou (diskrétně-spojitou) simulaci*. Jeden objekt lze zkoumat jak diskrétně, tak spojitě, podle toho, jaký systém je na něm definován.

Program, který řídí výpočet při číslicové simulaci (zdrojový kód nebo jeho zkompilovanou podobu), nazýváme *simulačním programem*. Tento program je spouštěn pro různé konfigurace simulátoru za účelem provádění pokusů se simulačním modelem. Konfigurace simulátoru je určena *scénářem* – množinou vstupních parametrů simulátoru, která zahrnuje *scénu*, tj. všechny permanentní prvky systému s hodnotami jejich atributů, dále pravidla vstupu/výstupu (generování/zániku) temporárních prvků a rozhodovací a řídicí algoritmy, které popisují aktivity a procesy vykonávané při běhu simulačního programu v určitém pořadí.

Běh simulačního programu podle jednoho definovaného scénáře se nazývá *simulační experiment (pokus)* se simulátorem. V rámci experimentů zkoumáme chování originálu (simulovaného systému) při použití daného scénáře. Pokud jsou *vstupní parametry* v rámci scénáře definovány nedeterministicky, výsledkem simulačního experimentu je množina *výstupních hodnot*, které jsou rovněž nedeterministické (jedná se o konkrétní realizace výstupních náhodných proměnných). Abychom simulací získali dostatečně přesné odhady středních hodnot výstupních náhodných veličin, musíme realizovat celou sérii simulačních pokusů (*replikací* experimentu) se stejným scénářem, ale různými realizacemi vstupních náhodných veličin, které jsou produkovány nezávislými generátory náhodných čísel s různými násadami.

Výsledné hodnoty po provedení všech replikací simulačního pokusu statisticky zpracujeme: Z jednotlivých replikací získáme konkrétní realizace hodnot každé výstupní náhodné veličiny a například jejich aritmetickým průměrem můžeme odhadnout střední hodnotu této výstupní náhodné proměnné. K odhadu střední hodnoty můžeme dopočítat pološířku intervalu spolehlivosti při dané hladině významnosti a rovněž můžeme připojit odhad směrodatné odchylky náhodné veličiny, který získáme výpočítáním výběrové směrodatné odchylky.

V průběhu simulačního pokusu se evidují neklesající hodnoty času, které odrážejí běh času v simulovaném systému. Tyto hodnoty se obvykle označují jako *simulační čas*, nebo také simulovaný čas. *Simulačním krokem* potom nazýváme časový úsek výpočtu, během něhož se nemění hodnota simulačního času. Jsou-li přírůstky simulačního času během celého výpočtu

vždy stejné, mluvíme o *ekvidistantním* simulačním času, v opačném případě o simulačním času *neekvidistantním*.

V praxi bývá cílem práce se simulátorem často nalezení scénáře, pro nějž je dle stanovených kritérií chování zkoumaného systému nejlepší. Jedná se tedy o optimalizační úkol, při kterém navrhujeme sérii simulačních pokusů s různými scénáři, které povedou k efektivnímu řešení zadaného problému. Posloupnost simulačních pokusů prováděných za tímto účelem označujeme jako *simulační studii*, nebo také *simulační projekt*.

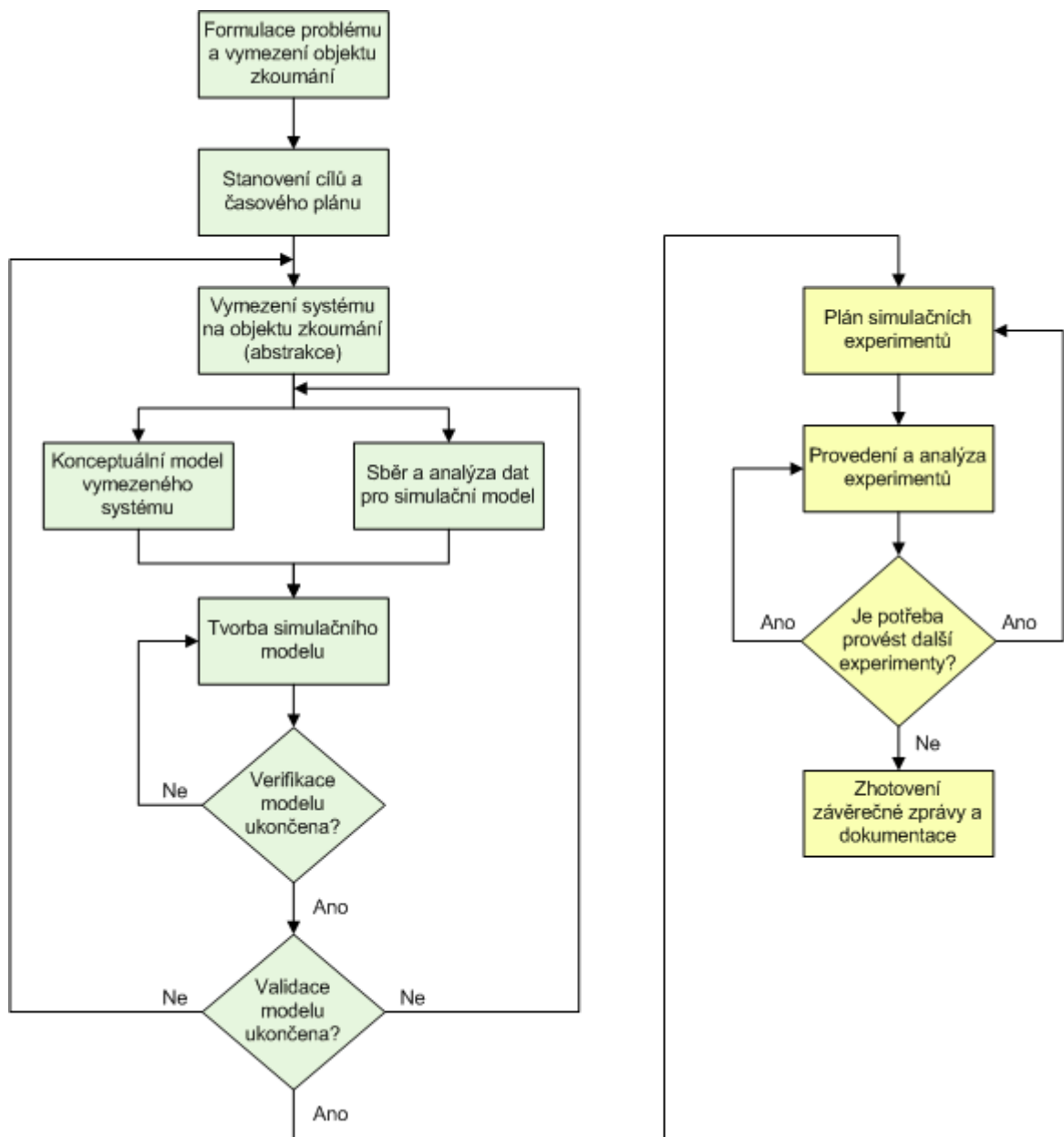
3.2 Životní cyklus simulační studie

Praktická část této diplomové práce se zabývá vypracováním případové simulační studie v oblasti silničního provozu v rámci průsečné světelně řízené křižovatky a přilehlé dopravní infrastruktury. Tato podkapitola pojednává o životním cyklu typické simulační studie. Čerpá přitom především z [17] a [15].

Simulační studie, tak jak byla vymezena v předchozí podkapitole, se skládá ze dvou základních etap: Z etapy návrhu a tvorby simulačního modelu a etapy experimentování s tímto modelem. Uvedené etapy lze podrobněji rozčlenit do několika fází, jak je znázorněno na obrázku [1]. Tyto fáze si stručně popíšeme v následujícím přehledu.

Etapa I: Návrh a tvorba simulačního modelu

- 1) **Formulace problému a vymezení objektu zkoumání.**
Na počátku projektu jsou formulovány zákaznickovy problémy. Řešitel uváží, zda je nasazení experimentální výzkumné metody simulace na řešení problémů vhodné, a pokud ano, vymezí objekt zkoumání, na který bude při řešení problémů soustředěna pozornost.
- 2) **Stanovení konkrétních cílů a časového plánu projektu.**
Stanovené cíle projektu navozují otázky, které mají být během projektu zodpovězeny.
- 3) **Vymezení systému na objektu zkoumání (abstrakce).**
V této fázi je na objekt zkoumání uplatněna abstrakce, tj. je na něm vymezen simulovaný systém (originál), do kterého jsou zahrnuty takové prvky objektu zkoumání a jejich atributy, které jsou důležité pro vyřešení problémů a dosažení stanovených cílů.
- 4) **Konceptuální model vymezeného systému.**
Řešitelský tým zvolí vhodnou *koncepci (metodiku) pro tvorbu simulačního modelu* (událostní, procesovou, agentově orientovanou aj.) a následně implementační prostředí. Je možné v určitém neimplementačním formalismu vytvořit *konceptuální model*, který srozumitelným způsobem zachycuje nejdůležitější funkční a řídicí části budoucího modelu na obecné úrovni. Pro úspěšné shromáždění všech požadavků na simulovaný systém a efektivní vyřešení problému je žádoucí, aby byl do fáze přípravy a tvorby modelu zapojen také zákazník.



Obr 1. Životní cyklus simulační studie (zdroj: [17])

5) **Sběr a analýza dat pro simulační model.**

Paralelně s tvorbou konceptuálního modelu lze sbírat a analyzovat potřebná vstupní data pro simulační model (vlastnosti prvků originálu, pravidla technologických postupů s deterministickou nebo stochastickou povahou, data o vstupech prvků do systému, rozhodovací pravidla pro řešení konfliktů apd.). Potřebná data by měl v ideálním případě dodat řešitelskému týmu zákazník ve vhodném elektronickém formátu.

6) **Tvorba simulačního modelu.**

Ve vybraném implementačním prostředí jsou navrženy a implementovány vhodné datové struktury modelu a řídicí a výkonné komponenty simulátoru. Je výhodné využít dostupné, už naprogramované specializované simulační nástroje, přitom je třeba zvážit, zda bude požadována také on-line (run-time) animace vývoje stavů

simulačního modelu, provádění interaktivních zásahů do běhu simulátoru a jaké výstupní protokoly budou vyžadovány.

7) **Verifikace simulačního modelu.**

Simulační model je považován za verifikovaný (funkčně správný), pokud byla ověřena správnost simulačního programu, tj. pokud funkčnost a vzájemné propojení komponent simulátoru během simulačního výpočtu odpovídá představám řešitele, které byly vyjádřeny v konceptuálním modelu. Při verifikaci modelu lze uplatňovat různé metody a přístupy – testuje se například interakce procesů, dodržování vztahů kauzality, korektnost generátorů vstupů apd. Při provádění verifikace se s výhodou uplatňuje také sledování on-line animace simulačního výpočtu. Nedostatky zjištěné při verifikaci vedou k opravným implementačním zásahům v modelu.

8) **Validace simulačního modelu.**

Po dokončení verifikace je třeba provést validaci – otestovat pravdivost chování simulačního modelu a produkovaných výstupních údajů. Zjišťuje se, zda simulační model dostatečně přesně odráží objekt zkoumání (je kredibilní). Při provádění validace se uplatňují různé metodiky:

- a) Srovnávání s realitou – chování modelu je srovnáváno s chováním zkoumaného objektu pomocí statistických metod (např. aplikováním zpracovaných historických dat v simulačních pokusech) – lze uplatnit, pouze pokud objekt zkoumání v realitě existuje.
- b) Srovnávání s jiným (např. matematickým) modelem.
- c) Empirická metoda, která uplatňuje expertní posouzení realističnosti vnějšího chování simulátoru nezávislým odborníkem v dané problémové doméně.

Nedostatky odhalené při validaci mohou vést až k přehodnocení konceptuálního modelu, nebo opětovnému vymezení systému na objektu zkoumání. Fáze verifikace a validace se v praxi často prolínají.

Etapa II: Experimentování se simulačním modelem

1) **Plán simulačních experimentů.**

Na počátku druhé etapy je nutné sestavit plán simulačních experimentů, které povedou k dosažení cílů projektu. Tento plán může být společně se scénářem experimentů flexibilně upravován na základě postupně získávaných výsledků.

2) **Provedení a analýza experimentů.**

V této fázi jsou získány a statisticky zpracovány výsledné údaje z jednotlivých experimentů.

3) **Rozhodnutí o provedení dalších experimentů.**

Jestliže experimentátor došel na základě výsledků experimentů, které byly vymezeny v původním plánu, k názoru, že je potřeba provést další experimenty s odlišným scénářem, je nutné sestavit další plán experimentů a tyto opět provést. Tento iterační proces obvykle směřuje k nalezení (sub)optimálního scénáře (konfigurace simulovaného systému).

4) **Zhotovení závěrečné zprávy a dokumentace.**

Po ukončení všech experimentů je vyhotovena závěrečná zpráva, která vyhodnocuje projekt, dokumentuje výsledky provedených experimentů, hodnotí dosažení

cílů projektu a předkládá a zdůvodňuje doporučení pro řešení problémů, které byly formulovány na počátku simulační studie.

3.3 Modelování a analýza vstupů simulátoru

V simulačních modelech často vyvstává potřeba modelování vstupů (například příchoďů temporárních entit do systému). Komponentu simulátoru, která má modelování vstupních dat na starosti, označujeme jako *submodel vstupů*. Můžeme jej chápat jako standardní model, který přiřazuje prvkům podsystému vstupů v originálu a jejich atributům prvky a atributy simulátoru, nebo na něj lze pohlížet jako na metamodel – černou skříňku, která generuje požadovaný typ dat (viz. [15]).

O *standardním modelu vstupů* hovoříme v případě, kdy generování daného typu vstupů představuje složitější proces a vstupy jsou získávány z externího modelu interagujícího se simulátorem – například v podobě už vytvořených entit, které vystupují z jednoho simulačního modelu a vstupují do druhého spolupracujícího modelu (našeho simulátoru).

Za *metamodel vstupů* považujeme černou skříňku – generátor pseudonáhodných čísel nebo deterministický generátor, který bývá součástí simulátoru (ale může být i externí komponentou) a na jehož základě simulační model vytváří temporární entity nebo mění svůj stav. Metamodely vstupů můžeme podrobněji členit na *reaktivní*, generující hodnoty na vyžádání simulátoru, a na *iniciativní*, které produkují data nezávisle na simulačním modelu a simulační model na tato data sám musí reagovat.

Vstupní data mohou mít *deterministický* nebo *stochastický charakter*. Příkladem deterministických vstupních dat mohou být sesbíraná historická data, která určují konkrétní časy příchoďů temporárních exogenních entit do systému nebo trvání jednotlivých operací technologických postupů (aktivit) modelovaných simulátorem. Většinou však nechceme jako vstupy simulátoru použít přímo nezpracovaná historická data, protože se jedná pouze o jeden konkrétní výskyt vstupních dat zaznamenaný v minulosti. Na základě statistického zpracování těchto dat můžeme zkonstruovat generátory pseudonáhodných čísel, které budou produkovat vstupní hodnoty s rozdělením pravděpodobnosti, které odpovídá sesbíraným historickým datům. Do simulačního modelu takto můžeme zavést faktor náhody, který daleko lépe vystihuje chování zkoumaného objektu.

Konstrukce generátoru pseudonáhodných čísel je podrobněji popsána v [15]. Ke zkonstruování generátoru potřebujeme znát rozdělení pravděpodobnosti odpovídajících vstupních hodnot v reálném objektu zkoumání a parametry tohoto rozdělení. Rozdělení pravděpodobnosti můžeme určit právě na základě sesbíraných historických dat následujícím způsobem: Ze vstupních dat získaných pro potřebné časové rozmezí sestavíme histogram, na jehož základě lze odhalit charakter rozdělení četností hodnot sledované veličiny a rozdělit sledované časové období na menší časové intervaly s podobnými četnostmi hodnot.

Alternativně lze časové intervaly, ve kterých se vstupní data „chovají podobně“, získat například použitím regresního modelu, který aproximuje hodnoty popisující vzájemnou proměnlivost vstupních dat (například doby mezi příchoďy zákazníků) polynomem vhodného stupně (regresní křivkou). Momenty, ve kterých se mění charakter sledované veličiny, se potom určí pomocí inflexních bodů této křivky. Namísto regresní křivky lze použít také křivku sestavenou z klouzavých průměrů, která vyhlazuje popisované hodnoty a má podobný průběh jako regresní křivka. Stanovení vhodných časových intervalů do jisté míry závisí také na zkušenosti a intuici řešitele.

Pro každý časový úsek s ustáleným chováním vstupní veličiny je třeba vytvořit samostatný generátor pseudonáhodných čísel. Na každém uvažovaném časovém úseku sestavíme z odpovídajících hodnot histogram a na základě tvaru histogramu můžeme odhadnout, o jaké rozdělení pravděpodobnosti se jedná. Pro uvažované teoretické rozdělení pravděpodobnosti vypočítáme odhady jeho parametrů² a následně zformulujeme statistickou hypotézu, že sledovaný výběr hodnot pochází (v rámci daného časového intervalu) ze základního souboru s uvažovaným rozdělením pravděpodobnosti s odhadnutými parametry.

Nejčastěji používanými testy hypotéz o tvaru rozdělení pravděpodobnosti jsou X^2 -test a Kolmogorovův-Smirnovův test. Test Kolmogorovův-Smirnovův se používá v případech, kdy máme k dispozici pouze omezené množství dat, a obecně platí, že má menší sílu k zamítnutí neplatné hypotézy než X^2 -test. Pokud se sledovaná veličina neřídí žádným teoretickým rozdělením pravděpodobnosti, nezbývá než použít empirické rozdělení.

Poté, co jsme určili rozdělení pravděpodobnosti vstupních veličin na dílčích časových intervalech (včetně příslušných parametrů), můžeme pro tyto intervaly zkonstruovat generátory pseudonáhodných čísel, které budou produkovat hodnoty z daného rozdělení.

Generátory pseudonáhodných čísel, která pochází z teoretických rozdělení pravděpodobnosti, interně využívají pro svou funkci generátor pseudonáhodných čísel rovnoměrně rozložených na intervalu $\langle 0, 1 \rangle$. Číslo s rovnoměrným rozdělením pravděpodobnosti je možné produkovat například lineárním kongruenčním generátorem, který generuje proud čísel na základě lineární funkce se stanovenou počáteční násadou a pokud možno co nejdelší periodou opakování generovaných čísel. Přitom můžeme uplatnit změnu násady po určitém počtu vygenerovaných prvků. Číslo z jiného než rovnoměrného rozdělení pravděpodobnosti lze vygenerovat pomocí metody inverzní transformace, která nejdříve získá náhodně vygenerované číslo z rovnoměrného rozdělení na intervalu $\langle 0, 1 \rangle$ a potom jej použije jako argument inverzní distribuční funkce požadovaného rozdělení pravděpodobnosti. Výsledkem tohoto výpočtu je číslo z daného rozdělení pravděpodobnosti, které se objeví na výstupu generátoru.

V případě empirického rozdělení pravděpodobnosti je opět nejdříve vygenerováno pseudonáhodné číslo z intervalu $\langle 0, 1 \rangle$, následně se zjistí, mezi které funkční hodnoty empirické distribuční funkce toto číslo padlo a poté je získán metodou lineární interpolace odpovídající argument empirické distribuční funkce, který představuje výsledné vygenerované číslo.

Metamodel vstupů, který zkonstruujeme v podobě generátoru pseudonáhodných čísel jako komponentu simulátoru, bychom měli verifikovat vzhledem k sesbíraným datům, na základě kterých byl generátor vytvořen. Verifikaci lze provést například pomocí statistického testování shody generovaných hodnot s příslušným rozdělením pravděpodobnosti o daných parametrech a run testem, který ověřuje akceptovatelnost délek sledů narůstajících a klesajících hodnot v generované posloupnosti čísel. Validace metamodelu vstupů se pak provádí vzhledem ke vstupnímu procesu reálného zkoumaného objektu.

Důsledná verifikace a validace metamodelu vstupů je základem pro zajištění kredibility simulačního modelu, neboť vstupy mají obvykle velký vliv na výsledky simulačního výpočtu. Analýze vstupních dat a parametrizaci generátorů pseudonáhodných čísel je proto třeba věnovat náležitou pozornost. Klíčová je rovněž implementace základního generátoru pseudonáhodných čísel s rovnoměrným rozdělením pravděpodobnosti. Pokud je v modelu potřeba generovat více proudů náhodných čísel (hodnoty pro více náhodných veličin), je třeba pro každý proud použít samostatný generátor s vlastní unikátní násadou.

2 Způsob výpočtu bodových a intervalových odhadů je vždy specifický pro daný typ rozdělení pravděpodobnosti

Specializované komerční simulátory obvykle nabízí celou sadu předpřipravených generátorů pseudonáhodných čísel pro různá teoretická rozdělení pravděpodobnosti a případně i pro empirická rozdělení, která může uživatel v rámci simulačního modelu sám definovat. Samozřejmostí je možnost zadání deterministických vstupních hodnot.

3.4 Výstupní analýza simulačního experimentu

V rámci simulace se experimentuje se simulačním modelem za účelem získání informací o původním zkoumaném (simulovaném) dynamickém systému a právě tato kapitola pojednává o získávání výstupních charakteristik ze simulačního výpočtu, zabývá se stanovením doby náběhu simulátoru, která umožňuje překlenout nepříznivé počáteční podmínky v simulačním modelu, a stanovením potřebného počtu replikací (běhů) simulačního experimentu, jejichž provedení zajistí v případě simulace stochastického systému dostatečnou přesnost požadovaných výsledků. Informace uvedené v této kapitole vychází z [15].

3.4.1 Získávání výstupních charakteristik simulačního výpočtu

Jednotlivé sledované výstupní charakteristiky simulačního výpočtu (např. rychlost a hustotu provozu na silniční síti) lze v případě stochastického systému považovat za výstupní stochastické (náhodné) procesy, přičemž každý výstupní stochastický proces představuje posloupnost náhodných veličin Y_1, Y_2, \dots, Y_m , jejichž konkrétní hodnoty jsou postupně zaznamenány v m stanovených statistických intervalech I_1, \dots, I_m simulačního výpočtu (např. vždy po uplynutí 10minutového statistického intervalu se zaznamenává průměrná hustota provozu za tento interval simulačního výpočtu).

V případě simulace stochastického systému se simulační výpočet experimentu obvykle realizuje ve více replikacích, které jsou vzájemně nezávislé a liší se nasadami generátorů pseudonáhodných čísel, použitých pro generování vstupů simulačního modelu. Na základě výstupních hodnot y_{ij} , které byly získány z jednotlivých replikací $i = 1, \dots, n$ simulačního výpočtu ve stejném statistickém intervalu I_j , lze odhadnout střední hodnotu náhodné veličiny Y_j . Pokud vypočítáme odhad střední hodnoty pro každou náhodnou veličinu Y_1, Y_2, \dots, Y_m v rámci výstupního stochastického procesu (tj. pro každý statistický interval), získáme tak střední vývoj sledované charakteristiky (vývoj sledované charakteristiky v průměrném případě).

Konkrétní realizace $y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{im}$ výstupních náhodných veličin Y_1, Y_2, \dots, Y_m určitého výstupního stochastického procesu Y naměřené v rámci i -té replikace jsou zpravidla vzájemně závislé (jsou získávány postupnou genezí simulačního výpočtu), nezávislé jsou však hodnoty $y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{nj}$ náhodné veličiny Y_j , které byly získány ve stejných statistických intervalech I_j simulačního času napříč všemi n realizovanými replikacemi. Právě z těchto hodnot můžeme vypočítat průměrnou hodnotu y_j (odhad střední hodnoty náhodné veličiny Y_j), a pokud takto spočítáme průměrné hodnoty y_1, \dots, y_m pro všechny náhodné veličiny Y_1, Y_2, \dots, Y_m , získáme střední průběh hodnot výstupního stochastického procesu Y – hodnoty, které můžeme očekávat v průměrné replikaci. Pro každý odhad střední hodnoty náhodné veličiny z výstupního stochastického procesu můžeme vypočítat také příslušný interval spolehlivosti.

3.4.2 Stanovení doby náběhu simulátoru

Rozdělení pravděpodobnosti F_1, F_2, \dots, F_m náhodných veličin Y_1, Y_2, \dots, Y_m výstupního stochastického procesu Y , definovaného v časových okamžicích t_1, \dots, t_m simulačního experimentu, jsou při daných počátečních podmínkách C_0 obecně různá pro různé časové okamžiky

t_j a jsou podmíněna počátečními podmínkami C_0 . Jestliže pro $j \rightarrow \infty$, pro všechny hodnoty náhodných veličin a všechny počáteční podmínky C_0 konvergují tato rozdělení pravděpodobnosti k jedinému rozdělení pravděpodobnosti F , nazveme toto rozdělení ustáleným rozdělením pravděpodobnosti výstupního stochastického procesu Y . Ustálené rozdělení pravděpodobnosti nezávisí na počátečních podmínkách C_0 , závisí na nich ale rychlost konvergence k tomuto ustálenému rozdělení.

V praxi můžeme považovat rozdělení pravděpodobnosti F_1, F_2, \dots, F_m za shodná od určitého konkrétního časového okamžiku t_k . Rozdělení pravděpodobnosti F_1, F_2, \dots, F_m ($m < k$), která konvergují k ustálenému rozdělení pravděpodobnosti F považujeme za přechodová stejně jako náhodné veličiny Y_1, Y_2, \dots, Y_m ($m < k$).

Abychom eliminovali vliv těchto přechodových stavů na výstupní statistické údaje sbírané během simulačního výpočtu, provedeme před vlastní celkovou dobou trvání ustáleného simulačního výpočtu t_u takzvaný náběh (zahřívání) simulačního modelu, který bude trvat alespoň do časového okamžiku t_k . Teprve od této doby se začne odpočítávat požadovaná doba simulačního výpočtu t_u , tj. časové rozmezí nastavené pro daný simulační experiment. Dobu t_u považujeme nezávisle na době zahřívání za celkovou dobu simulačního výpočtu.

Po dobu náběhu se nebudou zaznamenávat žádné výstupní údaje – výstupní stochastické procesy se budou ustalovat do podoby, kdy už nebudou výstupní charakteristiky ovlivňovány nežádoucími počátečními podmínkami při spuštění simulačního výpočtu. Obvykle totiž experimentátora zajímá chování simulovaného systému vykazované po dlouhodobější evoluci tohoto systému, tj. chování nezávislé na specifických počátečních podmínkách.

Dalším často aplikovaným alternativním řešením, které je zmiňováno v [24], je spuštění simulačního výpočtu po dobu $t = n \cdot t_r$, kde n je celkový počet replikací a t_r je plánovaná doba jedné replikace. Místo n replikací je tedy proveden jeden dlouhý běh simulačního výpočtu, přičemž stavové prostory jednotlivých replikací na sebe v tomto běhu navazují. Neprovádí se tedy obnovení stavového prostoru systému do výchozího stavu po každé replikaci a mezi replikacemi není nutné aplikovat dobu náběhu (kromě náběhu před první replikací).

3.4.3 Klasifikace simulace z hlediska výstupní analýzy

Podle [15] lze simulaci z hlediska výstupní analýzy rozčlenit do několika kategorií:

- 1) Simulace s ukončením,
- 2) simulace bez ukončení,
 - a) s ustálenými parametry,
 - b) s ustálenými cyklickými parametry,
 - c) s jinými parametry.

U simulace s ukončením existuje „přirozená“ událost, která ohraničuje délku simulačního výpočtu. Po výskytu ukončovací události už zpravidla nejsou informace produkovány simulátorem zajímavé/potřebné – doba stanovená pro simulační výpočet vypršela, simulační model je prázdný, byl vyroben stanovený počet výrobků atp.

Při simulaci bez ukončení neexistuje „přirozená“ ukončovací událost simulačního výpočtu. Charakteristikou chování simulujícího systému jsou ustálená rozdělení pravdě-

podobnosti (se svými parametry) pro každý výstupní stochastický proces – obvykle nás zajímá střední hodnota výstupních stochastických procesů. Často přitom zanedbáváme méně podstatné časové výkyvy charakteristik originálu a připouštíme, že z dlouhodobého pohledu se výstupní charakteristiky simulujícího systému nemění.

3.4.4 Stanovení počtu replikací simulačního výpočtu

U stochastického systému je potřeba provést více replikací simulačního výpočtu se stejnými počátečními podmínkami, ale různými násadami generátorů pseudonáhodných čísel, abychom mohli na základě zprůměrování hodnot získat přesnější výsledek. Vždy je nutné provést alespoň 3 – 5 replikací. Potřebný počet replikací závisí na přesnosti, se kterou chceme předpovědět výsledek. Odhad střední hodnoty výstupní náhodné veličiny (např. doby čekání klienta ve frontě), který obvykle vypočítáme jako aritmetický průměr \bar{x} hodnot z jednotlivých replikací, lze stanovit tím přesněji, čím více replikací simulačního výpočtu bude provedeno.

Hledanou průměrnou hodnotu je možné vyjádřit pomocí intervalu spolehlivosti $\langle \bar{x} - \Delta; \bar{x} + \Delta \rangle$. Za přesnost výsledku pak považujeme Δ – pološířku intervalu spolehlivosti. Při stanovení 95% intervalu spolehlivosti potom můžeme tvrdit, že s 95% pravděpodobností se skutečná průměrná výsledná hodnota bude pohybovat v „intervalu“ $\bar{x} \pm \Delta$. Můžeme vyžadovat, aby přesnost (kladná pološířka intervalu) byla shora omezena nějakou konkrétní hodnotou, nebo ji můžeme stanovit relativně (procentuálně) vůči odhadu \bar{x} střední hodnoty výsledku – například její velikost budeme chtít omezit na 5 % výsledné průměrné hodnoty.

Předpokládejme, že bylo provedeno N replikací simulačního výpočtu, ze kterých byly určeny (průměrné) hodnoty výstupní veličiny x_1, x_2, \dots, x_N . Z těchto hodnot můžeme určit jednu průměrnou hodnotu \bar{x} a vypočítat její výběrovou směrodatnou odchylku $s_{\bar{x}}$ (odhad směrodatné odchylky aritmetického průměru). Pološířku Δ intervalu spolehlivosti získaného průměru \bar{x} pak můžeme odhadnout jako:

$$\Delta = \frac{s_{\bar{x}}}{\sqrt{N}} \cdot t_{1-\frac{\alpha}{2}; N-1} \quad (1)$$

Tento výpočet platí pro normální rozdělení pravděpodobnosti (průměrných) hodnot získaných z jednotlivých replikací, pro ostatní rozdělení pouze přibližně – existují pro ně přesnější metody pro výpočet intervalu spolehlivosti.

Vzhledem k tomu, že právě potřebný počet replikací N chceme stanovit, postupujeme při jeho praktickém určování například následujícím způsobem: Provedeme dostatečně velký počet M replikací³, čímž získáme (průměrné) hodnoty sledovaných výstupních veličin z jednotlivých replikací. Následně pro počty replikací $N = 3, 4, \dots, M$ spočítáme Δ (ne nutně pro všechny počty replikací, můžeme například vhodně využít metodu půlení intervalu), potřebný počet replikací přitom stanovíme jako nejmenší N , pro které jsme poprvé dosáhli požadovanou přesnost (pološířku intervalu spolehlivosti Δ) u všech uvažovaných výstupních veličin. Stanovený počet replikací zpravidla ještě mírně navýšíme, abychom zaručili určitou rezervu v přesnosti získaných výsledků.

Jelikož jsou výsledné hodnoty replikací důsledkem stochastických procesů, je vhodné ověřit, že i při provedení větších počtů replikací bude přesnost dodržena. Při provádění

3 Existují statistické metody pro určení prvotního odhadu počtu replikací na základě analýzy výsledků několika málo provedených replikací simulačního výpočtu.

dalších replikací by se totiž mohla vyskytnout replikace s výslednými hodnotami výrazně odlehlejšími od hodnot většiny ostatních replikací. Výsledné hodnoty této replikace by navýšily směrodatnou odchylku a tím i pološířku intervalu spolehlivosti.

Další obdobný přístup, který můžeme použít pro stanovení potřebného počtu replikací simulačního výpočtu, je založen na vlastnostech kumulativního průměru a intervalu spolehlivosti pro tento průměr. Výpočet kumulativního průměru se neliší od výpočtu prostého aritmetického průměru.

Při provedení N replikací spočítáme kumulativní průměr jako aritmetický průměr hodnot z N replikací, při provedení další $(N + 1)$. replikace spočítáme kumulativní průměr jako aritmetický průměr hodnot z $N + 1$ replikací atd. Podobně můžeme počítat i směrodatné odchylky a intervaly spolehlivosti pro kumulativní průměry.

S přibývajícím N by se měly hodnoty kumulativních průměrů měnit stále méně (ustalovat se kolem určité hodnoty) a intervaly spolehlivosti by se měly zužovat, až od určitého N bude dosaženo požadované přesnosti i pro všechny další větší počty replikací. Toto N můžeme považovat za potřebný počet replikací pro provádění výstupní analýzy simulačního experimentu. Vývoj kumulativních průměrů a přesností dosažených při určitém počtu replikací můžeme vhodně dokumentovat pomocí grafu (viz. například obrázek 31).

4 Světelně řízené křižovatky

Tato kapitola uvádí nejdůležitější teoretické poznatky z oblasti dopravního inženýrství, které se týkají návrhu signálního plánu na světelně řízených křižovatkách a světelných křižovatek obecně. Uvedené informace byly čerpány především z Technických podmínek Ministerstva dopravy ČR č. 81 „Navrhování světelných signalizačních zařízení pro řízení silničního provozu“ [20] (dále jen TP 81) a z publikace [6]. Poznatky z této kapitoly jsou využity při návrhu signálního plánu průsečné světelně řízené křižovatky, který je proveden v následující kapitole.

Světelně řízené křižovatky jsou na silnicích realizovány v případech, kdy jejich návrh vede ke zvýšení bezpečnosti nebo plynulosti silničního provozu, přičemž tato kritéria lze sledovat jak z pohledu vozidel, tak z pohledu chodců. Světelné signalizační zařízení (SSZ) je účelné navrhovat na silně zatížených a nehodových křižovatkách v případě, že nehodovost nelze omezit jiným způsobem. Z hlediska bezpečnosti se například jedná také o křižovatky s přechodem dětí přes frekventovanou komunikaci, s výjezdem tramvají z míst ležících mimo komunikaci apd.

SSZ se podle kritéria intenzity provozu z hlediska vozidel navrhuje tehdy, pokud intenzity dopravních proudů překračují přípustné intenzity pro neřízené křižovatky dle normy ČSN 73 6102 „Projektování křižovatek na silničních komunikacích“. Podle kritéria intenzity provozu z hlediska chodců se SSZ navrhuje tehdy, pokud jsou intenzity vozidel vyšší než hodnoty, při kterých mohou chodci v mezerách mezi vozidly bezpečně přejít. Konkrétní mezní hodnoty intenzity vozidel na přechodu pro chodce jsou pro tento případ stanoveny v TP 81 [20].

Světelné signály řídící provoz na křižovatce se realizují pomocí *návěstidel* (nazývaných také semaforey), tj. technických prvků SSZ, jejichž použití a umístění stanovuje norma ČSN 73 6021 „Světelná signalizační zařízení. Umístění a použití návěstidel.“ Návěstidla jsou ovládána pomocí *řadičů*, které přijímají informace z *počítače*, určujícího jaká barva má v kterém časovém okamžiku na návěstidle svítit. Pokud je zobrazování světelných signálů řízeno dynamicky na základě skutečných intenzit provozu, umísťují se před příčnou čarou souvislou (stopčarou) pod jednotlivými řadicími pruhy *detektory*, které zjišťují přítomnost vozidel na příjezdových komunikacích. Návěstidla s nosnými konstrukcemi, řadiče, kabelové rozvody a další příslušenství jako detektory nebo tlačítka pro chodce utvářejí společně *světelné signalizační zařízení* (SSZ) křižovatky.

Časový rozvrh SSZ (*signální plán*) je jednoznačně určen dobou, kdy svítí na jednotlivých návěstidlech zelený signál „Volno!“. Ten opravňuje účastníky silničního provozu k pohybu, jenž by jim jinak nebyl povolen. Časové intervaly vyhrazené pro ostatní signály se z dob zelených dají jednoznačně odvodit. U třibarevného návěstidla pro vozidla po skončení zelené nastoupí na 3 – 4 sekundy žlutý signál „Pozor!“ a poté až do začátku další zelené svítí červené světlo „Stůj!“, poslední 2 sekundy spolu se žlutým světlem. Signální plán je periodickým časovým rozvrhem, jeho periodu nazýváme *délkou cyklu*.

Světelné signály, které na daném rameni křižovatky svítí vždy společně stejnou barvou, tvoří *signální skupiny*. Jedna signální skupina může tedy zahrnovat i více dopravních proudů směřujících do různých směrů, tj. i vozidla z více řadicích pruhů, pokud jsou řízena vždy stejnými barvami. Signální skupiny, které mohou mít současně zelenou, mohou určovat jednu fázi cyklu v signálním plánu, proto je společně nazýváme *fázovou skupinou*. Cyklus signálního plánu křižovatky se skládá vždy alespoň ze dvou fází. Jelikož v rámci signálních

skupin mají všechna světla ve stejném okamžiku vždy stejnou barvu, ve výsledném plánu světelné signalizace se uvádí doby zelených pro jednotlivé signální skupiny, a to v rámci jednoho cyklu, který se při řízení provozu bude periodicky opakovat.

Řidiči i při průjezdu světelně řízenou křižovatkou na signál „Volno!“ musí dbát na pravidla silničního provozu. Pokud je vozidlová signální skupina ovládána směrovými signály, je jí zaručen bezkolizní průjezd křižovatkou. Dopravní proud řízený směrovým signálem nesmí být kolizní s žádným dopravním proudem s výjimkou chodců ve volném směru. Pokud je ovšem signální skupina řízena plnými kruhovými světly, je jí povolen pouze vjezd do křižovatky, nemá už však zaručen bezkolizní průjezd celou křižovatkou. Vozidla odbočující vlevo musí v tomto případě po vjezdu do prostoru křižovatky dát přednost případným protijedoucím vozidlům a také chodcům přecházejícím přes vozovku, na kterou vozidla odbočují. Chodcům musí v tomto případě dávat přednost také vozidla odbočující vpravo.

Vozidlové signální skupiny řízené směrovými světly musí být na přednost chodců upozorněny žlutým světlem ve tvaru chodce, u plných signálů se v případě potřeby používá signál přerušovaného žlutého světla ve tvaru chodce.

4.1 Režimy světelného řízení

Podle míry zohlednění aktuální dopravní situace v signálním plánu křižovatky rozlišujeme různé režimy řízení silničního provozu světelnou signalizací, uvedené v [6]:

- 1) *Režim s jedním pevným signálním plánem*, v němž se signály na návěstidlech pravidelně cyklicky opakují ve stejném pořadí a délce trvání,
- 2) *režim výběru z několika pevných signálních plánů podle času*, v němž jsou pro různá období dne, resp. týdne definovány různé signální plány (s různou délkou cyklu, pořadím fázových skupin a různou dobou trvání zelených),
- 3) *dynamický režim výběru z několika pevných signálních plánů podle dopravní situace*, v němž se různé signální plány střídají podle intenzit dopravních proudů naměřených na detektorech,
- 4) *režim přidavné fáze*, který na určité místo pevného signálního plánu zařazuje v případě potřeby nepravidelnou fázi (přechod chodců na znamení, výjezd hasičů, vozidel záchranné služby apod.),
- 5) *režim modifikace zelené*, který dodržuje původní délku cyklu i pořadí fází, ale na základě aktuální dopravní situace umožňuje prodloužit zelenou ve vytiženém směru na úkor zelené v méně vytiženém směru (až po minimální přípustnou dobu trvání zelené) – lze aplikovat na režimy 1, 2 i 3,
- 6) *režim plné lokální optimalizace na základě dopravní situace*, který je vhodný zejména pro izolované světelně řízené křižovatky – počítač na základě aktuální dopravní situace rozhoduje, které signální skupině a na jak dlouho přidělí zelenou, přičemž sleduje následující priority (v uvedeném pořadí):
 - a) Dodržení minimálních dob zelené,
 - b) přidělení zelené přijíždějící koloně vozidel,
 - c) přidělení zelené nejdelší frontě čekajících vozidel,

- d) přidělení zelené signální skupině, která čeká už dlouhou dobu,
- e) přidělení zelené libovolnému příjíždějícímu vozidlu.

Ačkoliv se může zdát, že tento režim by byl vhodný i pro řízení koordinovaných křižovatek, v praxi se ukazuje, že je pro ně efektivnější dobře navržený dynamický režim výběru z několika pevných signálních plánů podle dopravní situace, s případným zařazením přídatné fáze, u liniové koordinace křižovatek i s modifikací doby zelené. Pro koordinaci křižovatek by byl zcela neúčinnějším režimem režim plné globální optimalizace uvažující najednou aktuální dopravní pohyby na všech koordinovaných křižovatkách, nicméně sledování velkého množství vstupních parametrů a propočítávání vlivu jejich možných kombinací je natolik náročné, že se dosud v praxi neuplatňuje.

4.2 Koordinace světelně řízených křižovatek

Ve velkých městech se nevyskytují pouze izolované světelně řízené křižovatky (vzdálené od sebe více než cca 800 m), ale také navazující světelně řízené křižovatky, jejichž signální plány je nutné vzájemně koordinovat pomocí tzv. „zelené vlny“ tak, aby vozidlové proudy s velkou intenzitou mohly projet na zelenou více křižovatkami bez nutnosti zastavení.

Zelenou vlnu lze v případě křižovatek umístěných v linii za sebou projektovat metodou *liniové koordinace*, která je podrobněji popsána v [6]. Při této koordinaci je na všech křižovatkách navržena jednotná doba cyklu (plynoucí například ze signálního plánu nejvíce vytížené křižovatky), jsou propočítány časy průjezdu čel hlavních zelených vln jednotlivými křižovatkami v dopředném i zpětném hlavním směru a poté jsou vhodně posouvány časy průjezdů pro zpětný směr, čímž jsou v rámci cyklu křižovatek minimalizovány časové odchylky průjezdů mezi oběma hlavními směry. Kromě posunu časů lze provést také změnu cyklu na všech křižovatkách. Cílem této optimalizace je dosažení téměř současného průjezdu vozidel z hlavních směrů křižovatkami, nebo alespoň zajištění střídavých průjezdů hlavních směrů s dostatečně velkými časovými intervaly pro naplánování dob zelených pro vedlejší směry.

V praxi se uplatňuje tzv. „*modifikovaná zelená vlna*“, při které jsou na jednotlivých křižovatkách upřísněny začátky zelených v rámci hlavní zelené vlny, aby mohl být s dostatečným předstihem (bez omezování vozidel v hlavním směru) uvolněn prostor před křižovatkou od těch vozidel, která do něj najela z vedlejších směrů na předešlých křižovatkách.

Kromě liniové koordinace křižovatek lze řešit rovněž *plošnou koordinaci* křižovatek – v případě, že síť křižovatek není lineární. I v tomto obtížnějším případě však lze vycházet z metody liniové koordinace, nejdříve provést liniovou koordinaci na vybrané páteřní linii a poté, v rámci přípustných možností, navrhnout koordinaci na bočních liniích. Doba cyklu je při plošné koordinaci také pevně stanovena pro všechny křižovatky, avšak po výpočtu koordinace na páteřní linii ji už nelze měnit a na bočních liniích lze provádět pouze přípustné posuny v časech průjezdů zpětného i dopředného směru, aby nebyla porušena koordinace na křižovatkách v páteřní linii, tj. už navržené pořadí fází signálních plánů.

4.3 Výhody a nevýhody světelně řízených a okružních křižovatek

V současné době můžeme v České republice ve zvýšené míře pozorovat výstavbu okružních křižovatek v centrech měst, což může vést ke zvýšení bezpečnosti a snížení ča-

sových ztrát účastníků silničního provozu, ale také ke ztrátě možnosti řízení dopravních proudů při průjezdu centrem města. Prof. Jan Černý, který je významným odborníkem v oblasti optimalizace dopravních systémů, doporučuje výstavbu okružních křižovatek v místech střetu větších mimoměstských komunikací, kde mohou mít okružní křižovatky významný vliv na snížení počtu nehod se smrtelnými následky. Tabulka 1 přehledně shrnuje hlavní výhody a nevýhody světelně řízených křižovatek v porovnání s okružními křižovatkami.

Tab 1. Výhody a nevýhody světelně řízených a okružních křižovatek

Světelně řízená křižovatka	
Výhody	Nevýhody
Menší prostorová náročnost	Vyšší riziko následků nehody při selhání řidičů
Možnost řízení dopravních proudů včetně koordinace s dalšími světelně řízenými křižovatkami, preference MHD apd.	Nároky světelného signalizačního zařízení na energii a údržbu
Světelně řízené přechody pro chodce/přejezdy pro cyklisty jednoznačně řeší přednost chodců/cyklistů a vozidel	Nutnost obtížného přizpůsobování signálního plánu intenzitám dopravy
Světelně řízené křižovatky v centru města vytvářejí psychologický odpor a mohou přispět k vyšší atraktivitě městských okruhů	Delší přechody pro chodce přes větší počet pruhů
	Větší zpoždění dopravních proudů včetně chodců
Okružní křižovatka	
Výhody	Nevýhody
Menší nároky na zpevněné plochy	Vyšší prostorové nároky
Vyšší bezpečnost vzhledem ke střetům vozidel (nižší rychlost, bez křížných kolizních bodů)	Nelze řídit dopravní proudy, aplikovat více různých programů řízení, preferovat MHD apd.
Vysoká kapacitní propustnost bez nutnosti řízení	Geometrie okružní křižovatky může omezovat průjezd dlouhých vozidel (např. MHD)
Malé nároky na údržbu, bez spotřeby energie	Neřízené přechody pro chodce/přejezdy pro cyklisty přes více pruhů
Atraktivní jednoduché řešení pro řidiče	Nutnost zacházky pro chodce
Možnost snadného otáčení	Okružní křižovatky v centru města jsou atraktivní a odvádějí pozornost řidičů od městských obchvatů

zdroj: *Dopravní řešení centra Pardubic : modelové hodnocení vlivu dopravy. Závěrečná zpráva simulační studie firmy DHV CR, spol. s r. o. [14]*

4.4 Návrh pevného signálního plánu

Tato kapitola pojednává o návrhu pevného signálního plánu křižovatky na obecné úrovni (není vztažena na konkrétní křižovatku), čerpá přitom z TP 81 [20] a [6]. Při návrhu pevného signálního plánu křižovatky budeme vycházet z již provedených dopravně-technických prací – z aktuálního (resp. prověřovaného) prostorového rozvržení křižovatky, rozvržení řadicích pruhů a návěstidel, které jednoznačně určuje signální skupiny křižovatky.

Na křižovatce se mohou vyskytovat návěstidla základní a opakovací. Opakovací návěstidla se z důvodu přehlednosti umísťují u řadicích pruhů, kde není základní návěstidlo dostatečně viditelné, jinak ovšem mají zcela stejný význam jako návěstidla základní (ukazují stejné signály). Z hlediska návrhu signálního plánu je třeba rozlišovat, která návěstidla používají plné, směrové, doplňkové a případně informační signály.

4.4.1 Podkladové materiály

Pro zpracování návrhu světelné signalizace se používají tyto podkladové materiály:

- Přehledná situace v měřítku 1:2000 – 1:5000 zobrazující organizaci dopravy a rozmístění uzlů v okolní komunikační síti, stávající a navrhovaná SSZ a jejich propojení do koordinovaných skupin,
- podrobná situace v měřítku 1:200 – 1:500 znázorňující geometrické rozvržení křižovatky, motorovou a cyklistickou dopravu, pěší provoz, vjezdy a výjezdy, sloupy, dopravní značení a zařízení, podélný sklon komunikací apd.,
- údaje o intenzitách všech druhů dopravy a skladbě dopravních proudů – například kartogramy zatížení jednotlivých směrů křižovatky jednotlivými typy vozidel v dopravních špičkách a sedlech, denní, případně týdenní průběh intenzity provozu, intenzity chodců a cyklistů,
- výsledky rozboru nehodovosti – statistiky počtu nehod a jejich následků za několikaleté období.

4.4.2 Stanovení mezičasů mezi signálními skupinami

V křižovatce rozlišujeme kolizní, bezkolizní a podmíněně kolizní dopravní proudy. Bezkolizní a podmíněně kolizní dopravní proudy mohou být současně vpuštěny do křižovatky, přičemž pohyb podmíněně kolizních dopravních proudů není řešen světelnou signalizací, ale řídí se podle pravidel silničního provozu (například vlevo odbočující vozidla, která vjela do křižovatky na plný světelný signál, musí dávat v křižovatce přednost protijedoucím vozidlům).

Mezi dobami zelených pro kolizní dopravní proudy, které jsou do křižovatky vpuštěny za sebou, je třeba dodržet určité *mezičasy*, tj. minimální časové intervaly od konce doby zelené pro jeden dopravní proud po začátek doby zelené pro nastupující kolizní dopravní proud. V této době musí poslední (vyklizující) vozidlo, které projelo v končící době zelené, bezpečně opustit *kolizní plochu* dříve, než první (najíždějící) vozidlo z nastupujícího proudu této kolizní plochy dosáhne.

Kolizní plocha je část plochy komunikace, kde se dráha vyklizujícího vozidla nebo chodce střetává s dráhou najíždějícího vozidla nebo chodce, a je různá pro každou dvojici dopravních proudů v křižovatce. Konec kolizní plochy můžeme uvažovat v místě, v němž se už vozidla nebo chodci vzájemně neovlivňují a pokračují jiným směrem, nebo v místě, kde se jejich pohyb stává souběžným a pokračují dále po stejné dráze.

Vzhledem k tomu, že signální skupina obsahuje obvykle více dopravních proudů, existuje mezi dvěma kolizními signálními skupinami několik kolizních ploch a odpovídajících mezičasů. Rozhodujícím mezičasem mezi dvěma signálními skupinami je potom nejdelší z těchto mezičasů. Správné stanovení mezičasů je velmi důležité pro zajištění bezpečnosti provozu na světelně řízené křižovatce.

Z vypočítaných mezičasů se sestavuje univerzální tabulka mezičasů mezi dvojicemi kolizních signálních skupin. Mezičasy se podle TP 81 [20] počítají zásadně pro všechny kolizní signální skupiny s výjimkou těchto dopravních pohybů:

- vozidla odbočující vpravo nebo vlevo na vozovku, přes kterou přecházejí chodci (nejedná se o kolizi řešenou SSZ, vozidla musí dle pravidel silničního provozu dát chodcům přednost),
- vozidla odbočující vlevo a protijedoucí vozidla a tramvaje, jež mají přednost (v případě, že pro odbočující vozidla nejsou použity směrové signály),
- dopravní pohyby na signál doplňkové zelené šipky.

Aby nedošlo k opomenutí nějakého mezičasu, lze si do pomocné tabulky poznačit všechny kolizní body určené osami trajektorií dopravních proudů, s rozlišením na kolizní body křížné, přípojné a odbočné. Tato tabulka je souměrná podle hlavní diagonály vzhledem k počtu i druhu kolizních bodů. K jednotlivým kolizním bodům je třeba určit mezičasy, kromě odbočných kolizních bodů, které značí pouze rozdělení vozidel ze společného řadicího pruhu do více různých směrů a nepředstavují žádné reálné kolize s mezičasy.

Pro výpočet mezičasů je třeba stanovit vyklizovací a najíždějí dráhy (L_v a L_n) (v metrech). Pro určení jejich délek lze použít osy jízdních pruhů. Vyklizovací dráha se měří od stopčáry, resp. vstupu chodce do vozovky na konec kolizní plochy, najíždějí dráha se měří od stopčáry, resp. vstupu chodce do vozovky k začátku kolizní plochy. Při přibližném výpočtu nebo velkých rozměrech křižovatky lze namísto kolizních ploch uvažovat pouze kolizní body.

Mezičas t_m v sekundách se vypočítá na základě těchto vzorců:

$$t_m = t_v - t_n + t_b \text{ [s]}, \quad (2)$$

$$t_v = (L_v + l_{voz})/v_v \text{ [s]}, \quad (3)$$

$$t_n = L_n/v_n \text{ [s]}, \quad (4)$$

kde t_v je vyklizovací doba [s], t_n najíždějí doba [s], t_b je bezpečnostní doba zohledňující vliv pojíždění signálu pozor po skončení signálu volno (2 s pro vyklizující motorové vozidlo, 1 s pro vyklizujícího cyklistu a 0 s pro chodce), L_v je vyklizovací dráha [m], L_n je najíždějí dráha [m], l_{voz} délka vyklizujícího vozidla nebo chodce (pro motorová vozidla 5 m, pro cyklisty a chodce 0 m), v_v vyklizovací rychlost [m/s] a v_n najíždějí rychlost [m/s]. Vyklizovací a najíždějí rychlosti jsou podle TP 81 [20] stanoveny pro motorová vozidla na 9,7 m/s v přímém směru a 7 m/s v oblouku, pro cyklisty vždy na 4,2 m/s a pro chodce 1,4 m/s.

4.4.3 Návrh fází signálního plánu

Počet fází v signálním plánu vyplývá z rozčlenění dopravních pohybů na křižovatce. Návěstidla na křižovatce bývají navrhována na základě těchto pravidel: Dopravní proudy z téhož směru mohou být do křižovatky vpouštěny časově za sebou v různých fázích, pouze pokud jsou na vjezdu do křižovatky odděleny v různých řadicích pruzích. Pokud nemají všechny dopravní proudy na příjezdu ke křižovatce současně volno, používají se pro jejich řízení směrové světelné signály, plnými signály mohou být řízeny pouze tehdy, když jsou všechny proudy vpouštěny do křižovatky současně, nebo jsou proudy do různých směrů stavebně odděleny (například ostrůvkem), přičemž je každý oddíl osazen svým návěstidlem.

Odbočování vlevo se pokud možno řídí návěstidly s plnými signály ve stejné fázi s protijedoucími vozidly. Pokud jsou však intenzity vlevo odbočujících vozidel vyšší a vozidla by nestačila projet v době zelené protisměru, může se levému odbočení zelená prodloužit osazením signálu pro opuštění křižovatky (vyklizovací šipky). Směrové signály a samostatná fáze pro levé odbočení se používají pouze při vysokých intenzitách levého odbočení i protisměru, nebo při specifických dopravních poměrech.

Odbočování vpravo se za běžných podmínek řídí návěstidly s plnými signály, kromě toho lze vozidlům odbočujícím vpravo umožnit odbočení i v době červené, červeno-žluté nebo žluté použitím signálu doplňkové zelené šipky.

Nalezení všech fázových skupin

Jak již bylo řečeno, při návrhu signálního plánu vyjdeme z aktuálního rozvržení návěstidel na křižovatce, které určuje množinu signálních skupin $S = \{s_1, s_2, \dots, s_r\}$. Pro každou dvojici signálních skupin (s_i, s_j) můžeme porovnáním dopravních proudů určit, zda můžeme signální skupiny vpustit najednou do křižovatky (jsou ve vztahu bezkoliznosti – bezkolizní, nebo podmíněně kolizní), nebo zda jim nesmí najednou svítit zelená (jsou kolizní).

Množinu F všech možných fázových skupin určíme pomocí grafu bezkoliznosti $GB = (S, H)$, v němž množinu vrcholů S tvoří jednotlivé signální skupiny a množinu hran H všechny bezkolizní dvojice signálních skupin. V grafu bezkoliznosti nalezneme všechny maximální kompletní podgrafy (tzv. kliky). Signální skupiny představující vrcholy maximálních kompletních podgrafů jsou vzájemně bezkolizní, a jsou tedy kandidátem na fázovou skupinu v signálním plánu křižovatky. Přidělit zelenou maximální fázové skupině je výhodné z časových důvodů, protože zelenou využije maximální možná množina vstupních proudů.

Pokrytí signálních skupin minimálním počtem fázových skupin

V cyklu by mělo být co nejméně fázových skupin, aby doba cyklu nebyla příliš dlouhá, neobsahovala mnoho neefektivních mezer a žádná ze signálních skupin nečekala dlouho na opětovné nastoupení zelené. Každá signální skupina se přitom musí vyskytovat alespoň v jedné fázové skupině. Je tedy třeba vyřešit problém pokrytí všech signálních skupin co nejmenším počtem fázových skupin.

Pro množinu všech fázových skupin $F = \{F_1, F_2, \dots, F_m\}$, získaných z grafu bezkoliznosti a množinu signálních skupin $S = \{s_1, s_2, \dots, s_r\}$ sestavíme pokrývací matici $P = (p_{ij})$, kde $p_{ij} = 1$, když $s_j \in F_i$ (F_i pokrývá s_j), a $p_{ij} = 0$ v opačném případě. Následně najdeme v matici P minimální množinu řádků (fázových skupin) F' , která bude pro každý sloupec obsahovat alespoň jednu jedničku, tj. pokryje všechny signální skupiny. Takových minimálních množin může existovat i více.

Tento pokrývací problém můžeme řešit hledáním všech možných kombinací fázových skupin, které dohromady pokrývají všechny signální skupiny, nebo můžeme například použít jednoduchou „ruční“ heuristiku, která je popsána v [6].

Určení pořadí fázových skupin

Z nalezených minimálních množin fázových skupin, které pokrývají všechny signální skupiny, vytvoříme všechny možné uspořádané množiny fázových skupin – různá pořadí, v jakých se mohou fázové skupiny vyskytovat za sebou v cyklu.

Přitom můžeme vyloučit některá nevhodná řešení – například posloupnost fázových skupin, ve které se určitá signální skupina vyskytuje vícekrát, ale ve fázových skupinách, které nenásledují za sebou (při uvažovaném cyklickém opakování fází by nenavazovaly zelené pro tuto signální skupinu). Je možné, že určité dopravní směry musí následovat po sobě, aby na křižovatce nevznikalo velké nakupení vozidel, nebo je vhodné zajistit, aby chodci mohli plynule přejít dělený přechod pro chodce. U koordinovaných světelně řízených křižovatek mohou výsledné pořadí fází významně ovlivnit potřeby vzájemné spolupráce signálních plánů.

Pokud tomu nebrání některé výše uvedené požadavky, navrhuje se pořadí fází tak, aby se minimalizoval součet rozhodujících mezičasů mezi fázovými skupinami. Rozhodujícím mezičasem mezi dvěma fázovými skupinami je maximální mezičas vybraný z mezičasů pro všechny možné kombinace vyklizujících a najíždějících signálních skupin.

4.4.4 Stanovení délky cyklu a signálních dob zelené

Délka cyklu je dána potřebnými dobami zelených pro jednotlivé signální skupiny a rozhodujícími mezičasy mezi fázemi. Doby zelených musí být dostatečně dlouhé, aby s určitou rezervou pokryly poptávané intenzity provozu. U pevného signálního plánu je *doba cyklu* C součtem rozhodujících dob zelených $z_{roz.}$, tj. zelených pro kapacitně nejvíce vytížené (kritické) vjezdy v jednotlivých fázích, a rozhodujících mezičasů t_m při fázovém přechodu mezi těmito kritickými vjezdy:

$$C = \sum t_m + \sum z_{roz.} \quad (5)$$

Tzv. *strukturální doba cyklu* je součtem rozhodujících mezičasů mezi fázemi a minimálních možných dob zelených, nezávislých na intenzitách provozu. *Minimální doba cyklu pro zadané intenzity* je nejkratší možná délka cyklu pro požadovanou rezervu kapacity, s kterou je vyhověno poptávaným intenzitám provozu. U dynamického řízení je doba cyklu proměnná, minimální doby zelených se prodlužují na základě požadavků příjíždějících vozidel.

Při výpočtu doby cyklu a zelených se používají intenzity provozu vyjádřené v tzv. jednotkových vozidlech (jv). Jednotlivé typy vozidel se pomocí koeficientů přepočítávají na jednotku odpovídající běžnému osobnímu automobilu, tedy např.: 1 osobní automobil = 1 jv, 1 nákladní automobil = 2 jv, 1 kloubový autobus = 2,5 jv atd.

Optimální délka cyklu se většinou pohybuje v rozmezí od 50 do 80 s, dlouhé doby cyklu mohou dosahovat i 100 s. Za maximální možnou hranici se považuje 120 s, poté již přestávají být čekací doby pro účastníky silničního provozu únosné.

Potřebné doby zelených, které vychází z intenzit provozu, se získávají na základě výpočtu, který rozděluje celkovou dobu volna mezi jednotlivé signální skupiny, a to úměrně intenzitám provozu. Výpočet dob zelených lze provádět různými způsoby:

- 1) Metodou saturovaného toku (viz. 20),
- 2) metodou spotřeby času (viz. 20),
- 3) iterační metodou (viz. 20),
- 4) metodou lineárního programování podle 6.

Výstupem metody saturevaného toku, metody spotřeby času a iterační metody jsou tyto údaje: Délka cyklu, doby zelených pro jednotlivé signální skupiny, kapacita jednotlivých vjezdů (řadicích pruhů) a rezerva kapacity na těchto vjezdech (při daných intenzitách provozu a vypočítaném signálním plánu). Tyto metody jsou založeny na podobných principech, především na modelu saturevaných toků. Saturevaný tok je maximální počet vozidel, která mohou projet profilem stopčáry za jednotku času při ideálních dopravních podmínkách. Metody 1 – 3 používají řadu expertně zjištěných koeficientů, stanovených na základě četných dopravních průzkumů.

Metoda lineárního programování je čistě matematickou optimalizační metodou a umožňuje při zadaném minimálním poměru nabízené a poptávané zelené pro signální skupiny (minimální poměrné rezervě zelených) stanovit nejmenší délku cyklu a odpovídající optimální začátky a konce zelených, nebo při dané délce cyklu stanovit začátky a konce jednotlivých zelených, které vykazují nejvyšší poměr nabízené a poptávané zelené. Metoda sama o sobě nestanovuje kapacitu jednotlivých vjezdů a rezervu kapacity pro tyto vjezdy, tyto hodnoty by však bylo možné dopočítat podobným způsobem jako např. v metodě saturevaného toku.

V následujícím přehledu si stručně představíme principy jednotlivých metod a veličiny, které jednotlivé metody uvažují při výpočtu cyklu a zelených. Bližší informace o jednotlivých metodách lze nalézt v TP 81 [20] a [6], jak bylo uvedeno výše.

Metoda saturevaného toku (Websterova metoda)

Principem této metody je stanovení délky cyklu a zelených v závislosti na stupních saturace vjezdů v jednotlivých fázích. Za jeden vjezd přitom považujeme množinu sousedních řadicích pruhů, které propouštějí dopravní proudy do identických směrů. Fázovým skupinám (fázím signálního plánu), v nichž se vyskytují vjezdy s větším stupněm saturace, je přiřazována delší doba zelené.

Stupeň saturace vjezdu se počítá následujícím postupem: Nejdříve se pro každý vjezd určí základní saturevaný tok, závislý pouze na šířce řadicích pruhů. Poté se základní saturevaný tok násobí koeficienty, které zohledňují podélný sklon komunikace, poloměr případného odbočení a podíl odbočujících vozidel, čímž získáme saturevaný tok vjezdu. Stupeň saturace vjezdu se pak vyjádří jako podíl hodinové intenzity vozidel na vjezdu a saturevaného toku vjezdu.

Doba cyklu je vypočítána na základě součtu stupňů saturace nejvíce vytížených (kritických) vjezdů v jednotlivých fázích a celkové neproduktivní doby mezi fázemi (součtu rozhodujících mezičasů mezi fázemi). Produktivní doba cyklu (tj. doba cyklu bez rozhodujících mezičasů mezi fázemi) je v podobě zelených rozdělena na jednotlivé fáze signálního plánu, a to v poměru, ve kterém se nachází stupně saturace kritických vjezdů v jednotlivých fázích.

Tato metoda často nachází praktické uplatnění – kromě toho, že je zmiňována v TP 81 [20], používají ji specializované firmy z oblasti simulace dopravního provozu ve svých simulačních studiích (viz. [14]) a je rovněž častou náplní závěrečných odborných prací a předmětů vyučovaných na školách s dopravním zaměřením.

Metoda spotřeby času

Princip metody spotřeby času je obdobný jako u metody saturevaného toku, zde se však délka cyklu počítá na základě fiktivního výpočtového zatížení vjezdů, obvyklé uva-

žované hodnoty celkového saturovaného toku křižovatky a součtu rozhodujících mezičasů mezi fázemi. Vypočítaný cyklus se v podobě zelených rozděljuje na jednotlivé vjezdy a následně signální skupiny na základě podílu výpočtového zatížení vjezdu a celkového saturovaného toku křižovatky.

Výpočtové zatížení vjezdu se počítá jako intenzita vozidel na vjezdu pronásobená různými koeficienty: Koeficientem zohledňujícím šířku řadicího pruhu, koeficientem podélného sklonu komunikace, koeficientem pro poloměr oblouku, pro podíl odbočujících vozidel a koeficientem pro počet řadicích pruhů pro tentýž směr na vjezdu. Lze zohlednit také zatížení přechodu pro chodce umístěného na komunikaci, na kterou vozidla odbočují. Pro různé šířky řadicích pruhů, poloměry odbočování atd. existují standardní hodnoty koeficientů.

Spotřeba času je zde tedy pro jednotlivé vjezdy implicitně vyjádřena ve výpočtovém zatížení vjezdů pomocí soustavy jistých expertně stanovených koeficientů, které vycházejí z dlouhodobých zkušeností a zohledňují časově náročnější operace jako odbočování, jízdu ve stoupání apd.

Iterační metoda (metoda postupného přibližování)

Iterační metoda spočívá v průběžném porovnávání kapacity jednotlivých řadicích pruhů, která byla vypočítána pro aktuální délku cyklu a doby zelených, s příslušnými směrodatnými intenzitami provozu na křižovatce. Pokud kapacita všech vjezdů (s určitou rezervou) vyhovuje vstupním intenzitám, iterační výpočet je ukončen.

Výpočet vychází ze strukturálního cyklu, který uvažuje minimální možné doby zelených a rozhodující mezičasy mezi fázemi. Pak se délka cyklu a zelených postupně zvětšuje, vypočítává se kapacita a srovnává se se směrodatnými intenzitami. Iterační výpočet je zastaven, pokud je kapacita asi o 10 – 20 % vyšší než směrodatné intenzity. Při výpočtu kapacity se podle tabulky vstupních časů pro motorová vozidla určuje počet vozidel, který je schopen v rámci dané zelené vjet do křižovatky. Následně je tento počet vozidel vynásoben počtem cyklů za hodinu, čímž získáme hodinovou kapacitu příslušného vjezdu. Poté již stačí kapacitu porovnat s intenzitou, a pokud kapacita stále nevyhovuje, prodlouží se délka fáze, ve které je třeba prodloužit doby zelených, a stejným postupem se pokračuje dále.

Metoda lineárního programování

Metoda lineárního programování umožňuje při stanoveném minimálním poměru nabízené a poptávané zelené (minimální poměrné rezervě) určit nejkratší délku cyklu, při které je daného poměru dosaženo, a dopočítat optimální začátky a konce zelených pro jednotlivé signální skupiny. Účelovou funkcí je délka cyklu, omezující podmínky jsou kladeny na doby zelených (přípustné rozmezí dob v cyklu, začátky zelených musí v rámci cyklu nastat dříve než konce zelených, zelené mají určenu minimální dobu trvání a musí pokrýt poptávanou intenzitu) a na dodržení mezičasů mezi jednotlivými zelenými.

4.4.5 Okrajové podmínky při návrhu signálního plánu

Při sestavování signálního plánu je třeba uvažovat určitá omezení, která jsou uváděna v TP 81 [20]. Mezi nejdůležitější omezení patří následující údaje:

- Minimální možná doba zelených pro vozidla, chodce, cyklisty a tramvaje je 5 s,
- signál žluté („Pozor!“) pro vozidla a cyklisty je zobrazován po dobu 3 s,

- žlutočervený signál trvá 2s,
- jestliže při odbočování vlevo na základě dávání přednosti v jízdě vozidlo zastaví uprostřed křižovatky, musí mu být při změně fázi umožněno bezpečné opuštění tohoto prostoru, např. prodloužením mezičasu o 2– 4 s než je podle výpočtu mezičasů potřebné.

4.4.6 Výpočet cyklu a zelených pomocí metody saturovaného toku

V této podkapitole bude podrobněji komentován výpočet délky cyklu a jednotlivých zelených pomocí metody saturovaného toku. Výpočet se provádí v tabulce (viz. tabulka 9), přičemž výsledkem výpočtu jsou následující údaje: Doba cyklu C , doby zelených z pro jednotlivé vozidlové signální skupiny i kapacita a kapacitní rezerva jednotlivých vjezdů. Při výpočtu se uvažují pouze vozidlové signální skupiny, do výsledného plánu jsou nejprve vynášeny délky jednotlivých fází, poté se do něj zakreslují začátky a konce zelených pro vozidla a teprve potom minimální doby zelených pro chodce. Tyto minimální zelené se následně mohou prodloužit tak, aby bylo vyhověno příslušným mezičasům.

Do signálního plánu se doplní také doby zelených pro signály doplňkové zelené šipky. U signálů pro automobily je nutno před začátek zelené (do mezičasu) zařadit na dobu 2 s signální obraz žlutočervené, za konec zelené se do doby mezičasu zakresluje signál žlutého světla trvající 3 s.

Vlastní výpočet pomocí metody saturovaného toku lze shrnout do několika kroků (kompletní popis metody lze nalézt v TP 81 [20]):

- 1) Do tabulky se zapíše intenzity I vozidlových proudů na jednotlivých vjezdech (automobily v jv/h, tramvaje ve skutečném počtu vlaků za hodinu) a šířky \check{s} řadicích pruhů na vjezdech pro automobily (vjezdem rozumíme množinu sousedních řadicích pruhů, které propouštějí dopravní proudy do identických směrů, často tedy jeden vjezd odpovídá jednomu řadicímu pruhu).
- 2) Vypočítá se základní saturovaný tok jednoho řadicího pruhu, který je závislý pouze na šířce \check{s} řadicího pruhu (pro $\check{s} > 4$ m se uvažuje pouze $\check{s} = 4$ m).
 - a) Pro čtyř a vícepruhové obousměrné komunikace nebo pro dvou a vícepruhové jednosměrné komunikace s kvalitním povrchem vozovky a jízdní rychlostí 50 – 60 km/h se uvažuje základní saturovaný tok řadicího pruhu:

$$S_{zakl(pruhu)} = 1900 + 30.(\check{s} - 3,5) \text{ [jv/h]} \quad (6)$$

- b) V ostatních případech:

$$S_{zakl(pruhu)} = 1800 + 100.(\check{s} - 3,5) \text{ [jv/h]} \quad (7)$$

- 3) Součtem základních saturovaných toků řadicích pruhů na vjezdu se stanoví základní saturovaný tok vjezdu:

$$S_{zakl(vjezdu)} = \sum S_{zakl(pruhu)} \text{ [jv/h]} \quad (8)$$

- 4) Vypočítá se (celkový) saturovaný tok vjezdu podle vztahu:

$$S = S_{zakl(vjezdu)} \cdot k_{skl} \cdot k_{obl} \text{ [jv/h]} \quad (9)$$

- a) Koeficient sklonu k_{skl} vyjadřuje vliv podélného sklonu a vjezdu na saturovaný tok:

$$k_{skl} = 1 - 0,02 \cdot a \quad (10)$$

V případě vodorovného vjezdu nebo vjezdu v klesání se zadává $a = 0$, v případě vjezdu ve stoupání větším než 10 % se zadává pouze $a = 10$.

- b) Koeficient oblouku k_{obl} vyjadřuje vliv poloměru R směrového oblouku při odbočování a podílu odbočujících vozidel f na saturovaný tok (platí pro odbočování vlevo i vpravo):

$$k_{obl} = R / (R + 1,5 \cdot f) \quad (11)$$

U samostatného vjezdu pro odbočování je $f = 1$. V případech, kdy pro levé odbočení ovlivňované protisměrem existuje společný řadící pruh s přímým směrem nebo pravým odbočením, nebo pokud je pravé odbočení výrazně ovlivňováno proudem souběžně přecházejících chodců, vyjadřuje se snížení kapacity vjezdu zadáním fiktivního poloměru oblouku podle [20].

- 5) Pro všechny vjezdy s automobilovou dopravou se určí stupeň saturace (ostatní typy vozidel – například tramvaje – se neuvažují a do tabulky se pro ně doplňují až výsledné doby zelených, kapacity a kapacitní rezervy):

$$y = I/S \quad (12)$$

V každé fázi $i = 1, \dots, n$ se vybere vjezd s nejvyšším stupněm saturace (tzv. kritický vjezd ve fázi). Součtem stupňů saturace kritických vjezdů v jednotlivých fázích se vypočítá celkový stupeň saturace Y :

$$Y = \sum_{i=1}^n \max y_i \quad (13)$$

- 6) Dále se určí ztrátový čas pro každou fázi. V každé fázi je produktivní (využitou) dobou tzv. efektivní zelená z' , což je doba, po kterou vozidla projíždějí stopčarou v saturovaném toku. Délka z' se uvažuje o 1 větší než délka skutečné zelené z (skutečná zelená z je upravena o ztrátu vzniklou rozjezdem a dobu, po kterou vozidla pojíždí žlutý signál).

Ztrátový čas l_i pro každou fázi $i = 1, \dots, n$ je neproduktivní doba při změně fází, která je rovna mezičasu t_{mi} mezi kritickými vjezdy v končící i -té a následné fázi zkrácenému o rozdíl mezi efektivní a skutečnou zelenou (tj. o 1):

$$l_i = t_{mi} - (z' - z) = t_{mi} - 1 \text{ [s]} \quad (14)$$

Při výpočtu se uvažuje skutečný mezičas mezi kritickými vjezdy (signálními skupinami) získaný ze strukturálního signálního plánu, nikoliv z tabulky mezičasů. Strukturální signální plán uvažuje tzv. strukturální cyklus C_{str} , v němž jsou zahrnuty minimální přípustné doby zelených (5 s) a nejdelší (rozhodující) mezičasy mezi fázemi. Celkový ztrátový čas L za cyklus se potom získá jako součet ztrátových časů l_i pro jednotlivé fáze $i = 1, \dots, n$.

- 7) Optimální cyklus C_{opt} pro izolovanou křižovatku je cyklus, při němž je celkové zdržení vozidel náhodně přijíždějících ke křižovatce minimální. Vypočítá se podle vzorce:

$$C_{opt} = \frac{1,5 \cdot L + 5}{1 - Y} \text{ [s]} \quad (15)$$

Po zvážení některých vhodných bezpečnostních úprav (s ohledem na případné tramvaje a dlouhé vyklizovací časy chodců) se na základě optimálního cyklu stanoví reálný cyklus C v rozmezí $0,75 \cdot C_{opt} < C < 1,5 \cdot C_{opt}$. V tomto rozmezí se reálný cyklus blíží cyklu optimálnímu. Obvykle je vhodné výslednou dobu cyklu zaokrouhlit na celé desítky sekund (případně násobky pěti).

- 8) Na základě reálného cyklu se nejprve určí délky zelených pro kritické vjezdy v jednotlivých fázích:

$$z = \frac{y \cdot (C - L)}{Y} - 1 \text{ [s]} \quad (16)$$

Tyto zelené kritických vjezdů spolu s mezičasy t_{mi} mezi kritickými vjezdy určují délky jednotlivých fází signálního plánu. Do fází se poté doplní podle tabulky mezičasů zelené pro ostatní (nekritické) signální skupiny s automobilovou dopravou, dále se doplní zelené pro tramvaje, chodce a signály pro cyklisty.

- 9) Nakonec se provede posouzení navrženého signálního plánu pomocí kapacit (výkonnosti) vjezdů a dosažených kapacitních rezerv. Kapacita vjezdů na světelně řízené křižovatce nezávisí na intenzitách kolizních dopravních proudů (s výjimkou levých odbočení ovlivňovaných protisměrem, která musí být zohledněna již při návrhu signálního plánu), proto se kapacita počítá nezávisle pro každý vjezd zvlášť.

Navržené dopravní řešení je vyhovující tehdy, jestliže kapacita je na všech vjezdech vyšší než intenzita provozu, tj. existuje určitá kladná rezerva kapacity na každém vjezdu. Pokud na křižovatce nelze navrhnout signální plán s maximálním možným cyklem 120 s, který vykazuje alespoň malou kapacitní rezervu, musí se přistoupit ke stavební úpravě křižovatky.

Kapacita vjezdu pro automobilovou dopravu se vypočítá pomocí vzorce:

$$K = S \cdot z / C \text{ [jv/h]} \quad (17)$$

Kapacita vjezdu pro tramvaje:

$$K = (\lfloor z/18 \rfloor + 1) \cdot 3600 / C \text{ [vlaků/h]}, \quad (18)$$

kde $\lfloor z/18 \rfloor$ je celá část podílu $z/18$. Rezerva kapacity na vjezdu se potom dopočítá na základě intenzity dopravy na vjezdu a kapacity vjezdu:

$$Rez = (1 - I/K) \cdot 100 \text{ [%]} \quad (19)$$

4.5 Přehled metod pro kapacitní výpočty křižovatek

Dopravní inženýry při konstruování nových nebo rekonstrukci stávajících dopravních uzlů často zajímá kapacita křižovatek, která je kvantitativním ukazatelem dopravní výkonnosti křižovatek. Kapacitou dopravních uzlů je navíc zásadně podmíněna také kapacita a propustnost celé dopravní sítě. Na základě kapacitních propočtů různých druhů křižovatek se stanovuje nejvhodnější podoba plánované křižovatky pro uvažovanou dopravní lokalitu

(samozřejmě s přihlédnutím k dalším kritériím jako je bezpečnost vozidel a chodců, vhodnost prostorového řešení pro danou lokalitu, požadovaná koordinace dopravních proudů apd.).

Na základě výše uvedené metody saturovaného toku, metody spotřeby času a iterační metody, tj. metod uvedených v Technických podmínkách Ministerstva dopravy ČR č. 81 (TP 81 [20]) „Navrhování světelných signalizačních zařízení pro řízení silničního provozu“, lze vypočítat kapacitu jednotlivých vjezdů světelně řízené křižovatky. Kapacitu křižovatky poté posuzujeme podle nejnižší kapacitní rezervy dosažené na některém z vjezdů (případně podle nejvyššího kapacitního deficitu).

Pokud nechceme provádět podrobný návrh světelných fází a cyklu řízení, můžeme celkovou kapacitu (výkonnost) světelně řízené křižovatky zjednodušeně odhadnout pomocí přibližné metody „součtu konfliktních proudů“ (popisované v [21]). Výpočetními metodami lze stanovit kapacitu pouze pro pevné signální plány. Vliv konkrétních prvků dynamického řízení na kapacitu křižovatky lze posoudit pouze mikroskopickou simulací silničního provozu. Dle ČSN 73 6102 se jako kritérium kvality světelného řízení uvažuje střední doba zdržení proudu vozidel, která je posuzována zvláště pro každý řadící pruh křižovatky.

Pro výpočty kapacity neřízených úrovnových křižovatek se nejčastěji používá metodika popsána v ČSN 73 6102 „Projektování křižovatek na silničních komunikacích“. V normě je popsána metoda výpočtu kapacity neřízené křižovatky podle Harderse za jistých zjednodušujících předpokladů. Současné metodiky dostatečně nedefinují kapacitu v souvislosti s kvalitou provozu, ani nenabízí vhodně interpretovatelný ukazatel bezpečnosti provozu, proto se hledají modifikace stávajících metodik, resp. nové metodiky pro posuzování kapacity neřízených křižovatek.⁴

Metody výpočtu kapacity malých okružních křižovatek jsou popsány v TP 135 „Projektování okružních křižovatek na silnicích a místních komunikacích“. Používá se především metoda EPFL. Tato metoda umožňuje určit kapacitu jednotlivých vjezdů okružní křižovatky, a tedy i výslednou kapacitní rezervu. Kapacita vjezdu je závislá na počtu vozidel jedoucích po okruhu, počtu vozidel odbočujících na rameni z okruhu a vzdálenosti mezi dvěma kolizními body křižovatky (vjezd a výjezd na příslušném rameni). Oproti dříve používané německé metodice prof. Brillona, která rovněž umožňuje stanovit kapacitu vjezdů okružní křižovatky, nezohledňuje současná metodika intenzity přecházejících chodců a neřeší kapacitu dvoupruhových okružních křižovatek (viz. [5]). Také pro okružní křižovatky se hledají nové metodiky, které by lépe vyhovovaly českým podmínkám.⁵

Celková kapacita okružní křižovatky (součet vozidel vstupujících na všech ramenech do křižovatky za jednotku času) je pouze orientačním údajem, při kvalifikovaném posouzení kapacity křižovatky se uvažuje kapacita jednotlivých prvků okružní křižovatky, proto se u malých okružních křižovatek sledují především kapacity jednotlivých vjezdů a případně výjezdů. U velké okružní křižovatky je zpravidla rozhodující kapacita průpletového úseku. Průpletový úsek je část okružní křižovatky, v níž dochází k připojování a následnému odbočování, eventuálně přetínání drah dopravních proudů pod malým úhlem (do 15 °). Kapacita průpletového úseku je závislá na šířce a délce průpletového úseku a na šířce větví vstupujících do průpletového úseku, tj. na šířce vozovky jednak na vjezdovém rameni, jednak na šířce okruhu v místě usměrňovacího ostrůvku u vjezdu (více viz. [21]). Výpočet kapacity průpletového úseku udává rovněž norma ČSN 73 6102.

4 EDIP s. r. o. *Aktualizace výpočtových modelů pro stanovení kapacity neřízených úrovnových křižovatek.*
http://www.edip.cz/index.php?id=vyzkum&projekt=vyzkum_krizovatky

5 EDIP s. r. o. *Aktualizace výpočtových modelů pro stanovení kapacity okružních křižovatek.*
http://www.edip.cz/index.php?id=vyzkum&projekt=vyzkum_okruzky

5 Výpočet signálního plánu vybrané průsečné křižovatky

Pro potřeby simulační studie realizované v rámci této práce byl vypočítán pevný signální plán pro křižovatku Hradecká – Studentská – Bělehradská v Pardubicích (dále jen HSB), neboť do této křižovatky je zaústěna ulice Studentská v kampusu Univerzity Pardubice a právě provoz na této ulici je v popředí zájmu simulační studie.

Délka cyklu a doby trvání zelených byly vypočítány pomocí metody saturovaného toku, alternativně byla použita také metoda spotřeby času a iterační metoda. Signální plán vypočítaný metodou saturovaného toku byl následně aplikován na křižovatce HSB v simulačním modelu Studentské ulice, který byl vytvořen v simulačním prostředí AIMSUN NG.

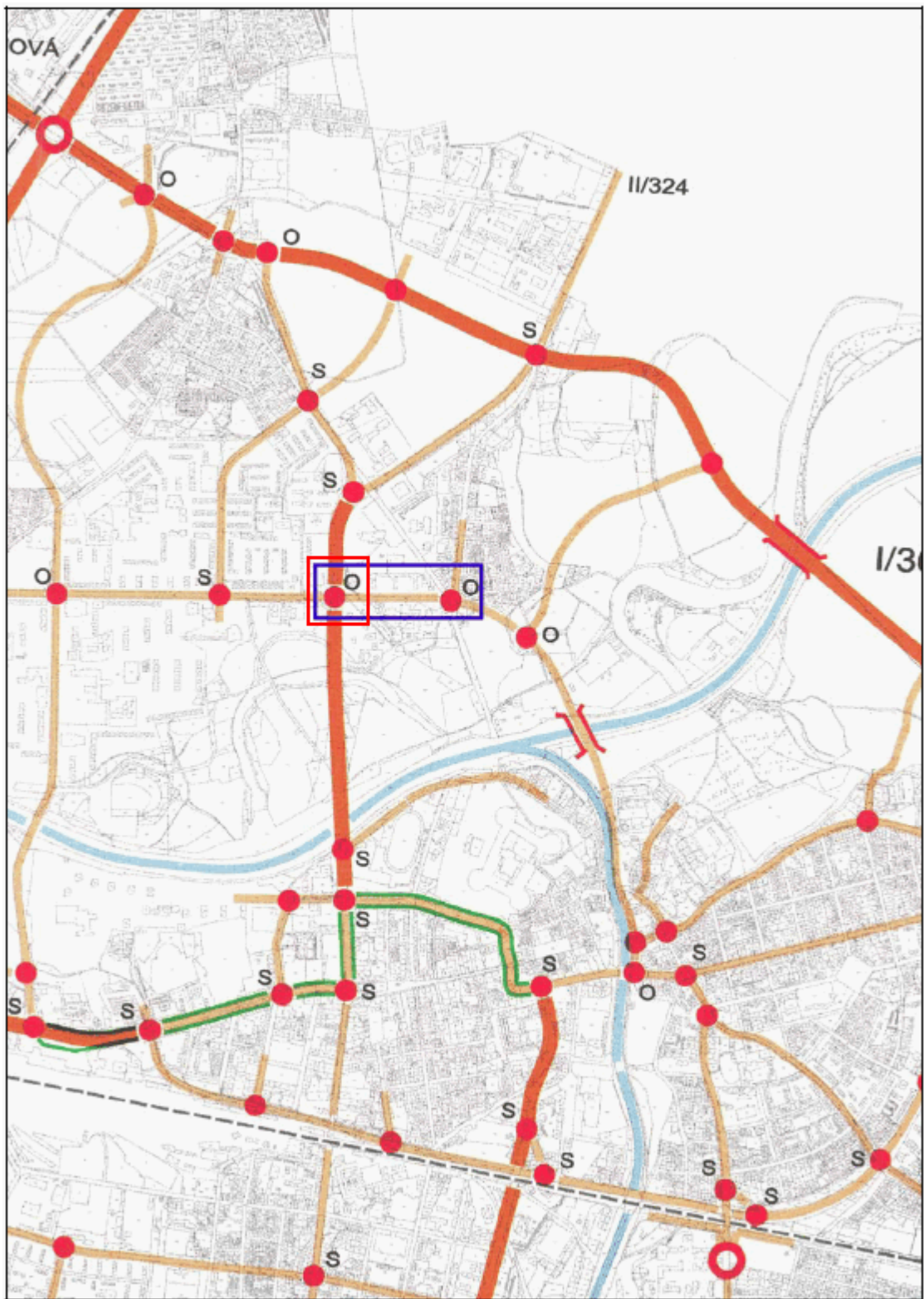
5.1 Vymezení křižovatky a popis současného stavu

Křižovatka Hradecká – Studentská – Bělehradská (HSB) leží v městské čtvrti Polabiny, je součástí hlavního tahu vozidel z centra Pardubic směrem na Hradec Králové, který leží severně od Pardubic. Křižovatka je uvažována v kontextu plánované varianty komunikačního systému města Pardubic, která je zobrazena na obrázku 2. Červeným obdélníkem je vyznačena oblast křižovatky, modrým obdélníkem ulice Studentská, která prochází univerzitním kampusem. Křižovatka HSB je uvažována jako průsečná světelně řízená křižovatka, tj. v geometrickém rozvržení, které odpovídá současnému stavu (viz. obrázek 3).

V bezprostřední blízkosti křižovatky nejsou v rámci zmíněné simulační studie uvažovány žádné proudy chodců, pro účely překlenutí severního vjezdu do křižovatky je vybudován podchod. Zastávky MHD rovněž nejsou umístěny v bezprostřední blízkosti křižovatky a provoz ostatních vozidel významně neovlivňují.

Rozhledové podmínky v křižovatce jsou dobré, podélný sklon ramen křižovatky je zanedbatelný. Ulice Studentská je dvoupruhová obousměrná komunikace. Na vjezdu do křižovatky je provedeno rozšíření pruhu na tři řadící pruhy (pro každý směr jeden řadící pruh), které mají šířku mírně převyšující 3,5 m (při výpočtu signálního plánu je uvažováno 3,6 m). Ulice Bělehradská má také dva pruhy a na vjezdu je provedeno stejné rozšíření, přičemž řadící pruhy pro přímý směr a pro odbočení vpravo mají šířku zhruba 3,5 m, řadící pruh pro levé odbočení má šířku asi 3,3 m. Ulice Hradecká je čtyřpruhová obousměrná komunikace. Na obou vjezdech do křižovatky (severním i jižním) jsou vyznačeny tři řadící pruhy o šířce 3,5 m, pouze řadící pruh společný pro pravé odbočení a přímý směr na severním vjezdu je širší – jeho šířka je přibližně 3,8 m. Na vjezdech z Hradecké ulice je pravý řadící pruh vždy společný pro přímý směr a odbočení vpravo, prostřední pruh je vyhrazen pro přímý směr a levý řadící pruh pro odbočení vlevo.⁶

6 Šířky řadících pruhů jsou pouze orientační, pro účely simulační studie byly přibližně odměřeny z GIS aplikace firmy GEOVAP, spol. s r. o., dostupné z <http://gis.mmp.cz> (digitálních map města Pardubice). Příslušný mapový podklad je zobrazen na obrázku 4.

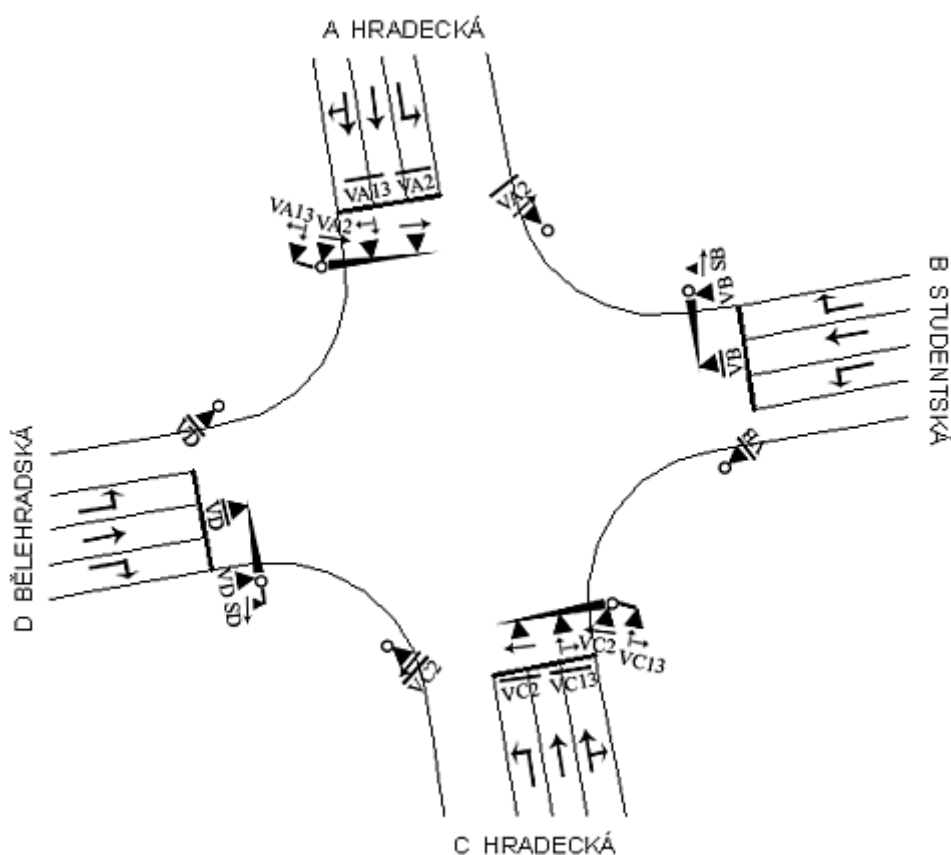


Obr 2. Přehledná situace – podsít' tzv. 5. varianty komunikačního systému města Pardubic (navržené firmou Highway Design) (zdroj: [16])

Je zřejmé, že se nejedná o typickou světelně řízenou křižovatku, neboť na křižovatkách navrhovaných od začátku pro světelné řízení se stopčáry řadicích pruhů umísťují co nejvíce ke středu křižovatky, aby se minimalizovaly potřebné vyklizovací a najížděcí doby, a tím

pádem i mezičasy a čekací doby jednotlivých účastníků provozu. Na křižovatce HSB jsou stopčáry posazeny daleko od středu křižovatky a poloměry trajektorií odbočujících dopravních proudů jsou velké.

Při výpočtu plánu světelné signalizace bylo uvažováno stávající rozmístění návěstidel na křižovatce, které zachycuje obrázek 3. Návěstidla jsou označena podle konvencí uvedených v TP 81 [20] (písmena označují jednotlivá ramena křižovatky a připojené číslice reflektují směry, do kterých jsou propouštěna vozidla ovládaná návěstidly se směrovými signály). Na obrázku jsou znázorněna základní i opakovací návěstidla, opakovací návěstidla mají stejné označení, jako návěstidla základní, jsou však navíc odlišena pruhem. Návěstidla na obou vjezdech z Hradecké ulice obsahují směrové signály, na vjezdech ze Studentské ulice a Bělehradské ulice jsou instalována návěstidla s plnými kruhovými signály a návěstidla *SB* a *SD*, která zobrazují signál doplňkové zelené šipky. Pro signální skupiny budeme používat stejné označení jako pro návěstidla, neboť návěstidlům přímo odpovídají.



Obr 3. Schéma uspořádání křižovatky a rozmístění návěstidel

5.2 Podklady pro výpočet

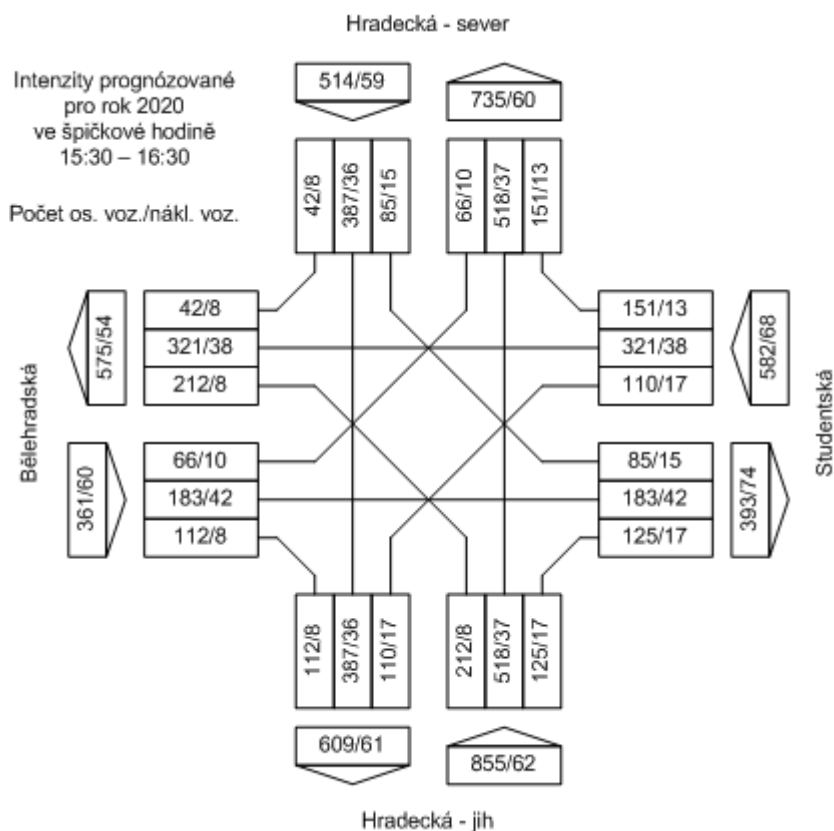
Jako podklad pro výpočet pevného plánu světelné signalizace na křižovatce HSB byly použity tyto materiály:

- Přehledná situace zachycující dopravní uzly v okolí křižovatky (obrázek 2) – křižovatku HSB lze považovat za izolovanou světelně řízenou křižovatku.
- Mapový podklad křižovatky v měřítku 1:500, převzatý z geografického informačního systému města Pardubice – aplikace GS HTML, která byla vytvořena firmou GEOVAP, spol. s r. o. (obrázek 4).
- Intenzity provozu motorových vozidel (osobních a nákladních automobilů) prognózované pro rok 2020 pro špičkovou hodinu, tj. pro časové období od 15:30 do 16:30 hodin, pro jednotlivé směry jízdy na křižovatce. Prognózy zpracovala pomocí počítačového modelu města Pardubice firma DHV CR, spol. s r. o., Praha. Na základě vlastního průzkumu Univerzity Pardubice byly tyto hodnoty dále zpřesněny (obrázek 5).
- Schéma uspořádání křižovatky a rozmístění návěstidel, které jsem zpracoval dle aktuálního stavu křižovatky a výše uvedeného mapového podkladu (viz. obrázek 3).



Obr 4. Mapový podklad křižovatky Hradecká – Studentská – Bělehradská v měřítku 1:500 (zdroj: Digitální mapy města Pardubice – GIS aplikace firmy GEOVAP, spol. s r. o., dostupná z <http://gis.mmp.cz>)

Směrodatné hodinové intenzity provozu pro návrh signálního plánu byly získány převodem původních prognózovaných intenzit ve skutečných vozidlech (viz. obrázek 5) na jednotková vozidla (jv). Převod byl proveden vynásobením počtu skutečných vozidel následujícími koeficienty: 1 osobní vozidlo = 1 jv, 1 nákladní vozidlo = 2 jv. Stejné koeficienty používá při svých výpočtech také firma DHV CR, spol. s r. o., v simulačních studiích [13] a [14].



Obr 5. Grafikon prognózy křižovatkových pohybů (zdroj: [16])

Výsledné intenzity provozu ve skutečných a jednotkových vozidlech pro jednotlivé směry pohybu na křižovatce přehledně shrnuje tabulka 2. Na vjezdech z Hradecké ulice je intenzita přímého směru rozložena vždy na dva řadící pruhy – řadící pruh společný pro odbočení vpravo a přímý směr a na řadící pruh pro samostatný přímý směr, a to tak, aby tyto řadící pruhy nabývaly přibližně stejných intenzit.

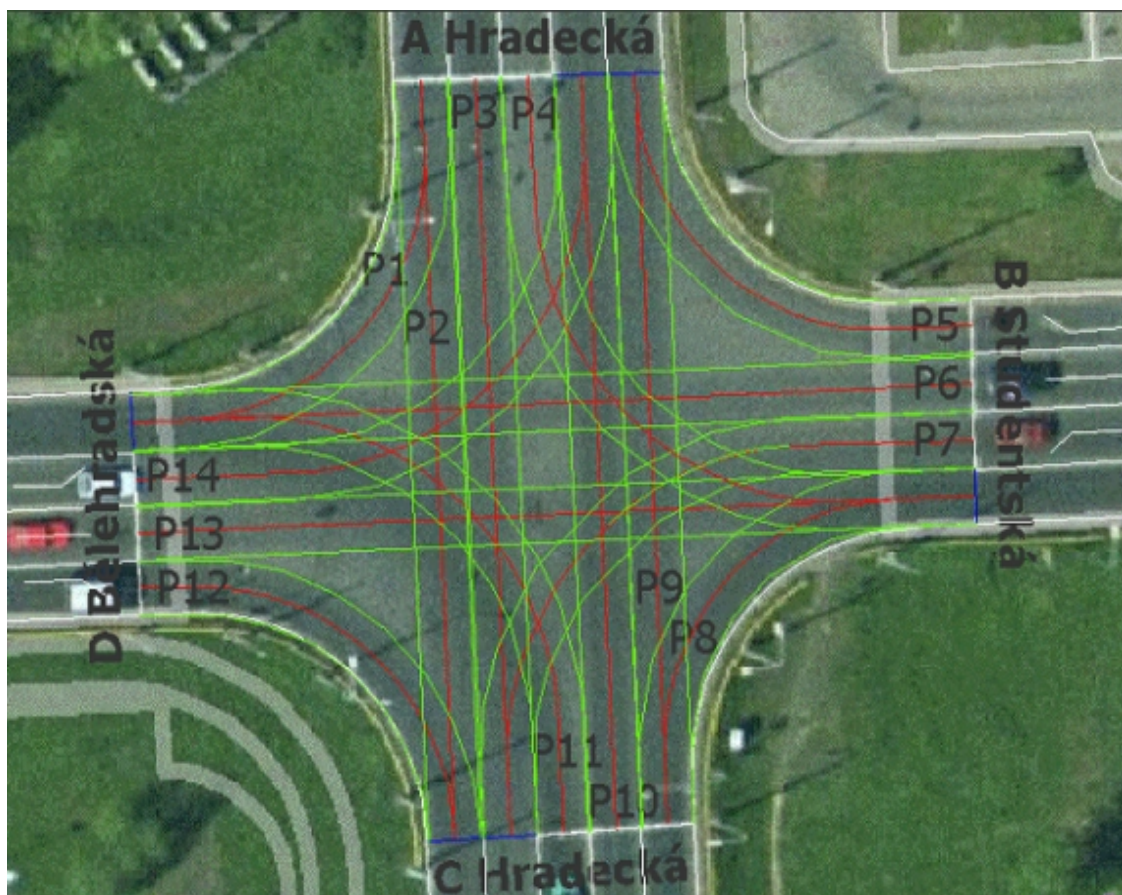
Tab 2. Intenzity provozu ve skutečných a jednotkových vozidlech

Vjezd	Směr (sig. skupina)	Osobní aut.	Nákladní aut.	Celkem jv
A Hradecká	L (VA2)	85	15	115
	R	387	36	459
	P	42	8	58
	Celkem na vjezdu	514	59	632
	R (VA13)	215	22	259
	RP (VA13)	214	22	258
B Studentská	L (VB)	110	17	144
	R (VB)	321	38	397
	P (VB)	151	13	177
	Celkem na vjezdu	582	68	718
C Hradecká	L (VC2)	212	8	228
	R	518	37	592
	P	125	17	159
	Celkem na vjezdu	855	62	979
	R (VC13)	322	27	376
	RP (VC13)	321	27	375
D Bělehradská	L (VD)	66	10	86
	R (VD)	183	42	267
	P (VD)	112	8	128
	Celkem na vjezdu	361	60	481
Na vjezdech celkem		2312	249	2810

Vysvětlivky: L – vlevo, R – rovně, P – vpravo, RP – rovně a vpravo; zdroj: [16]

5.3 Výpočet mezičasů

Na obrázku 6 jsou vyznačeny jednotlivé dopravní proudy na křižovatce HSB (P_1 až P_{14}). Průsečíky os jízdních pruhů představují střetné body, ke kterým je nutné stanovit příslušné mezičasy. Pro výpočet mezičasů je nejdříve potřeba zjistit vyklizovací a najížděcí dráhy. Tyto dráhy byly naměřeny na základě os jízdních pruhů na výše zmíněném mapovém podkladu v měřítku 1:500. Aby bylo dosaženo co největší přesnosti měření, byl mapový podklad importován při nastavení správného měřítka do AutoCADu a následně byly změřeny potřebné vzdálenosti pomocí nástrojů Vzdálenost a Výpis na panelu nástrojů Dotazy. Při měření byly uvažovány i kolizní plochy mezi dopravními proudy patrné ze zeleně vyznačených jízdních pruhů, což vede k přesnějším výsledkům než při uvažování pouhých kolizních bodů.



Obr 6. Znáornění dopravních proudů a kolizních ploch (zdroj: Digitální mapy města Pardubice dostupné z <http://gis.mmp.cz>)

Aby nebyl opomenut žádný mezičas, byla nejdříve sestavena pomocná tabulka 3 zachycující všechny křížné a přípojné kolizní body (odbočné body nebyly uvažovány, protože nepředstavují kolize, ke kterým se stanovují mezičasy). Zvažovány byly kolize mezi všemi možnými pohyby na křižovatce, kolize dopravních proudů P_6 , P_{14} a proudů P_7 , P_{13} nebyly do tabulky poznačeny, protože nejsou řešeny světelným zařízením, na základě pravidel silničního provozu musí vlevo odbočující vozidla po vjetí do křižovatky na plný kruhový signál dávat přednost protijedoucím vozidlům, a to i při světelném řízení.

Tab 3. Kolizní body dopravních proudů $P_1 - P_{14}$, ke kterým je potřeba stanovit mezičasy

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14
P1						přípojný					přípojný			
P2						křížný					křížný	přípojný	křížný	křížný
P3						křížný	přípojný				křížný		křížný	křížný
P4						křížný	křížný	přípojný	křížný	křížný			přípojný	křížný
P5									přípojný					
P6	přípojný	křížný	křížný	křížný					křížný	křížný	přípojný			
P7			přípojný	křížný					křížný	křížný	křížný			
P8				přípojný									přípojný	
P9				křížný	přípojný	křížný	křížný						křížný	
P10				křížný		křížný	křížný						křížný	přípojný
P11	přípojný	křížný	křížný			přípojný	křížný						křížný	křížný
P12		přípojný												
P13		křížný	křížný	přípojný				přípojný	křížný	křížný	křížný			
P14		křížný	křížný	křížný						přípojný	křížný			

Naměřené vyklizovací dráhy L_v a najížděcí dráhy L_n v metrech pro jednotlivé dvojice vyklizujících a najíždějících dopravních proudů jsou uvedeny v tabulkách 4 a 5.

Tab 4. Vyklizovací dráhy (L_v) [m]

vyk.\naj.	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14
P1						30,26					30,26			
P2						22,99					30,71	48,25	30,17	25,01
P3						22,97	44,50				40,82		30,14	23,31
P4						26,75	35,08	42,64	29,03	24,46			38,71	17,42
P5									30,37					
P6	52,60	37,79	34,15	27,50					23,63	27,24	48,90			
P7			42,20	21,40					25,81	31,11	40,11			
P8				29,20									29,20	
P9				29,65	46,73	29,35	24,29						22,15	
P10				41,07		29,45	22,75						22,26	42,49
P11	41,91	28,42	24,10			40,73	16,88						26,58	35,92
P12		30,24												
P13		22,25	25,97	46,70				50,60	36,66	33,05	26,24			
P14		24,33	29,99	41,49						41,49	20,34			

Tab 5. Najížděcí dráhy (L_n) [m]

vykl.\naj.	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14
P1						42,30					34,23			
P2						34,43					20,35	19,63	18,65	18,03
P3						30,64	32,95				8,56		22,26	21,91
P4						19,27	12,00	20,96	21,74	24,71			35,97	29,67
P5									36,72					
P6	20,47	19,39	19,37	19,05					25,75	25,75	27,74			
P7			33,22	26,71					17,78	14,53	7,42			
P8				34,43									40,15	
P9				20,75	20,59	19,94	19,48						33,05	
P10				8,55		23,63	23,18						29,45	31,19
P11	21,73	22,76	25,58			37,22	30,77						18,15	10,00
P12		38,04												
P13		26,57	26,55	28,51				19,19	18,55	18,66	18,33			
P14		19,00	15,37	5,90						32,33	26,03			

Na základě vzorců 2, 3 a 4 uvedených v podkapitole 4.4.2 byly dále z naměřených vzdáleností použitím standardních vyklizovacích a najížděcích rychlostí vypočítány vyklizovací a najížděcí doby mezi dvojicemi kolizních dopravních proudů. Tabulky s těmito doбами zde již nebudou prezentovány z důvodu omezeného rozsahu práce, zájemci je však mohou najít na přiloženém datovém nosiči. Podle vzorce 2 byly poté vypočítány výsledné doby mezičasů mezi kolizními dopravními proudy (viz. tabulka 6) a následně byly sdružením dopravních proudů stanoveny rozhodující mezičasy mezi signálními skupinami uvedené v univerzální tabulce mezičasů 7.

Tab 6. Mezičasy mezi dvojicemi dopravních proudů [s]

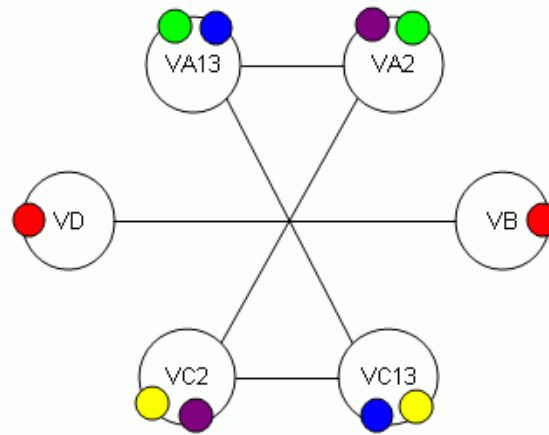
vykl.\naj.	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14
P1						3					3			
P2						2					3	5	4	3
P3						2	3				6		4	2
P4						5	7	6	5	4			5	1
P5									4					
P6	6	5	5	3					3	3	4			
P7			6	2					5	6	8			
P8				2									3	
P9				3	5	4	3						2	
P10				6		4	2						2	3
P11	6	5	4			5	1						5	7
P12		4												
P13		3	3	4				5	5	4	3			
P14		5	6	8						6	2			

Tab 7. Univerzální tabulka mezičasů pro signální skupiny [s]

		NAJÍZDÍ					
		VA13	VA2	VB	VC13	VC2	VD
VYKLIZUJE	VA13			3		6	5
	VA2			7	6		5
	VB	6	3		6	8	
	VC13		6	5			3
	VC2	6		5			7
	VD	6	8		6	3	

5.4 Stanovení sledu fází signálního plánu

Ze signálních skupin křižovatky Hradecká – Studentská – Bělehradská (HSB) byl sestaven graf bezkoliznosti zobrazený na obrázku 7. V grafu jsou různými barvami vyznačeny maximální kompletní podgrafy (tzv. kliky). Signální skupiny, které jsou obsaženy v maximálním kompletním podgrafu grafu bezkoliznosti, jsou kandidátem na fázovou skupinu v signálním plánu křižovatky. Nalezením všech možných maximálních kompletních podgrafů byly získány tyto fázové skupiny: $F_1 = \{VA13, VA2\}$, $F_2 = \{VA13, VC13\}$, $F_3 = \{VA2, VC2\}$, $F_4 = \{VB, VD\}$ a $F_5 = \{VC13, VC2\}$.



Obr 7. Sestavení fázových skupin – graf bezkoliznosti

Signální skupiny SB a SD zahrnující dopravní pohyby na signál doplňkové zelené šipky nebyly při stanovování fázových skupin a výpočtu doby cyklu a zelených uvažovány, stejně jako ve vzorovém příkladu v TP 81 [20], kde pro signální skupinu doplňkové zelené nejsou zvlášť počítány mezičasy (jsou zahrnuty už v rámci příslušných základních signálních skupin) a zelená je pro tuto signální skupinu vhodně doplněna až do výsledného plánu světelné signalizace. Doby doplňkových zelených budou tedy do signálního plánu zapracovány až nakonec s přihlédnutím k potřebným mezičasům a okrajovým podmínkám.

Dále byly pomocí „ruční“ heuristiky popisované v [6] zjištěny minimální množiny fázových skupin, které pokrývají všechny uvažované signální skupiny. Jedná se o množiny $F' = \{F_1, F_4, F_5\}$ a $F'' = \{F_2, F_3, F_4\}$. Ke stejnému výsledku lze dospět také prověřením všech možných kombinací fázových skupin F_1 až F_5 , přičemž je zřejmé, že k pokrytí všech

signálních skupin postačují minimálně tři fázové skupiny, dvěma fázovými skupinami všechny signální skupiny pokrýt nelze.

Ve výsledném signálním plánu lze tedy uvažovat cyklické střídání fázových skupin v těchto pořadích:

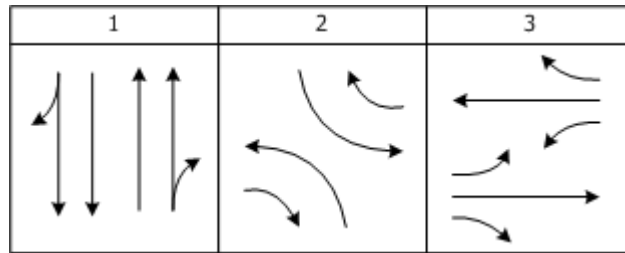
- 1) $F_1, F_4, F_5, F_1, F_4, F_5, \dots$, nebo
- 2) $F_4, F_1, F_5, F_4, F_1, F_5, \dots$, nebo
- 3) $F_2, F_3, F_4, F_2, F_3, F_4, \dots$, nebo
- 4) $F_3, F_2, F_4, F_3, F_2, F_4, \dots$

Všechna ostatní pořadí fázových skupin z množiny F' , resp. F'' jsou už obsažena v uvedených čtyřech variantách.

Do výsledného signálního plánu bude vybrána ta varianta střídání fázových skupin, která má minimální součet rozhodujících mezičasů mezi fázovými skupinami, tj. varianta, která minimalizuje časové ztráty uživatelů křižovatky. Na základě tohoto kritéria (viz. tabulka 8) bylo vybráno pořadí fázových skupin F_2, F_3, F_4 . Stejný součet rozhodujících mezičasů má i pořadí F_3, F_2, F_4 , nicméně varianta F_2, F_3, F_4 má rozhodující mezičasy vzájemně méně odchýlené a odpovídá již zavedené skutečné situaci na křižovatce HSB. Na obrázku 8 je zobrazeno fázové schéma pro výsledné třífázové řízení $F_2 = \{VA13, VC13\}$, $F_3 = \{VA2, VC2\}$, $F_4 = \{VB, VD\}$, které ve 2. fázi zachycuje i signální skupiny SB a SD se signálem doplňkové zelené šipky.

Tab 8. Výpočet rozhodujících mezičasů mezi fázovými skupinami

Varianta	Přechody fází			Celkem [s]
F1 F4 F5	F1-F4	F4-F5	F5-F1	
Mezičasy	3	6	0	
	5	8	6	
	7	6	6	
	5	3	0	
Rozhodující	7	8	6	21
F4 F1 F5	F4-F1	F1-F5	F5-F4	
Mezičasy	6	0	5	
	3	6	3	
	6	6	5	
	8	0	7	
Rozhodující	8	6	7	21
F2 F3 F4	F2-F3	F3-F4	F4-F2	
Mezičasy	0	7	6	
	6	5	6	
	6	5	6	
	0	7	6	
Rozhodující	6	7	6	19
F3 F2 F4	F3-F2	F2-F4	F4-F3	
Mezičasy	0	3	3	
	6	5	8	
	6	5	8	
	0	3	3	
Rozhodující	6	5	8	19



Obr 8. Fázové schéma

5.5 Stanovení délky cyklu a zelených

Délka cyklu a doby zelených pro jednotlivé signální skupiny byly vypočítány metodou saturovaného toku a alternativně také metodou spotřeby času a iterační metodou. V tomto textu bude prezentován výpočet pomocí metody saturovaného toku, výpočet provedený dalšími dvěma metodami, jejichž principy jsou popsány v podkapitole 4.4.4, lze nalézt na příloženém datovém nosiči.

5.5.1 Výpočet provedený pomocí metody saturovaného toku

V tabulce 9 je proveden výpočet délky cyklu a zelených pro jednotlivé signální skupiny metodou saturovaného toku. Jednotlivé kroky výpočtu byly popsány v podkapitole 4.4.6. Při výpočtu se mj. používají mezičasy t_{mi} mezi kritickými vjezdy v jednotlivých fázích, přičemž tyto mezičasy se mají získat ze strukturálního signálního plánu, nikoliv z tabulky mezičasů. Tento plán byl sestaven na základě minimálních přípustných dob zelených a rozhodujících mezičasů mezi fázemi a je uveden v příloze B.

Výpočtem byla stanovena optimální doba cyklu $C_{opt} = 79$ s, která byla zaokrouhlena na 80 s (reálný cyklus C). Výsledné doby zelených, které odpovídají reálnému cyklu, jsou uvedeny v tabulce 9 ve sloupci z [s]. Dále byly vypočítány rovněž kapacity a kapacitní rezervy jednotlivých vjezdů.

Kapacitní zhodnocení navrženého signálního plánu

Kapacita vjezdu na křižovatce udává maximální počet jednotkových vozidel, který může daným vjezdem za hodinu vjet do křižovatky při maximálním využití doby zelené. Vzhledem k tomu, že navržený reálný cyklus $C = 80$ s a doby zelených vykazují kapacitní rezervy na všech vjezdech a doba cyklu je menší než maximální možná doba 120 s, lze obecně konstatovat, že navržený signální plán kapacitně vyhovuje poptávaným intenzitám provozu. Pokud by byl na některém vjezdu zjištěn kapacitní deficit, musela by být délka cyklu a jednotlivých zelených prodloužena.

Nejmenší kapacitní rezervu mají vjezdy ze signálních skupin $VC13$ a $VC2$ (všechny řadící pruhy na jižním příjezdu z Hradecké ulice) a dále vjezd ze signální skupiny VB pro přímý směr ze Studentské ulice do ulice Bělehradské. Minimální kapacitní rezerva 25 % však poukazuje na skutečnost, že při uplatnění navrženého signálního plánu je průběžná světelně řízená křižovatka pro dané intenzity provozu kapacitně štědrým uzlem.

Tab 9. Metoda saturovaného toku (Websterova metoda)

Křižovatka		Hradecká x Bělehradská x Studentská										rok		2020							
signální skupina	i-tá fáze	směrod. intenzita (I) [jv/h]	šířka pruhu (š) [m]	zákl. saturovaný tok (S_{zak}) [jv/h]		sklon (a) [%]	oblouk (R) [m]	podíl odboč. voz. (f)	k_{skl}	k_{obl}	satur. tok vjezdu (S) [jv/h]	stupeň saturace $y, \max y_i$	mezičas (t_{mi}) [s]	ztrátový čas pro fázi (l) [s]	z_{min} [s]	z [s]	z' [s]	kapacita (K) [jv/h]	rezerva (Rez) [%]		
				pruhu	vjezdu																
VA13	1	258	3,8	1909	1909	0	16,9	0,22	1	0,98	1871,65	0,138			11	21	22	515	50		
	1	259	3,5	1900	1900	0			1	1,00	1900,00	0,136			10	21	22	523	50		
VA2	2	115	3,5	1900	1900	0	20,3	1,00	1	0,93	1769,27	0,065			5	13	14	310	63		
VB	3	177	3,6	1810	1810	0	16,4	1,00	1	0,92	1658,32	0,107			8	23	24	497	64		
	3	397	3,6	1810	1810	0			1	1,00	1810,00	0,219	10	9	17	23	24	543	27		
	3	144	3,6	1810	1810	0	20,5	1,00	1	0,93	1686,59	0,085			6	23	24	506	72		
VC13	1	375	3,5	1900	1900	0	16	0,42	1	0,96	1827,36	0,205	6	5	16	21	22	503	25		
	1	376	3,5	1900	1900	0			1	1,00	1900,00	0,198			15	21	22	523	28		
VC2	2	228	3,5	1900	1900	0	20,8	1,00	1	0,93	1772,20	0,129	7	6	10	13	14	310	26		
VD	3	128	3,5	1800	1800	0	16,9	1,00	1	0,92	1653,26	0,077			6	23	24	496	74		
	3	267	3,5	1800	1800	0			1	1,00	1800,00	0,148			11	23	24	540	51		
	3	86	3,3	1780	1780	0	20,4	1,00	1	0,93	1658,08	0,052			5	23	24	497	83		
Y =												0,553	L [s] =		20	C _{opt} =		79 [s]	Min. Rez =		25
														C =		80 [s]					

Poznámka: Mezičasy mezi vyklizujícími signálními skupinami VB, VD a najíždějícími signálními skupinami VA13, VC13 byly prodlouženy na základě okrajových podmínek ze 6 na 10 s, aby vlevo odbočující vozidla v signálních skupinách VB a VD, která dávají přednost protijedoucím vozidlům a zastaví uprostřed křižovatky, měla dostatek času k opuštění křižovatky, než nastoupí další fáze.

Grafické znázornění signálního plánu

Signální plán se graficky znázorňuje v podobě Ganttova diagramu, v němž je na vodorovné ose zobrazeno plynutí času od 0 s až do konce cyklu a na svislé ose jsou uvedeny jednotlivé signální skupiny, pro které je v plánu zakresleno časové rozvržení jednotlivých signálů. Výsledný reálný signální plán pro křižovatku Hradecká – Studentská – Bělehradská je uveden v příloze B.

6 Integrované simulační prostředí AIMSUN NG

V současné době existuje několik desítek specializovaných softwarových nástrojů, které podporují simulaci silničních dopravních systémů. Jejich stručný přehled lze nalézt například v [24] nebo [11]. Podle úrovně detailů, které jsou při simulaci silničních sítí uvažovány, lze rozlišovat simulátory makroskopické, mezoskopické a mikroskopické.

Mikroskopické simulátory přitom umožňují simulovat dopravní procesy na nejvyšší úrovni detailnosti, uvažují například akceleraci a deceleraci vozidel a modelují rozdílné chování řidičů. Oproti tomu makroskopické simulátory od některých detailů abstrahují, a jsou proto vhodné na simulaci rozsáhlých dopravních systémů, kde lze individuální chování jednotlivých vozidel zanedbat (například při simulaci významných městských komunikací a jejich napojení na okolní mimoměstské komunikace).

Při volbě vhodného simulátoru pro realizaci simulační studie je třeba také zvážit, zda se dostupná vstupní data hodí pro parametrizaci vstupů simulátoru, nebo je bude třeba doplnit, případně převést do jiného formátu, zda simulátor poskytuje dostatečné množství relevantních výstupních ukazatelů, požadované výstupní grafické protokoly, zda podporuje 2D nebo 3D run-time animaci simulačního výpočtu, případně možnost provádění interaktivních zásahů do běhu simulačního výpočtu, pokud je tato vlastnost vyžadována.

Integrované simulační prostředí AIMSUN NG, které bylo použito při realizaci simulační studie provedené v této práci, je široce konfigurovatelné a obsahuje celou řadu zajímavých vlastností, které budou popsány v následující podkapitole. Zřejmě pro jeho značnou variabilitu a rozsáhlé schopnosti je často nasazováno na mikroskopickou simulaci segmentů silničních sítí také v podmínkách České republiky.

6.1 Základní vlastnosti a charakteristiky produktu

AIMSUN NG (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks) je softwarovým produktem španělské společnosti TSS – Transport Simulation Systems, která sídlí v Barceloně. Toto simulační prostředí (dříve prodávané pod názvem GE-TRAM) integruje mikroskopický simulátor AIMSUN pro simulaci silniční dopravy (AIMSUN Microscopic Simulator), grafický editor pro modelování silniční sítě (AIMSUN Modeller, dříve nazývaný TEDI) a další podpůrné analytické nástroje do jednotného programového prostředí s jediným hlavním menu, kde jsou k dispozici všechny potřebné funkce.

Základní charakteristiky aplikace AIMSUN NG, které jsou v této podkapitole popsány, lze nalézt na webových stránkách produktu [3]. Jedná se o aplikaci, která byla původně vyvíjena pro operační systémy typu Unix/Linux, nicméně nové verze produktu jsou určeny pouze pro platformu Windows. Ke klasickému simulátoru lze zakoupit i další nástroje, které podporují plánování dopravy a analýzu dopravních dat a poptávky (AIMSUN Planner).

Výrobce se snaží podporovat významné datové formáty jiných firem, AIMSUN NG umožňuje importovat mapové podklady z nejrozšířenějších geografických informačních systémů (ESRI, Tele Atlas, NAVTEQ, ...), výkresy AutoCADu, podkladové obrázky a data z jiných aplikací pro simulaci dopravy (EMME/2, CONTRAM, CUBE, SATURN aj.). Simulátor je možné rovněž napojit na externí databázi nebo on-line produkovaná data, která jsou detekována v reálném provozu.

AIMSUN NG je rozšiřitelné softwarové prostředí, ke kterému je možné doplňovat komponenty implementované výrobcem, nebo komponenty vyvinuté uživateli pomocí zpřístupněného programového rozhraní (API). Rozšiřovat možnosti simulátoru lze v jazyce C++ pomocí Software Development Kitu (SDK), tj. zpřístupněných programových knihoven a jejich dokumentace, nebo lze využít skriptovací jazyk Python pro tvorbu menších rozšíření a automatizaci často prováděných operací.

S produktem je dodávána dokumentace v podobě dvou základních manuálů: AIMSUN Microsimulator Users Manual [1] a AIMSUN NG Users Manual [2], které kompletně pokrývají základní práci se simulátorem – modelování dopravních proudů, řízení dopravy, parametrizaci vstupů simulátoru, zpracování výstupů, verifikaci a validaci modelů a jednotlivé uživatelské funkce, které poskytuje aplikace AIMSUN NG. Především první zmiňovaný manuál je důležitý pro pochopení modelů a algoritmů používaných v mikroskopickém simulátoru.

Další specializovanější manuály se poté zabývají rozšiřitelným programovým rozhraním aplikace (API), importem dat z geografických informačních systémů (GIS), vytvářením pomocných skriptů v Pythonu, funkcemi AIMSUN Planneru pro plánování a analýzu dopravní poptávky a rozhraními pro import a export dat z/do simulačních programů jiných výrobců.

Pro procvičení práce s grafickým editorem silniční sítě a funkcemi simulátoru slouží sada dodávaných podrobně komentovaných příkladů, přičemž hned první tutoriál je pro běžné modelování dopravy klíčový – shrnuje všechny základní principy modelování silniční sítě v AIMSUN NG.

6.1.1 Komponenty simulačního prostředí AIMSUN NG

Simulátor AIMSUN

Kombinovaný (diskrétně-spojité) mikroskopický simulátor AIMSUN umožňuje simulovat běžné dopravní situace na úsecích silniční sítě a na okružních, neřízených úrovnových a mimoúrovňových křižovatkách i na světelně řízených křižovatkách. Je možné simulovat jak řízení s pevným signálním plánem, tak dynamické řízení s modifikací zelené nebo prioritou pro městskou hromadnou dopravu (přídavnou fází). Signální plány je možné importovat z aplikací TRANSYT, Synchro, VS-Plus, Utopia a SCATS.

Při simulaci chování vozidel jsou uvažovány statické a dynamické parametry různých typů vozidel a variabilní chování řidičů. Simulovat lze pohyb osobních a nákladních vozidel, cyklistů, vozidel městské hromadné dopravy (včetně kolejové dopravy) a také pohyb chodců. Dynamika pohybu jednotlivých mobilních entit je ovlivňována nadefinovaným sklonem vozovky, rozhledovými podmínkami v křižovatce, modelem pro změnu jízdnic pruhů, maximálními rychlostmi vozidel, rychlostními omezeními na úsecích apd.

Dále je možné simulovat řízení provozu s navigací řidičů pomocí proměnného dopravního značení (VMS – Variable Message Signs), které může ovlivnit rychlost nebo směrování vozidel, lze simulovat dopravní nehody a jejich dopad na dopravní situaci, strategie zklidňování provozu, systémy navádění vozidel, rozvrhovat trasy veřejné hromadné dopravy nebo vyhodnocovat množství vyprodukovaných emisí a sledovat spotřebu paliva.

Pomocí tzv. triggerů lze nadefinovat spuštění určité události během simulačního výpočtu (řízené přesměrování vozidel, změny rychlosti, uzavření jízdního pruhu pro určitý typ vozidel, výskyt dopravní nehody nebo modifikace signálního plánu).

Simulátor poskytuje různé algoritmy pro modelování dynamického směřování vozidel v rámci silniční sítě. Řidiči vozidel si mohou vybírat trasu například na základě nejkratší vzdálenosti, podle aktuálních dopravních podmínek (navádění simulátorem na trasu s kratší dobou průjezdu), nebo definovaných nákladových funkcí.

AIMSUN Modeller

Editor silniční sítě umožňuje do simulačního modelu importovat digitální mapové podklady a na nich geometricky věrně modelovat dopravní úseky s různým počtem jízdních pruhů a křižovatky, do kterých jsou úseky zaústěny. Modelovat lze také odbočné a přípojné jízdní pruhy, plně dělicí čáry, značení přednosti a světelnou signalizaci na křižovatkách, různé druhy dopravních detektorů, proměnné dopravní značení (VMS) a zastávky MHD.

Doplňkově lze pro účely 3D animace a prezentace simulační studie modelovat také budovy v okolí dopravní infrastruktury, chodníky, stromy apd. Plochy 3D objektů je možné potáhnout texturami pro dosažení realistického vzhledu 3D animační scény. Kromě 3D animace je možné průběh simulačního výpočtu sledovat také ve 2D animačním pohledu, z průběhů 2D a 3D animace je možné pořizovat videozáznamy.

AIMSUN Planner

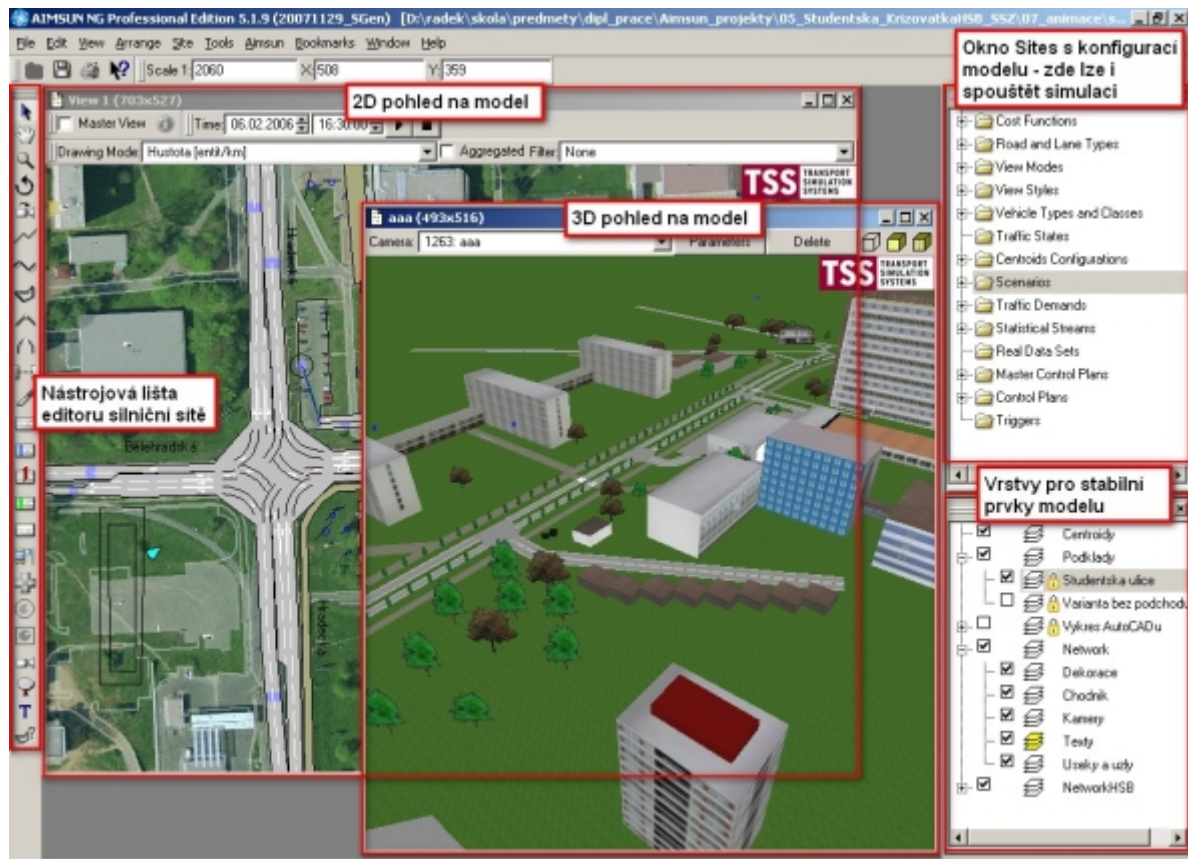
AIMSUN Planner je komponentou, která umožňuje analyzovat dopravní poptávku. Provádí operace založené na O/D maticích, v nichž je dopravní poptávka definována (podrobnější informace o O/D maticích lze nalézt v podkapitole 6.2.3). Jedná se například o slučování, rozdělování a vyvažování O/D matic, o zpřesňování O/D matic na základě nových vstupních dat (matrix adjustment) a automatické generování lokálních O/D matic (Traversal O/D Matrices) pro vybranou podsít' silniční sítě (v rozsáhlém simulačním modelu není nutné provádět vždy simulaci na celé síti). Po nadefinování dopravní poptávky je možné sledovat rozřazení intenzit dopravních proudů na jednotlivé úseky dopravní sítě (traffic assignment), které je prezentováno v přehledné grafické podobě.

AIMSUN Server

AIMSUN Server je verze produktu AIMSUN NG, která neobsahuje grafické uživatelské rozhraní, je dostupná přes počítačovou síť a vhodná pro paralelní on-line simulaci, při níž jsou simulační experimenty prováděny rychleji než odpovídající děje v reálném čase a výsledky experimentů mohou být podkladem pro operativní řízení silniční dopravy.

6.2 Principy tvorby simulačního modelu v AIMSUN NG

Na obrázku 9 je zobrazeno grafické uživatelské prostředí aplikace AIMSUN NG včetně popisu jeho základních částí. 2D a 3D pohledy na model lze otevírat a rušit bez vlivu na definici samotného simulačního modelu (informace o prvcích modelu si aplikace uchovává interně bez ohledu na počet otevřených pohledů na tento model). Dopravní síť modelu a okolní infrastrukturu lze vytvářet pouze prostřednictvím vkládání objektů do 2D modelu a jejich následnou editací. Další konfiguraci modelu lze provádět v okně „Sites“.



Obr 9. Integrované prostředí aplikace AIMSUN NG

Simulační model lze vytvořit nadefinováním všech potřebných vstupů simulátoru, přičemž lze postupovat pomocí následujících kroků:

- Definovat dopravní infrastrukturu modelu (s využitím mapového podkladu),
- parametrizovat řízení dopravy v rámci silniční sítě – upravit přednosti na křižovatkách, definovat signální plány, upravit globální vstupní parametry modelu, vlastnosti vozidel a vlastnosti úseků, které mohou ovlivňovat pohyb vozidel,
- nadefinovat dopravní poptávku, včetně dopravních proudů chodců a plánu veřejné hromadné dopravy (pokud jsou tyto dopravní proudy uvažovány),
- vytvořit a parametrizovat scénář, experimenty a příslušné replikace.

V nabídce hlavního menu Edit → Preferences... lze nadefinovat základní vlastnosti modelu jako používané metrické jednotky, jízdu automobilů po pravé nebo levé straně komunikace, způsob zobrazování některých prvků silniční sítě ve 2D a 3D pohledu, základní údaje pro nahrávání videozáznamu apd.

6.2.1 Modelování dopravní infrastruktury

Editace základních prvků modelu je podrobně a výstižně popsána v tutoriálu [10], který je dodáván společně s aplikací AIMSUN NG, zde budou zmíněny pouze základní principy a možnosti, které simulační prostředí AIMSUN NG při vytváření modelů nabízí, a postupy, které nemusí být z manuálů zřejmé.

Pokud má silniční infrastruktura v simulačním modelu věrně odpovídat reálné nebo naplánované situaci, je nanejvýš vhodné importovat do modelu mapový podklad v příslušném měřítku. Měřítko lze v aplikaci AIMSUN NG nastavit ve vlastnostech importovaného obrázku (parametr „Scale“ nastavíme na požadovanou hodnotu, např. 1:500). Případně můžeme importovat podklad v podobě výkresu AutoCADu (ten se automaticky vloží ve správném měřítku). Využit lze také formáty podporované geografickými informačními systémy (tzv. shape files). Mapový podklad je vhodné po úspěšném vložení uzamknout proti nechtěnému posunu nebo změně velikosti (v okně „Layers“). U obrázku navíc můžeme povolit příznak „Show contents while selected“, aby zůstal zobrazen, i když jej vybereme myší, a nezobrazovaly se pouze jeho obrysy.

Vložené mapové podklady jsou evidovány v okně „Layers“. V tomto okně aplikace jsou zobrazovány vrstvy, do kterých můžeme zařazovat jednotlivé prvky modelu. Grafické objekty, které jsou součástí stejné vrstvy, lze hromadně skrýt nebo zobrazit, následně je lze také snáze označit a hromadně s nimi manipulovat. Vrstvy jsou používány také pro seskupování elementů se stejnou nadmořskou výškou. Každé vrstvě lze přiřadit určitou úroveň vykreslení, objekty z vrstvy s vyšší úrovní se vykreslí nad objekty z vrstvy s nižší úrovní – takto lze modelovat mimoúrovňové křížení komunikací.

Modelování úseků

Na mapový podklad lze rozmístit požadované úseky silničních komunikací („Sections“) a provázat je pomocí uzlů – křižovatek („Nodes“). Obousměrné komunikace se modelují pomocí dvou samostatných úseků, které jsou ve 2D pohledu taženy protisměrně. V rámci každého úseku lze potom nastavit libovolný počet jízdních pruhů („Lanes“) a těmto jízdním pruhům nadefinovat šířku.

Úseky lze pomocí nástrojů editoru dopravní sítě spojovat, jeden úsek lze rozdělit na více úseků, krajní jízdní pruh úseku lze pomocí úchytných bodů před koncem úseku rozšířit do více jízdních pruhů, aplikováním nástrojů „Creates a New Vertex“ na osy úseků lze tyto úseky zalomit nebo zakřivit, aby jejich geometrie odpovídala geometrii v podkladovém vzoru.

AIMSUN NG rozlišuje několik standardních kategorií úseků, které jsou uvedeny ve složce „Road and Lane Types“ v okně „Sites“ a liší se různými předdefinovanými parametry (maximální povolenou rychlostí, kapacitou jízdních pruhů, zpožděním apd.): „Arterial“ (výchozí typ pro městskou komunikaci), „Road“ (rychlostní komunikace), „On/Off Ramp“ (nájezdy/výjezdy z rychlostní komunikace), „Freeway“ (dálnice), „Ringroad“ (okružní páteřní komunikace), „Urban Road“ (méně kapacitní městská komunikace), „Street“ (méně kapacitní komunikace s větším zpožděním), „Signalized Street“ (komunikace s větším zpožděním a ještě menší kapacitou), „Reserved (Compulsory) for Public“ (obytná zóna, komunikace vyhrazená pro pěší), „Internal“ (typ pro vnitřní pomocné úseky křižovatek, které jsou používány pro věrné modelování odbočování v křižovatce). Kromě již nadefinovaných typů úseků lze samozřejmě vytvářet vlastní uživatelské typy úseků.

Parametry jednotlivých úseků v simulačním modelu lze nastavovat také individuálně podle potřeby. Seznam nejdůležitějších parametrů úseků se stručnou charakteristikou je uveden v tabulce 10. Některé z parametrů ovlivňují i dynamické chování vozidel jedoucích po úseku. Modely, které se v AIMSUN NG uplatňují při modelování pohybu vozidel, budou podrobněji popsány dále v textu.

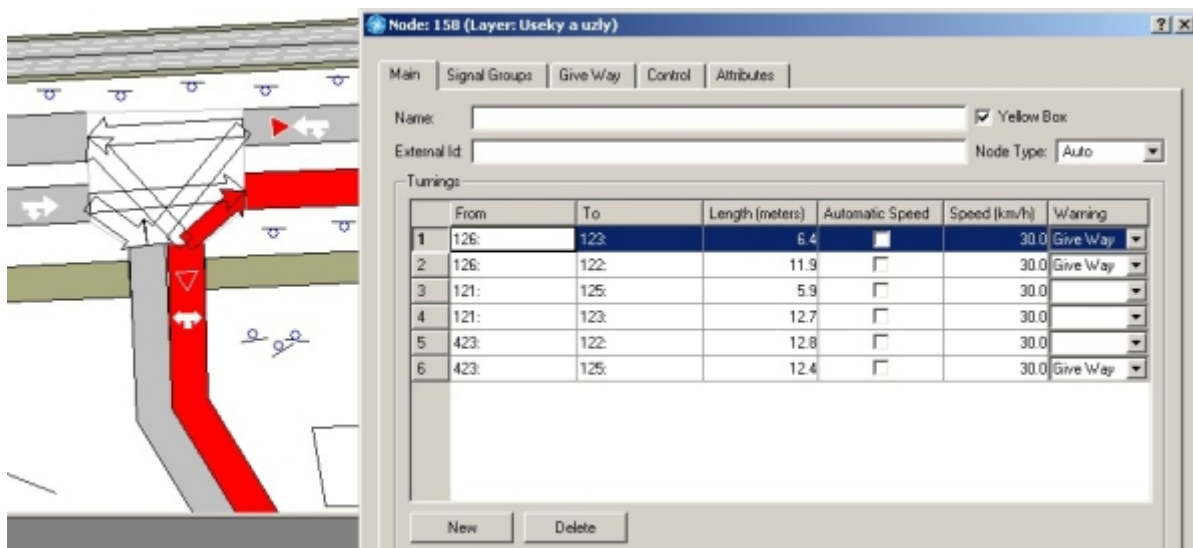
Tab 10. Základní lokální parametry úseků

Parametr	Popis	Jednotka
Section speed limit	Maximální povolená rychlost.	km/h
Turning speed	Maximální rychlost při zatáčení, platná od počátku odbočování	km/h
Visibility distance	Při přibližování vozidla ke křižovatce po úseku, na jehož konci se dává přednost v jízdě (bez nutného zastavení), je aplikován gap-acceptance model pro zařazení vozidla do hlavního proudu, a to kdykoliv je vzdálenost ke konci úseku menší než vzdálenost udaná tímto parametrem. Pokud vzdálenost přesahuje délku úseku, uvažuje se už od předchozího úseku.	m
Yellow box speed	Vozidlo blížící se po tomto úseku ke křižovatce nevjede do prostoru křižovatky, když je rychlost předchozího vozidla, které se pohybuje v křižovatce, pod touto hodnotou. Pokud je tedy na úseku nastavena hodnota 0, vozidlo vjede do křižovatky vždy, čímž lze lokálně zrušit funkci příznaku yellow box, který je aplikován v křižovatce.	km/h
Distance zone 1	Časová vzdálenost první zóny lane-changing modelu od místa, v němž úsek ústí do křižovatky. Tato vzdálenost ovlivňuje snahu vozidel zařadit se do správného řadicího pruhu na vjezdu do křižovatky. Parametr se používá na úsecích, které jsou zaústěny do křižovatky s více řadicími pruhy. V různých zónách definovaných před křižovatkou se vozidlo snaží o přeřazení s různým stupněm urgency. Parametry Distance zone ovlivňují také přeřazování vozidel do odbočného jízdního pruhu na úsecích s těmito pruhy (tj. chování off-ramp modelu).	s
Distance zone 2	Časová vzdálenost druhé zóny lane-changing modelu od místa, v němž úsek ústí do křižovatky. Tato vzdálenost ovlivňuje snahu vozidel zařadit se do správného řadicího pruhu na vjezdu do křižovatky. Parametr se používá na úsecích, které jsou zaústěny do křižovatky s více řadicími pruhy.	s
Distance on-ramp	Časová vzdálenost na postranním jízdním pruhu měřená od konce postranního pruhu (místa sloučení s hlavním jízdním pruhem), v rámci které je postranní pruh považován za přípojný a je aplikován on-ramp model pro zařazení vozidel do hlavního proudu. Tento parametr se používá na úsecích s přípojnými jízdními pruhy (v on-ramp modelu).	s
Section slope	Podélný sklon úseku zadávaný pomocí nadmořské výšky počátku a konce úseku (v metrech).	%
Maximum give way time variability	O tuto hodnotu je navýšen atribut maximum give way time vozidla, které jede po úseku. Tímto lze lokálně zvýšit nebo snížit dobu, po kterou je řidič vozidla ochoten dávat přednost vozidlům v hlavním proudu, aniž by se zvyšovala jeho „agresivita“. Po uplynutí stanovené doby se zredukuje omezení pro zařazení do hlavního proudu. Tento parametr slouží pro lokální kalibraci situace dávání přednosti na vedlejších úsecích ústících do křižovatky. Parametr je použit také v lane-changing modelu jako doba, po kterou vozidlo čeká na možnost zařazení do správného řadicího pruhu, než svou snahu vzdá a pokračuje v cestě stávajícím jízdním pruhem.	s

zdroj: [1]

Modelování křižovatek

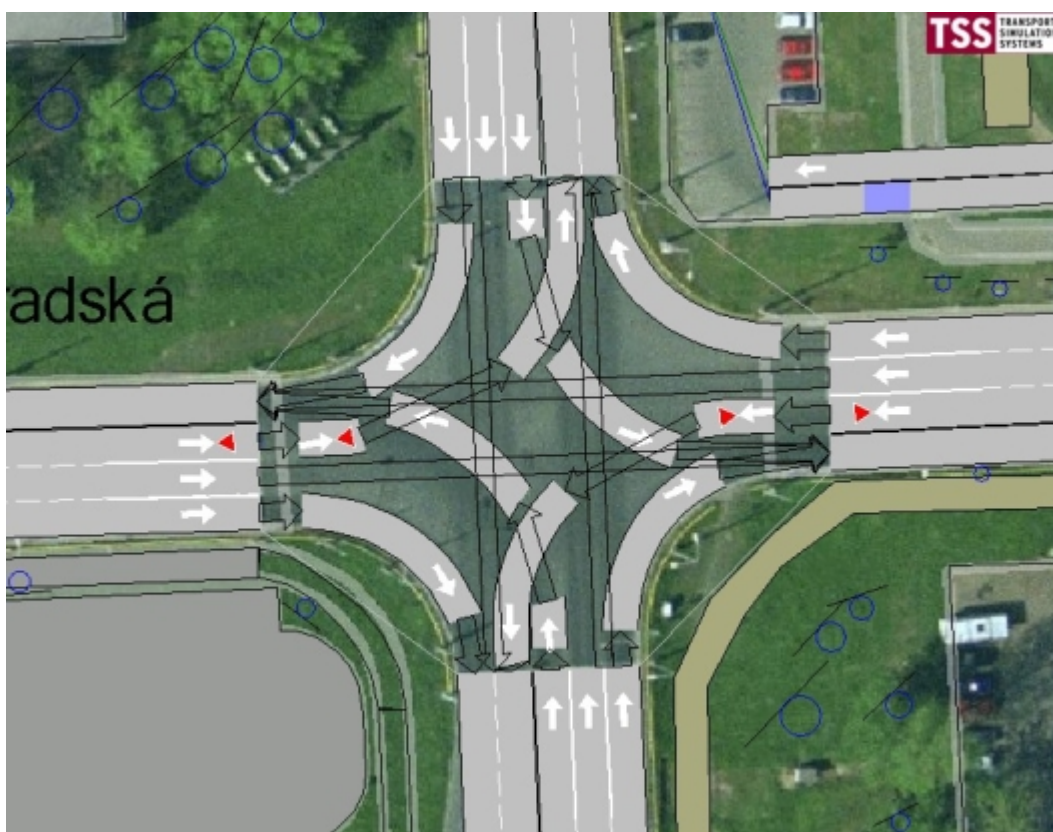
Pomocí nástroje „Creates a Node“ lze úseky propojit do křižovatky, způsob napojení jednotlivých jízdních pruhů se přitom definuje jednoduchým výběrem počátečních a koncových úseků ve 2D pohledu pro jednotlivé směry pohybu v křižovatce (pomocí klávesy Shift lze vybrat i konkrétní jízdní pruhy v rámci úseku). Pohybům lze dále nastavit vlastní rychlostní omezení, příznakem „Give Way“, resp. „Stop“ se označují dopravní proudy, které dávají přednost v jízdě jiným dopravním proudům. Příslušný dialog pro definici pohybů v rámci křižovatky je zobrazen na obrázku 10. Přednosti lze v případě potřeby podrobněji definovat na záložce „Give Way“ dialogu.



Obr 10. Definice dopravních pohybů v křižovatce

Použitím příznaku „Yellow Box“ lze zajistit standardní chování vozidel v křižovatce vyžadované dopravními předpisy, tj. aby vozidla nevjížděla do vnitřního prostoru křižovatky, pokud nemají zajištěn bezpečný průjezd křižovatkou.

Příklad složitějšího propojení jízdních pruhů v rámci křižovatky, ve které jsou pomocí vnitřních úseků modelovány trajektorie odbočování, je uveden na obrázku 11.

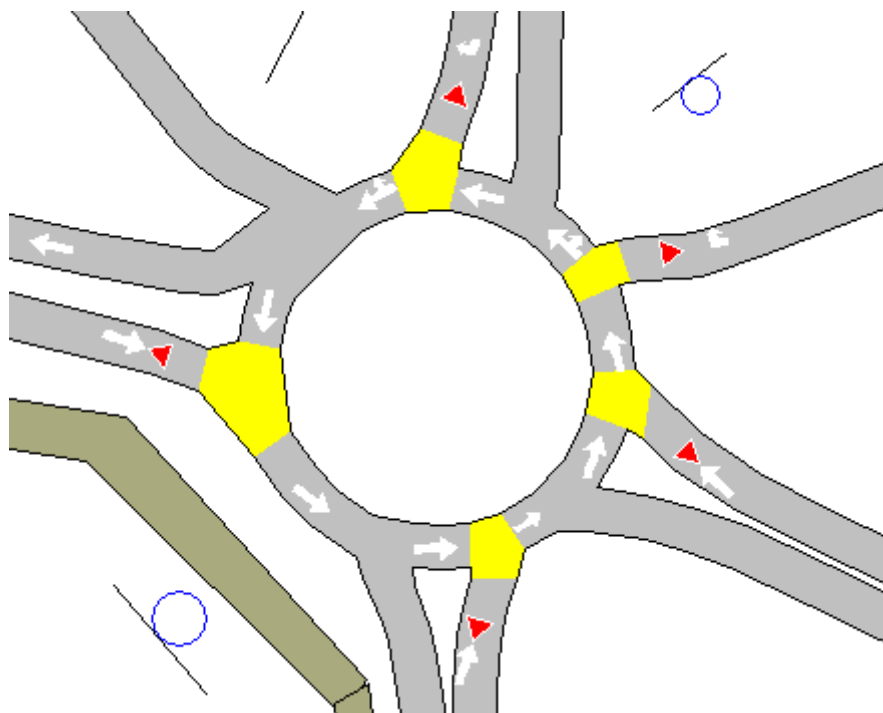


Obr 11. Modelování propojení jízdních pruhů a vnitřních trajektorií v křižovatce

V tomto případě musí být v editačním dialogu křižovatky definována i všechna propojení mezi vnitřními úseky. Na základě komunikace s výrobcem aplikace AIMSUN NG jsem získal podrobnější informace o správném modelování průsečných a okružních křižovatek. Vnitřní úseky je třeba modelovat tak, aby se vzájemně nepřekrývaly, protože konflikty vozidel jsou uvažovány pouze mezi nadefinovanými spojnicemi (na obrázku jsou zobrazeny průhlednými šipkami), případně mezi spojnicemi a vnitřními pomocnými úseky, vzájemné konflikty mezi vnitřními úseky nejsou uvažovány.

Na vjezdech je nutné jednotlivé řadící pruhy oddělit plnou dělicí čarou, pokud je však dělicí čára příliš dlouhá, mohlo by v modelu docházet k situaci, kdy nemají vozidla dostatek prostoru pro přerazení do správného řadícího pruhu – vždy je nutné správně nastavit parametry úseků, které jsou zaústěny do křižovatky, konkrétně parametry lane-changing modelu, který je v AIMSUN NG aplikován při přejíždění vozidel mezi řadícími pruhy. Bližší informace o lane-changing modelu lze nalézt v manuálu [1].

Modelování okružních křižovatek není oproti výstavbě ostatních částí simulačního modelu příliš intuitivní. Okružní křižovátku je třeba modelovat jako skupinu dílčích tříramenných stykových křižovatek a jednotlivé úseky křižovatky vhodně parametrizovat. Obrázek 12 demonstruje doporučený způsob výstavby okružní křižovatky: Dílčí stykové křižovatky na vjezdech jsou označeny příznakem „Yellow Box“ a vozidla na vstupních úsecích dávají na základě příznaku „Give Way“ přednost vozidlům jedoucím po okruhu. Dobu, po kterou jsou vozidla ochotna čekat při dávání přednosti na vjezdech, lze lokálně navýšit pomocí parametru „Maximum Give Way Time Variability“ vstupních úseků.



Obr 12. Modelování okružní křižovatky

Aby mohla vozidla na okruhu neomezeně vjíždět do žlutě vyznačených křižovatek s příznakem „Yellow Box“, je vhodné u všech úseků na okruhu lokálně zrušit působnost tohoto příznaku nastavením jejich parametru „Yellow Box Speed“ na 0 km/h (pro tento účel lze nadefinovat vlastní nový typ úseků). Příznak „Yellow Box“ tak budou dodržovat pouze vozi-

dla na vjezdech, která nevjedou na okruh, pokud nebudou mít zaručen volný průjezd alespoň za hranici žluté oblasti.

Výrobce aplikace AIMSUN NG provedl na základě problému se vzájemným zablokováním vozidel na okruhu, který jsem výrobcovi reportoval, některé úpravy simulátoru, jenž vylepšují chování vozidel, a dále doporučil, aby byla šířka jízdního pruhu na okruhu zmenšena na výchozí 3 m, neboť šířka pruhu ovlivňuje pouze výpočet konfliktních zón v rámci stykových křižovatek a s větší šířkou může docházet k častějšímu výskytu vzájemného zablokování vozidel. Je ovšem třeba poznamenat, že ani po provedených opatřeních nelze výskyt tzv. deadlocku zcela vyloučit a v ojedinělých případech, kdy jsou do křižovatky vpouštěny vysoké intenzity vozidel, se může problém znovu objevit (odhadem např. ve 2 replikacích z 50).

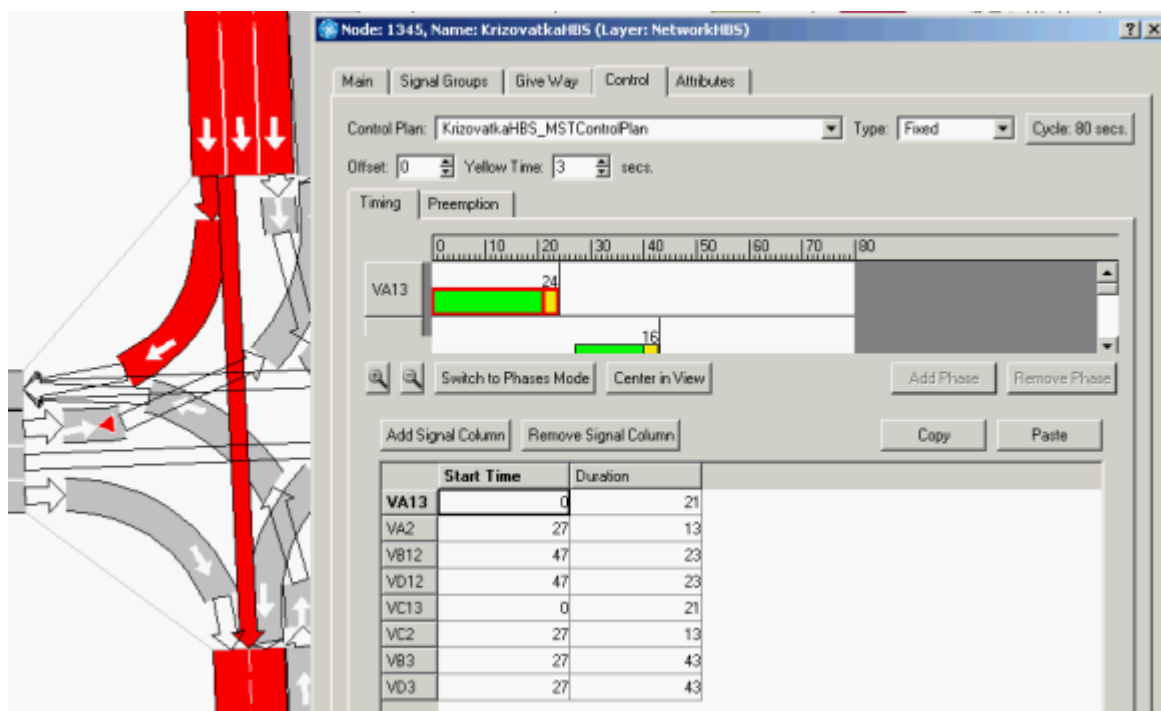
6.2.2 Parametrizace řízení dopravy

V aplikaci AIMSUN NG lze nastavovat celou řadu vstupních parametrů simulačního modelu. Jak již bylo zmíněno, přednost vozidel na křižovatkách lze upravovat pomocí příznaků „Give Way“ a „Stop“, které lze nastavit v dialogu „Node“ s vlastnostmi křižovatky při definici napojení jednotlivých úseků a jízdních pruhů v křižovatce. V tomto dialogu lze přednosti podrobněji upravit na záložce „Give Way“. Na záložkách „Signal Groups“ a „Control“ je možné nadefinovat také signální plán pro danou křižovatku.

Definice pevného signálního plánu

Na záložce „Signal Groups“ v dialogu s vlastnostmi křižovatky lze nadefinovat signální skupiny výběrem řadicích pruhů, ve kterých se nachází dopravní proudy zahrnuté do signální skupiny. Na záložce „Control“ se potom určuje typ signálního plánu („Fixed“ – pevný, „External“ – s externími vstupními daty, „Actuated“ – dynamický), délka cyklu, doba trvání žlutého signálu po skončení zeleného signálu, doby jednotlivých fází, resp. přímo začátky a doby trvání zelených pro jednotlivé signální skupiny.

Na podzáložce „Timing“ záložky „Control“ lze v módu pro zadávání fází dobu cyklu graficky rozdělit mezi jednotlivé fáze a fázím přiřadit odpovídající signální skupiny. Pomocí tlačítka „Switch to Signals Mode“ se lze dále přepnout do módu pro podrobnější nastavení zelených – zelený signál lze jednoznačně popsat zadáním doby začátku zelené v rámci cyklu a doby, po kterou bude zelená trvat. Příslušný dialog je zobrazen na obrázku 13. U každého signálního plánu lze na podzáložce „Preemption“ zajistit přednost vozidel veřejné hromadné dopravy, která jsou při příjezdu ke křižovatce rozpoznána pomocí detektorů.



Obr 13. Definice zelených v signálním plánu

Dynamický plán světelné signalizace

Dalším typem signálního plánu, který lze na křižovatce definovat, je dynamický signální plán („Actuated Control Plan“), v němž jsou doby zelených zkracovány nebo prodloužovány na základě (ne)přítomnosti vozidel na vjezdu, jenž je zjišťována pomocí detektorů. Detektory se osazují na vstupní úseky křižovatky (nebo jejich řadičí pruhy), zhruba do vzdálenosti 50 m před stopčárou. Definice dynamického plánu je podrobně popsána v manuálu [2].

Globální parametry simulačního modelu

Globální vstupní parametry simulačního modelu ovlivňují chování vozidel na celé modelované silniční síti, přičemž nejsou definovány na úrovni typů vozidel, ani na úrovni úseků silniční sítě. V tabulce jsou shrnuty některé nejdůležitější globální parametry, popis všech dostupných parametrů lze nalézt v [1].

Tab 11. Základní globální parametry simulačního modelu

Parametr	Popis	Jednotka
Simulation step	Interval, ve kterém jsou pravidelně aktualizovány stavy všech elementů v systému. Hodnotu simulačního kroku lze nastavovat v rozsahu $<0,1; 1>$. Simulační krok má vliv na reakční doby řidičů, pokud jsou reakční doby odvozovány z hodnoty simulačního kroku (což platí při výchozím nastavení simulačního modelu – viz. driver's reaction time). Nižší hodnoty simulačního kroku mohou tedy způsobovat urychlení reakcí řidičů, ti jsou schopni udržovat v dopravním proudu menší mezery mezi vozidly a snáze se vřadit do jiného dopravního proudu – zvyšuje se kapacitní propustnost modelu.	s
Driver's reaction time	Reakční doba řidiče při pohybu vozidla – čas, který trvá řidiči pohybujícího se vozidla zareagovat na změny rychlosti předcházejícího vozidla, které jede před ním. Může být fixní (rovný simulačnímu kroku – výchozí nastavení), nebo variabilní (podle uživatelsky nadefinovaného diskrétního rozdělení pravděpodobnosti, které může být různé pro různé typy vozidel).	s
Reaction time at stop	Čas, který trvá řidiči stojícího vozidla, aby zareagoval na akceleraci předcházejícího vozidla, nebo na zobrazení zelené na semaforu (může být fixní nebo variabilní stejně jako reakční doba řidiče při pohybu vozidla).	s
Queuing up speed	Vozidla, jejichž rychlost se sníží pod tuto hodnotu, jsou považována za stojící a jsou zahrnuta do fronty vozidel stojících na úseku. Tento parametr ovlivňuje statistické ukazatele počtu zastavení a délky fronty.	m/s
Queue leaving speed	Vozidla, jejichž rychlost se zvýší nad tuto hodnotu, už nejsou považována za stojící a jsou vyčleněna z fronty vozidel stojících na úseku. Tento parametr ovlivňuje statistické ukazatele doby stání a délky fronty.	m/s
Car-following model	Verze car-following modelu uplatňovaného při následování vedoucího vozidla v dopravním proudu (4.1, 4.2). V nové verzi 4.2 je upraven způsob odhadu decelerace vedoucího vozidla.	–
Look ahead	Maximální počet odbočení uvažovaných dopředu při plánování změny jízdního pruhu na následující křižovatce (standardně 2).	–

zdroj: [1]

Vlastnosti vozidel

Mezi vstupní parametry ovlivňující modelování pohybu vozidel lze zařadit nepochybně atributy jednotlivých typů vozidel a také lokální parametry úseků. Základní lokální parametry úseků již byly popsány v tabulce 10, základní atributy typů vozidel jsou uvedeny v tabulce 12.

Tab 12. Základní atributy typů vozidel

Parametr	Popis	Jednotka
Length	Střední, minimální a maximální délka vozidla.	m
Width	Střední, minimální a maximální šířka vozidla, která je používána pouze pro účely animace, v modelech ovlivňujících chování vozidel se neuplatňuje.	m
Maximum desired speed	Střední, minimální a maximální hodnota pro maximální rychlost vozidla. Skutečná hodnota rychlosti je získána z normálního rozdělení pravděpodobnosti, v kterém je uvažována zadaná střední hodnota a směrodatná odchylka.	km/h
Maximum acceleration	Střední, minimální a maximální hodnota pro maximální zrychlení vozidla.	m/s ²
Normal deceleration	Střední, minimální a maximální hodnota pro maximální zpomalení vozidla, které vozidlo může použít za normálních podmínek.	m/s ²
Maximum deceleration	Střední, minimální a maximální hodnota pro maximální zpomalení vozidla, které vozidlo může použít za speciálních podmínek – např. při brzdění v případě nouze.	m/s ²
Speed acceptance	Střední, minimální a maximální hodnota pro stupeň dodržování rychlostních limitů na úsecích. Hodnota ≥ 1 znamená, že vozidlo bude za maximální povolenou rychlost na úseku považovat hodnotu rovnou nebo větší, než je rychlostní limit úseku, v opačném případě použije menší rychlost.	–
Maximum distance between vehicles	Střední, minimální a maximální hodnota vzdálenosti, kterou vozidlo zachová při zastavení za předcházejícím vozidlem.	m
Give way time	Střední, minimální a maximální doba, po kterou je řidič ochoten čekat při dávání přednosti jiným vozidlům. Po uplynutí stanovené doby se zredukuje omezení pro zařazení vozidla do hlavního proudu. Parametr je použit v lane-changing modelu jako doba, po kterou vozidlo čeká na možnost zařazení do správného řadicího pruhu, než svou snahu vzdá a pokračuje v cestě stávajícím jízdním pruhem.	s
Guided vehicles	Procento vozidel volně navigovaných simulátorem (tato vozidla nejsou nucena použít trasy speciálně definované uživatelem). Tento parametr je použit pouze v simulačním modelu se směřováním vozidel, tj. v modelu, v němž je dopravní poptávka definována pomocí O/D matic.	%
Guidance acceptance	Střední, minimální a maximální hodnota pro procento určující pravděpodobnost, že se vozidlo bude řídit podle navigačních informací poskytovaných simulátorem, tj. například informacemi, které vozidlo získá z proměnného dopravního značení (Variable Message Signs).	%
Equipped vehicles	Procento vozidel, která jsou evidována jako „označená“. Tato vozidla mohou být detekována detektory s povolenou možností „Equipped“ (lze sledovat časy průjezdů různých/vybraných typů vozidel na jednotlivých detektorech, označeným vozidlům lze zajistit přednost na světelně řízené křižovatce apd.)	%
PCUs (passenger car unit)	Počet jednotkových vozidel, na které je převáděno vozidlo daného typu.	ju

zdroj: [1]

Modely chování vozidel použité v simulátoru

V mikroskopické simulaci v produktu AIMSUN NG jsou aplikovány následující modely ovlivňující chování vozidel při průjezdu simulovanou silniční sítí:

- 1) *Car-following model* stanovuje rychlost, zrychlení a zpomalení vozidel odpovídající okolnostem v modelu. Přitom skutečná rychlost, na kterou vozidlo může zrychlit, je vypočítána podle empiricky stanoveného vzorce na základě rychlostního limitu úseku, stupně dodržování rychlostních limitů, maximální rychlosti vozidla, maximální akcelerace vozidla, reakční doby řidiče, pozice vozidla a na základě odhadu zpomalení, pozice a efektivní délky přecházejícího (vedoucího) vozidla. Pozice vozidla je aktualizována na základě vypočítané rychlosti.

- 2) *Gap-acceptance model* implementuje algoritmus, který rozhoduje, zda v hlavním proudu vozidel existuje dostatečná mezera pro vřazení vozidla z vedlejšího dopravního proudu, popřípadě, zda existuje dostatečná mezera pro přerazení vozidla do jiného řadicího pruhu a zda lze provést předjížděcí manévr bez významného omezení protijedoucích a souběžně jedoucích vozidel. Model zjišťuje, zda lze provést přerazení vozidla požadované v lane-changing modelu. Gap-acceptance model je ovlivňován maximální rychlostí a zrychlením vozidel, stupněm dodržování rychlostních limitů, maximální dobou, po kterou jsou řidiči ochotni dávat přednost ostatním vozidlům, a parametrem „visibility distance“ úseků.
- 3) *Lane-changing model* ovlivňuje chování vozidel při změně jízdního pruhu. Vozidlo se může snažit změnit jízdní pruh v těchto případech: Když vozidlo před ním jede menší rychlostí, nebo naopak poměrně rychleji (předjíždění, přerazení do rychlejšího nebo pomalejšího jízdního pruhu), když se vozidlo řadí do vhodného pruhu na vjezdu křižovatky, když z přípojného pruhu najíždí do hlavního proudu vozidel a když se z hlavního proudu vozidel přerazuje do odbočného jízdního pruhu. Aby bylo dosaženo přesnější reprezentace změny jízdního pruhu, jsou v rámci každého úseku uvažovány 3 zóny, ve kterých se vozidla snaží provést přerazení s různým stupněm urgencye tak, aby na konci úseku dosáhla vytyčeného jízdního pruhu – úsek může ústít například do křižovatky, na jejímž vjezdu se musí vozidlo správně zařadit. Zóny jsou charakterizovány časovou vzdáleností jejich konce ke konci úseku (lokálními parametry úseku „Distance Zone 2“ a „Distance Zone 1“) a mohou přesahovat i do oblasti předchozího úseku. Především úseky zaústěné do křižovatky s více řadicími pruhy na vjezdu je nutné správně parametrizovat – vymezit oblast urgentních zón 2 a 3, ve kterých se vozidla přerazují na řadicí pruh vhodný pro následné odbočení v křižovatce.
- 4) *On-Ramp model* ovlivňuje chování vozidel, která najíždějí do hlavního dopravního proudu z přípojného postranního pruhu. Parametr „Time Distance On Ramp“ určuje, do jaké vzdálenosti od místa sloučení pruhu s ostatními jízdními pruhy je postranní pruh považován za přípojný – v takto vymezeném prostoru se vozidla snaží připojit k hlavnímu proudu a vozidla z hlavního proudu nevyužívají jízdní pruh jako pruh pro pomalá vozidla.
- 5) *Off-Ramp model* ovlivňuje chování vozidel, která odbočují z hlavního dopravního proudu do odbočného jízdního pruhu. Pro přerazení vozidel je v tomto případě aplikován standardní lane-changing model.
- 6) *Look-ahead model*. V městské silniční síti, ve které se nachází krátké úseky, mohou mít vozidla málo času na přerazení do správného řadicího pruhu na vjezdu křižovatky, nebo na zařazení do odbočného jízdního pruhu. Správné nastavení zón lane-changing modelu, simulačního kroku apd. umožňuje vylepšit chování vozidel v simulačním modelu a minimalizovat počet vozidel, která se nestačí zařadit do správného jízdního pruhu a dále pokračují v jízdě po nesprávné trase (tzv. „ztracená vozidla“). Hlavním úkolem look-ahead modelu je, aby se vozidla mohla přerazovat do vhodného jízdního pruhu dříve než od začátku „kritického“ úseku, na jehož konci musí odbočit. Každé vozidlo uvažuje při změně jízdního pruhu vždy dvě následující odbočení (nejen nejbližší první odbočení) a v rámci množiny jízdních pruhů, které umožňují první odbočení, se snaží zařadit do takového jízdního pruhu, který umožní vozidlu nejspíše provést i druhé odbočení.

Podrobnější popis modelů chování vozidel, jejichž pochopení je klíčové pro správnou parametrizaci simulačních modelů v aplikaci AIMSUN NG, lze nalézt v manuálu [1].

6.2.3 Modelování dopravní poptávky

Dopravní poptávku lze v simulačním modelu nadefinovat pomocí dvou různých přístupů:

- Určením vstupních intenzit na hraničních úsecích silniční sítě a zadáním procentuálního rozpadu dopravních proudů v křižovatkách. Tento přístup je v aplikaci AIMSUN NG označován jako „Traffic State“.
- Nadefinováním centroidů (pomyslných koncových bodů dopravní poptávky), které lze napojit na hraniční úseky silniční sítě, a následným zadáním intenzit dopravních proudů mezi jednotlivými centroidy v podobě O/D matic (Origin/Destination).

Při použití druhého přístupu jsou dopravní proudy směřovány z výchozího centroidu (Origin) do cílového centroidu (Destination) pomocí algoritmu pro hledání nejkratší cesty (lze však použít i jiné algoritmy pro dynamické směřování – například směřování podle nejkratšího času průjezdu nebo podle definovaných nákladových funkcí). „Traffic State“ nebo O/D matice se definují zvlášť pro každý typ vozidel a každý časový interval, v němž jsou intenzity ustálené. Na obrázku 14 je zobrazen dialog pro definování O/D matice.

The screenshot shows the AIMSUN NG Professional Edition 5.1.9 interface. The main window displays a road network diagram with several nodes and links. A dialog box titled "O/D Matrix: 200, Name: matrix car: 00:00 01:00" is open in the foreground. The dialog box has tabs for "Main", "Path Assignment", "Parameters", and "Attributes". The "Main" tab is active, showing a table of traffic flow data. The table has columns for "External Id", "Vehicle Type", "Initial Time", "Duration", and a grid of flow values between various locations. The locations listed are 192: Pa, 193: Hradec, 194: Univ, 315: Kole, 318: DFJ, and Total. The flow values are as follows:

	192: Pa	193: Hradec	194: Univ	315: Kole	318: DFJ	Total
192: Pardubice-centrum	32	420	210	23	76	761
193: Hradec	420	2	50	54	34	560
194: Univerzita	80	50	34	65	54	283
315: Koleje	56	75	23	19	5	178
318: DFJP	87	34	65	4	12	202
Total	675	581	382	165	181	1984

The dialog box also includes fields for "External Id", "Vehicle Type" (set to "78: car"), "Initial Time" (00:00:00), and "Duration" (01:00:00). There are "Copy" and "Paste" buttons, and "OK" and "Cancel" buttons at the bottom.

Obr 14. Definice dopravní poptávky pomocí centroidů a O/D matic

Poté, co je výše uvedenými přístupy nadefinována dopravní poptávka, lze v okně „Sites“ vytvořit nový plán dopravní poptávky („Traffic Demand“), v něm určit, který z přístupů definice poptávky byl použit a nastavit simulační čas, v němž je dopravní poptávka aplikována. Do zadaného časového intervalu lze potom rozprostřít jednotlivé nadefinované O/D matice/„Traffic States“, tj. určit časový plán platnosti poptávky z jednotlivých O/D matic/„Traffic States“.

6.2.4 Provádění simulačních experimentů

V okně „Sites“ lze ve složce „Scenarios“ nadefinovat nový scénář, v rámci scénáře nový experiment a v rámci experimentu potřebný počet replikací a průměr z těchto replikací. V dialogích pro definici scénáře a experimentu se definuje celá řada globálních vstupních parametrů simulačního modelu.

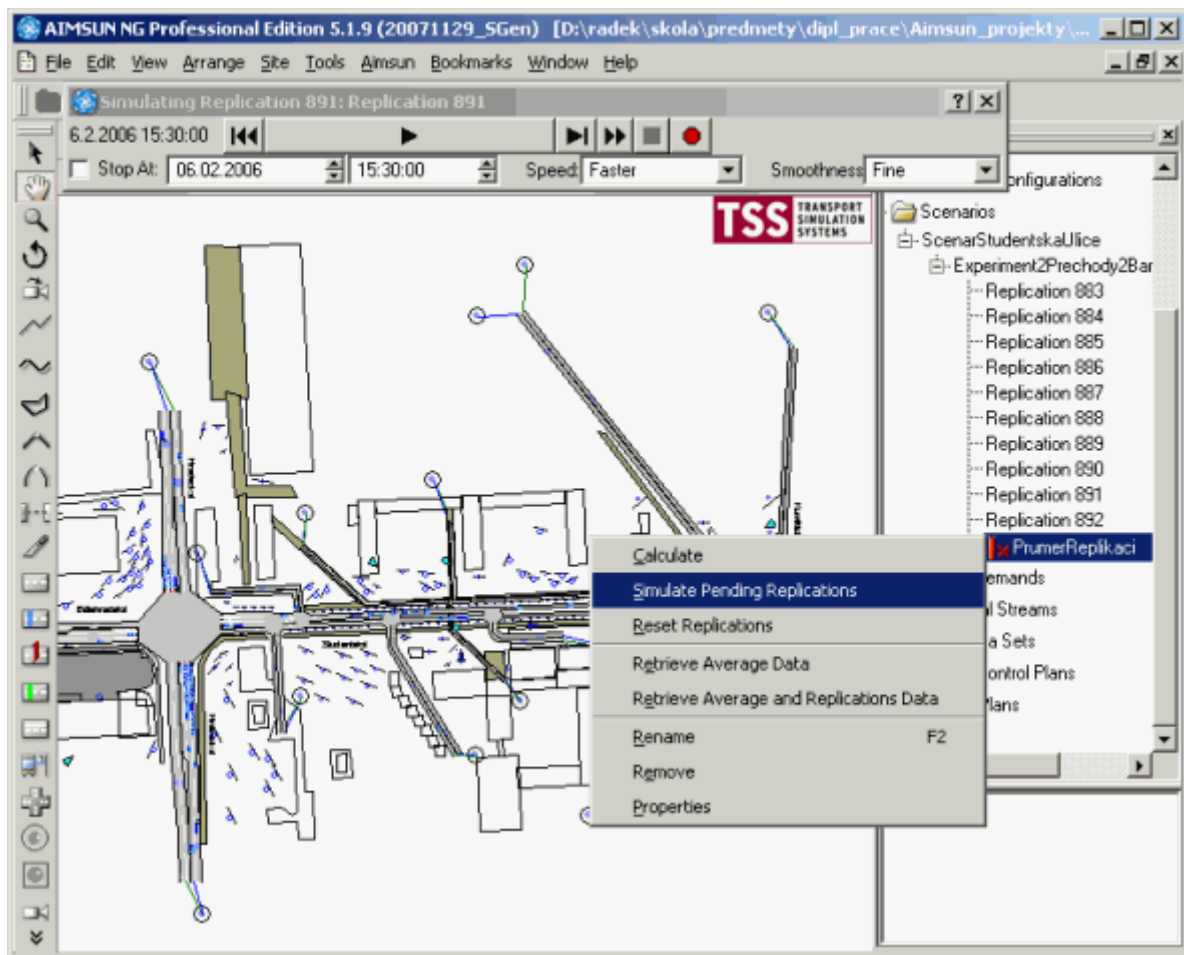
V dialogu s vlastnostmi scénáře lze určit simulační čas, v němž bude prováděn simulační výpočet, plán dopravní poptávky a plán veřejné hromadné dopravy, jenž bude použit v simulačním modelu, a také plán s časovým rozvržením signálních plánů, ve kterém lze určit, kdy budou aktivní signální plány jednotlivých světelně řízených křižovatek (tzv. „Master Control Plan“).

Ve vlastnostech scénáře lze dále vhodně parametrizovat sběr výstupních statistických údajů: Určit intervaly detekce, za které se bude zjišťovat počet vozidel, jenž projela přes jednotlivé detektory, stanovit statistické intervaly, za které bude simulátor reportovat průměrné hodnoty všech výstupních statistických ukazatelů, nastavit databázi, do které se budou výstupní údaje exportovat apd. (více viz. podkapitola 6.3).

V rámci parametrizace experimentu je třeba zadat dobu náběhu simulátoru, hodnotu simulačního kroku, reakční doby řidičů, rozdělení pravděpodobnosti pro intervaly mezi příjezdy vozidel (standardně exponenciální), parametry ovlivňující směrování vozidel a parametry pro další modely chování vozidel (Car-following model, Lane-changing model, Look-ahead model aj).

Vlastní simulační výpočet je možné spustit ve dvou režimech – v interaktivním grafickém režimu, při kterém lze sledovat průběh 2D nebo 3D animace simulačního výpočtu, a v dávkovém režimu, který umožňuje rychlé provedení simulačního výpočtu bez použití animace (simulaci lze spustit pomocí položek „Interactive Simulation“ a „Batch Simulation“ v kontextové nabídce jednotlivých replikací).

V kontextové nabídce průměru z více replikací, která je zobrazena na obrázku 15, lze pomocí volby „Simulate Pending Replications“ spustit dávkovou simulaci všech replikací, které jsou zahrnuty do průměru. Pomocí volby „Calculate“ lze vypočítat průměrné hodnoty výstupních ukazatelů ze všech odsimulovaných replikací uvedených v průměru a pomocí volby „Reset Replications“ lze označit všechny replikace v průměru jako „neodsimulované“ (odstranit výstupní údaje sesbírané z replikací při naposledy spuštěné simulaci z paměti programu). V dialogu s vlastnostmi průměru (položka „Properties“) lze po vypočítání průměru sledovat průměrné hodnoty různých výstupních ukazatelů. Pomocí volby „Retrieve Average and Replications Data“ lze do paměti programu načíst všechna výstupní data, která byla dříve uložena do externí databáze.



Obr 15. Dávkové provedení všech replikací zahrnutých do průměru

6.3 Možnosti výstupní analýzy simulačních experimentů

Simulační prostředí AIMSUN NG nabízí dostatečné množství nástrojů pro zpracování výstupů simulačních experimentů, široké možnosti grafické prezentace výstupů a především pestrou škálu dopravně-inženýrských ukazatelů, jejichž průměrné hodnoty lze sledovat v předem určených statistických intervalech a rovněž za celou dobu simulačního výpočtu.

6.3.1 Výstupní statistické ukazatele v simulačním prostředí AIMSUN NG

Aplikace AIMSUN NG umožňuje vyhodnocovat různé typy dopravně-inženýrských ukazatelů, které jsou shrnuty v tabulce 13. Ve druhém sloupci tabulky je uveden anglický název ukazatele, který je používán v aplikaci. Různé typy ukazatelů lze sledovat na různých rozlišovacích úrovních: Pro celý simulovaný systém, pro jednotlivé úseky silniční sítě a odbočení na křižovatkách, pro statistické proudy (nedefinované sekvence úseků), pro centroidy nebo jejich dvojice (zdroj → cíl) a pro linky veřejné hromadné dopravy. V případě úseků a odbočení jsou údaje pro jednotlivá vozidla sbírány v okamžiku, kdy vozidlo opouští úsek nebo dokončilo odbočování.⁷

⁷ Ukazatele jsou popisovány na příkladu vozidel, s výjimkou ekologických ukazatelů je však lze aplikovat i na chodce.

Tab 13. Přehled dopravně-inženýrských ukazatelů v aplikaci AIMSUN NG

Ukazatel	Angl.	Jednotka	Popis	Prvky modelu, pro něž lze ukazatele sledovat					
				Celá síť	Úseky	Odbočení	Sekvence úseků	Centroidy nebo jejich páry	Veřejná doprava
Průměrná intenzita provozu	Mean Flow	entit/h	Průměrný počet vozidel za hodinu, která projdou během simulace uvažovanou částí silniční sítě. Vozidla jsou započítávána, když opouští silniční síť výstupním úsekem.	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Průměrná hustota provozu	Density	entit/km	Průměrný počet vozidel na jeden kilometr uvažované části silniční sítě.	✓	✓	✗	✗	✗	✗
Průměrná rychlost	Mean Speed	km/h	Průměrná rychlost vozidel pohybujících se po uvažované části silniční sítě.	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Průměrná harmonická rychlost	Harmonic Mean Speed	km/h	Průměrná harmonická rychlost vozidel pohybujících se po uvažované části silniční sítě.	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Cestovní čas	Travel Time	s/km	Průměrný čas, který vozidlo stráví ujetím jednoho kilometru uvnitř uvažované části silniční sítě. Je počítán z cestovních časů jednotlivých vozidel převedených na jeden kilometr.	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Průměrná doba zdržení (zpoždění)	Delay Time	s/km	Průměrná doba zpoždění vozidla na jeden kilometr. Jedná se o rozdíl mezi skutečným cestovním časem a časem, který je potřeba pro projetí uvažované části silniční sítě za ideálních podmínek. Tato hodnota je přepočítána na jeden kilometr.	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Průměrný čas stání	Stop Time	s/km	Průměrná doba nehybnosti vozidla na jeden kilometr.	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Průměrný počet zastavení	Number of Stops	počet/km	Průměrný počet zastavení vozidla na jednom kilometru.	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Celková cestovní vzdálenost	Total Travel	km	Součet vzdáleností najetých všemi vozidly, která projela uvažovanou částí silniční sítě.	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Celkový cestovní čas	Total Travel Time	h	Součet cestovních časů všech vozidel, která projela uvažovanou částí silniční sítě.	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Celková spotřeba paliva	Fuel Consumed	litr	Celkový počet (součet) litrů paliva spotřebovaného všemi vozidly, která projela uvažovanou částí silniční sítě.	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Celková produkce zplodin	Pollution Emitted	kg	Celkový počet (součet) kilogramů škodliviny vyprodukované všemi vozidly. Může být sledován zvlášť pro více druhů zplodin.	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Průměrná délka fronty	Mean Queue Length	entit/jízdni pruh	Průměrný počet entit ve frontě na úseku rozpočítaný na jeden jízdni pruh úseku.	✗	✓	✓	✗	✗	✗
Maximální délka fronty	Maximum Queue Length	entit/jízdni pruh	Maximální počet entit ve frontě na úseku rozpočítaný na jeden jízdni pruh.	✗	✓	✓	✗	✗	✗

zdroj: [1]

Při interpretaci průměrné a maximální délky fronty na úseku silniční sítě je třeba mít na paměti, že delší úseky v simulačním modelu mohou dosahovat vyššího počtu vozidel stojících ve frontě než kratší úseky pouze díky tomu, že se na ně vejde více stojících vozidel. Skutečná fronta vozidel v bezprostředním okolí úseku může být delší než počet vozidel stojících pouze v rámci daného úseku. Tyto ukazatele jsou tedy ovlivněny způsobem modelování úseků, což ztěžuje jejich praktické využití.

U centroidů O/D matic je navíc možné pozorovat *počet ztracených vozidel* (Lost Vehicles), což je celkový počet vozidel, která se ztratila na cestě mezi zdrojovým a cílovým centroidem a nedosáhla vytyčeného cíle. Toto může být způsobeno zejména tím, že se vozidla nestačí kvůli dopravním proudům s vysokou intenzitou na ostatních jízdních pružích přeradit na malém prostoru do správného jízdního pruhu, který umožňuje dosažení cílového centroidu, a pokračují v cestě nesprávným směrem.

Poměrně obtížně srozumitelným ukazatelem je průměrná doba zpoždění (Delay Time). Podle [1] je zpoždění DT_{s_i} i -tého vozidla na úseku s počítáno dle vzorce

$$DT_{s_i} = TT_{s_i} - \frac{L_s}{\min(SMax_i, S_s \cdot \Theta_i)} \text{ [s]}, \quad (20)$$

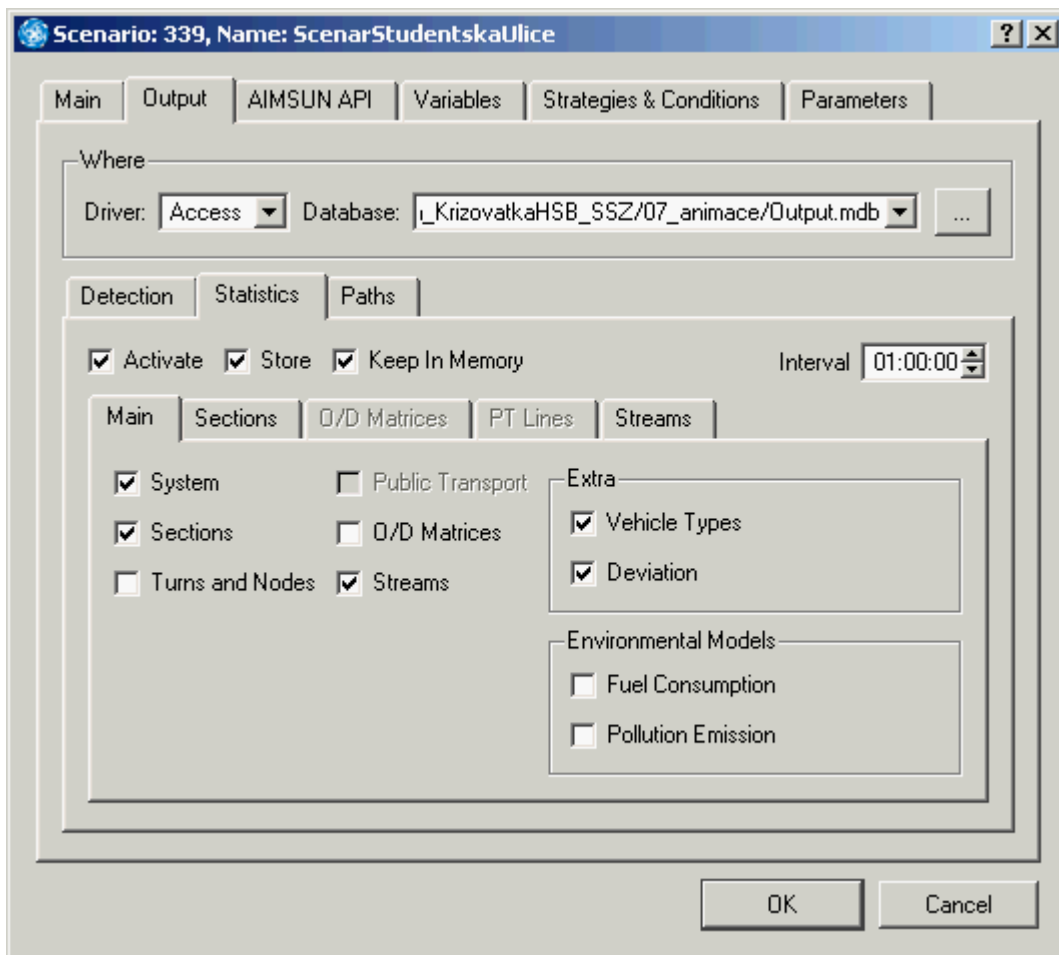
kde TT_{s_i} je skutečná doba průjezdu úseku i -tým vozidlem v sekundách, L_s je délka úseku v metrech, Θ_i je stupeň dodržování rychlostních limitů, který je parametrem vozidla, S_s je rychlostní limit úseku v m/s a $SMax_i$ je maximální možná rychlost vozidla v m/s s uvážením vlivu jeho parametru Θ_i . Zcela obdobně je počítáno zpoždění i -tého vozidla na odbočení v křižovatce. Celková doba zpoždění i -tého vozidla při průjezdu silniční sítě je součtem hodnot DT_{s_i} naakumulovaných při průjezdu jednotlivými úseky a odbočeními v systému. Celkové doby zpoždění jednotlivých vozidel jsou přepočítány na jeden kilometr, zprůměrovány a tento průměr je prezentován jako výsledná průměrná doba zpoždění vozidla v systému na jednom kilometru.

S ohledem na výpočet doby zpoždění vozidla na úseku zaústěném do světelně řízené křižovatky je zajímavá otázka, zda se do skutečné doby průjezdu úseku TT_{s_i} zahrnuje také doba čekání na zelenou v navazující křižovatce. Toto jsem ověřil provedením jednoduchých experimentů, ve kterých jediné vozidlo projíždělo světelně řízenou křižovatkou – poprvé s čekáním na zelenou a podruhé s vypnutou světelnou signalizací (bez čekání).

Na základě provedení pomocných experimentů lze konstatovat, že dobu zpoždění při průjezdu úsekem, a tedy i celým systémem, nenavyšují pouze interakce s okolními vozidly a chodci, ale také doba čekání na signál „Volno!“ v rámci následující světelně řízené křižovatky a související zpoždění při akceleraci a deceleraci vozidla.

6.3.2 Nastavení výstupů simulačního experimentu

Typy objektů modelu, pro které se budou statistické údaje během simulace vyhodnocovat, se určují v záložce „Output“ v dialogu s vlastnostmi scénáře (viz. obrázek 16 a kapitola „Output Folder“ v manuálu [1]). Jedná se o tyto typy objektů: „System“ (souhrnně celá silniční síť), „Sections“ (úseky), „Turns and Nodes“ (odbočení a křižovatky), „Public Transport“ (linky veřejné hromadné dopravy), „O/D Matrices“ (centroidy O/D matic a jejich uspořádané dvojice zdroj → cíl) a „Streams“ (uživatelsky definované sekvence úseků).



Obr 16. Dialog pro nastavení výstupů simulátoru

Lze povolit také sledování údajů zvlášť pro jednotlivé typy mobilních entit („Vehicle Types“) a výpočet směrodatných odchylek („Deviation“) pro všechny ukazatele. Je třeba zdůraznit, že se jedná o směrodatné odchylky, pološířky intervalů spolehlivosti pro odhady středních hodnot nejsou simulátorem počítány. Na podzáložce „Statistics“ a jejích dalších podzáložkách lze poté podrobněji definovat, pro jaké úseky, dvojice centroidů, linky veřejné hromadné dopravy a pojmenované sekvence úseků se budou statistické údaje vyhodnocovat.

Na záložce „Output“ se rovněž určují statistické intervaly simulačního času, pro které se mají zaznamenávat průměrné hodnoty výstupních ukazatelů, a intervaly detekce, v kterých jsou vyhodnocovány údaje z detektorů. Sledované dopravně-inženýrské ukazatele jsou do výstupního simulačního protokolu zapisovány nejen pro jednotlivé statistické intervaly, ale také souhrnně pro celkovou dobu simulace. Pomocí detektorů lze měřit počet vozidel, která projela detektorem za stanovený interval detekce, průměrnou rychlost těchto vozidel, hustotu provozu a další údaje. Statistická data i data naměřená na detektorech je možné uchovávat v operační paměti počítače, případně je ukládat do databáze aplikace MS Access, nebo jiné databáze prostřednictvím rozhraní ODBC.

Struktura databázových tabulek, které jsou vytvářeny při ukládání údajů do databáze, je dostatečně přehledně a podrobně popsána v příloze 1 (Output Database Definition) manuálu [1].

6.3.3 Získání a zpracování výstupních údajů

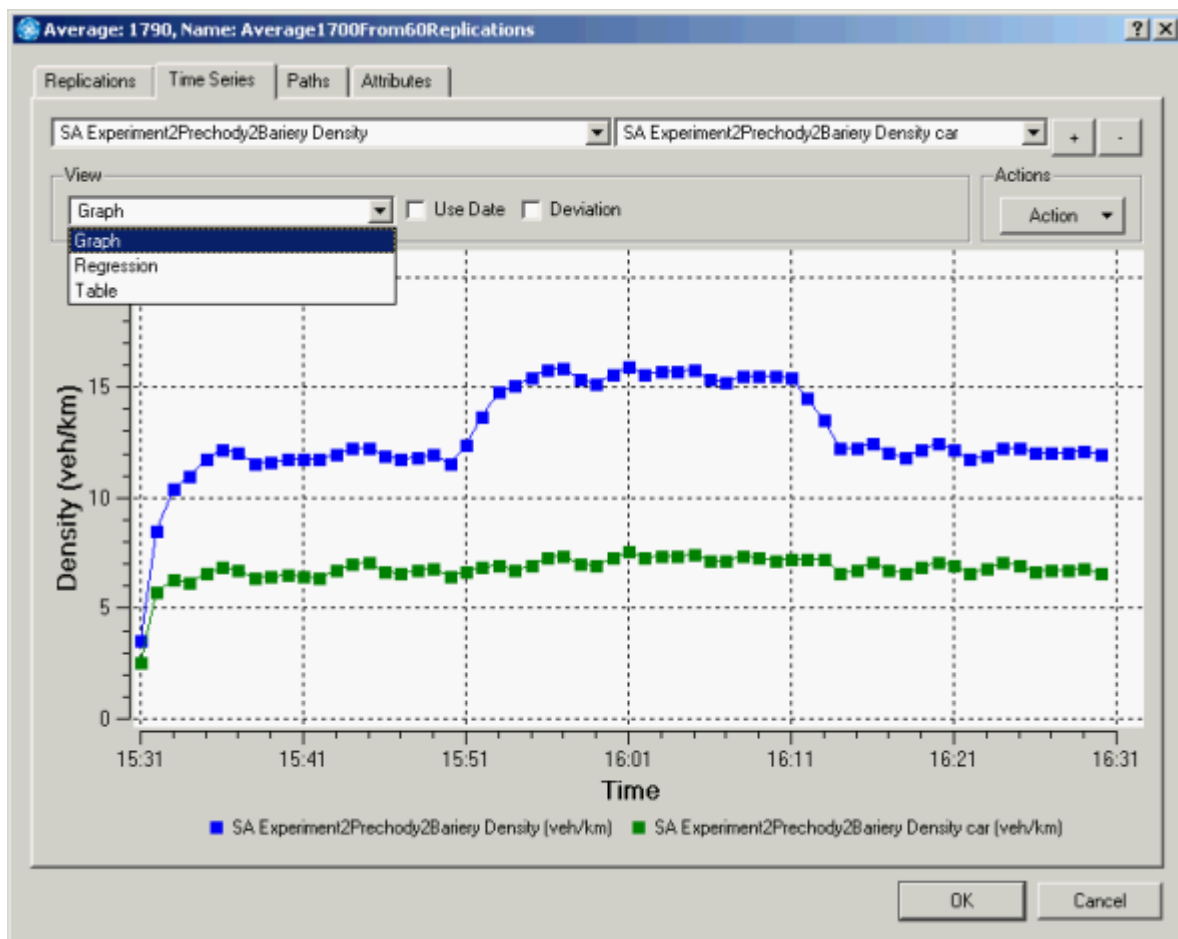
O zpracování výstupních údajů simulace v produktu AIMSUN NG podrobně pojednává kapitola 9 (Simulation Outputs) manuálu [1]. V této podkapitole bude uveden pouze rámcový přehled nástrojů, které AIMSUN NG poskytuje pro účely výstupní analýzy.

Časové řady (Time Series)

Časové řady umožňují sledovat časový vývoj nejrůznějších ukazatelů pro jednotlivé prvky modelu – jedná se o průměrné hodnoty ukazatelů za jednotlivé statistické intervaly, resp. intervaly detekce. Po úspěšném ukončení simulačního výpočtu a vypočítání průměrných údajů lze časové řady nalézt na záložkách „Time Series“, které se nově objeví ve vlastnostech úseků, křížovatek, detektorů, replikací, průměrů z replikací nebo sekvencí úseků (musí být povoleny volby „Activate“ a „Keep in Memory“ na záložce „Output“ ve vlastnostech scénáře). Příslušný dialog volíme podle toho, k jakému objektu chceme výsledné informace získat. Souhrnné časové řady pro celou silniční síť lze nalézt ve vlastnostech průměru z replikací.

Simulátor AIMSUN rozlišuje následující typy časových řad: SRC (Simulation Replication Current) – časové řady naposledy simulované replikace, SR (Simulation Replication) – časové řady pro jednotlivé replikace, SA (Simulation Average) – průměrné časové řady vypočítané jako průměr časových řad jednotlivých replikací.

U různých objektů lze sledovat časové řady pro různé dopravně-inženýrské ukazatele (viz. tabulka 13), a to pro všechna vozidla nebo také zvlášť pro jednotlivé typy vozidel, pokud je aktivována volba „Vehicle Types“ v záložce „Output“ ve vlastnostech scénáře. Časové řady lze prohlížet v podobě konfigurovatelného grafu nebo v podobě tabulky – obě možnosti dovolují zobrazit rovněž směrodatné odchylky u průměrných hodnot z jednotlivých statistických intervalů. Pro účely snadného porovnání údajů lze zobrazit i více časových řad najednou v jednom dialogovém okně (viz. obrázek 17).



Obr 17. Časové řady zobrazující vývoj průměrných hodnot ukazatelů za statistické intervaly

Výstupy ukládané do externí databáze

Ačkoliv je časový vývoj výstupních ukazatelů zobrazovaný pomocí časových řad poměrně názorný, daleko vhodnějším způsobem pro podrobnější zpracování číselných statistických ukazatelů je uložení výstupů simulátoru do externí databáze a následné zpracování údajů pomocí dotazovacího jazyka SQL, který umožňuje vytvořit výstupní sestavy údajů přesně podle potřeby simulační studie. Zpracování údajů z databáze je také možné automatizovat vlastními programovými prostředky. Databáze je jediným kompletním zdrojem všech výstupních údajů. Nastavení ukládání výstupních ukazatelů do databáze již bylo popsáno v podkapitole 6.3.2.

Sběr dat pomocí detektorů

Pomocí detektorů lze zjistit počet vozidel nebo střední rychlost vozidel, která přejela detektor během stanovených intervalů detekce, určit, zda se během intervalu detekce objevilo na detektoru alespoň jedno vozidlo, vyhodnotit procentuální obsazení detektoru v cyklech detekce, nebo nasnímat časové intervaly mezi průjezdy jednotlivých vozidel přes detektor. Pokud je u jednotlivých detektorů povolen sběr příslušných výstupních údajů, budou údaje po ukončení simulace dostupné v časových řadách pro detektor nebo v tabulce „DetecMea“ vytvořené v externí databázi.

Informace o aktuálním počtu vozidel v simulačním modelu

Během spuštěné simulace lze sledovat pomocí dialogu Aimsun → Number of Vehicles počet vozidel čekajících při velkých frontách na vstup do systému, aktuální počet jednotlivých typů vozidel v silniční síti, počet vozidel, která vystoupila ze silniční sítě a počet tzv. „ztracených“ vozidel.

Informace o vozidlech poskytované během simulačního výpočtu

Po dvojkliku na vozidlo ve 2D animačním pohledu v průběhu simulačního výpočtu lze sledovat statické atributy vozidla (identifikátor, typ, zda je vozidlo směřováno simulátorem, zda je „označené“ uživatelem, zdrojový a cílový centroid vozidla atd.), dynamické atributy vozidla (rychlost, pozice, najetá vzdálenost) a plánovanou cestu vozidla, kterou lze graficky zobrazit na silniční síti, přičemž pro jednotlivé úseky cesty jsou v dialogu uvedeny cestovní časy, vzdálenosti a náklady vypočítané na základě nákladových funkcí. Zaškrtnutím volby „Follow“ je pohled automaticky posouván s pohybem vozidla tak, aby vozidlo zůstávalo uprostřed obrazovky. Po zaškrtnutí volby „Collect Time Series Data“ lze v grafu nebo tabulce sledovat dynamický vývoj rychlosti nebo zrychlení vozidla, případně vzdálenosti, kterou vozidlo najelo.

Porovnání průměrných hodnot simulačních experimentů

Pomocí dialogu Site → Output Comparison... lze porovnat průměrné údaje dvou různých experimentů definovaných v rámci jednoho scénáře. Porovnání lze provést dvěma způsoby:

- 1) Prvním nabízeným způsobem je statistické testování hypotéz. V testu se ověřuje, zda při zadané hladině významnosti platí nulová hypotéza „Střední hodnoty ukazatelů s předpokládaným normálním rozdělením pravděpodobnosti se rovnají“ oproti alternativní hypotéze „Rovnost nenastává“. Výsledkem testování je zjištění, zda se střední hodnoty statisticky významně liší, aplikace poté prezentuje výsledek testování pomocí barevného grafického zobrazení úseků silniční sítě, ke kterému je připojena legenda. Barvy úseků udávají, zda je střední hodnota sledovaného statistického ukazatele na daném úseku v prvním experimentu „lepší“, „horší“ nebo „stejná“ v porovnání s druhým experimentem. Porovnávat lze průměrnou rychlost a cestovní čas na jednotlivých úsecích.
- 2) Druhý způsob představuje multikriteriální porovnání experimentů, v němž jsou za jednotlivá kritéria považovány střední hodnoty klíčových ukazatelů (rychlosti, intenzity, hustoty, cestovního času, doby zpoždění a počtu zastavení na jeden kilometr). Jednotlivá kritéria jsou převedena do jediné globální účelové funkce, kterou je vhodné maximalizovat. Účelová funkce představuje součet vážených středních hodnot jednotlivých ukazatelů, které jsou do součtu zařazovány se znaménkem plus nebo minus tak, aby vyšší hodnota sčítance vždy byla považována za výhodnější. V terminologii aplikace AIMSUN NG se jedná o agregovaný vážený index. Experiment s vyšší hodnotou tohoto indexu (globální účelové funkce) je z celkového hlediska považován za úspěšnější. Porovnání je prezentováno v přehledné rozhodovací tabulce („Decision Table“).

2D a 3D animace běhu simulačního výpočtu

2D a 3D pohledy na model zobrazené při běhu simulace mohou experimentátorovi pomoci při odhalování problémových míst silniční sítě a sledování charakteru provozu. Lze však sledovat pouze průběh konkrétní replikace simulačního experimentu, nikoliv chování vozidel v průměrném případě. Animační výstupy mohou posloužit i při názorné prezentaci výsledků simulační studie.

Tvorba 3D animační scény je poměrně intuitivní. Základní vlastnosti scény lze nastavit v dialogu Edit → Preferences... → 3D. Pro zobrazení různých částí scény se používají kamery, mezi jejichž pohledy se lze přepínat. Umístění kamery se definuje ve 2D pohledu, přičemž polohu a natočení kamery lze dále upřesnit přímo ve 3D pohledu. Ve 2D pohledu lze pomocí nástroje „Polygon“ zakreslit půdorysy budov a tyto půdorysy následně převést na trojrozměrné útvary, u kterých lze specifikovat nadmořskou výšku dolní podstavy a výšku útvaru jako takového. Ve 2D pohledu jsou při výběru bodů polygonu zobrazovány trojrozměrné souřadnice (x, y, z). Označením bodu, stisknutím klávesy Ctrl a tažením myši lze souřadnici z (výšku) u jednotlivých bodů individuálně upravovat.

Stěny vymodelovaného útvaru lze pokrýt fotorealistickými texturami (textury lze přímo ve 3D pohledu přetahovat myši z okna „3D Info“ na stěny útvaru, lze nastavit vertikální a horizontální opakování textury). Textury je možné aplikovat i na dvourozměrné útvary – plochy parkovišť, chodníků apd. Pomocí nástroje „3D Image“ lze dotvořit dekorace v podobě stromů nebo vjezdů do budov. Rovněž tvary a textury jednotlivých dopravních prostředků lze upravovat. Podrobné informace ke tvorbě 3D scény jsou uvedeny v manuálu [2].

Zobrazovací módy a styly (view modes & view styles)

Zobrazovací módy a styly umožňují definovat způsoby grafického zobrazení silniční sítě, vozidel a hodnot výstupních statistických ukazatelů na úsecích a uzlech silniční sítě. Zobrazovací módy sdružují jeden nebo více stylů, které umožňují zbarvit vozidla podle typu, podle následujícího odbočení, podle zdrojového nebo cílového centroidu, zvýraznit speciálně označená („equipped“) vozidla, zbarvit křižovatky podle úrovně poskytovaných služeb, zbarvit úseky podle naměřené hustoty provozu apd. Příklady těchto zobrazení lze nalézt v příloze A.

6.3.4 Nahrávání záznamů z běhu simulačních výpočtů

Aplikace AIMSUN NG umožňuje pořizovat videozáznamy z běhu simulačních výpočtů, nahrávat lze 2D i 3D animaci. V dialogu Edit → Preferences... („Model Preferences Editor“) lze na záložce „AIMSUN Simulator“ určit název souboru s příponou avi, do kterého se bude zaznamenávat video, a určit rychlost nahrávání (vhodná je například rychlost Double Speed). Při nahrávání 3D animační scény doporučuji na záložce „3D“ dočasně odškrtnout volbu „Draw Yellow Boxes as Yellow“, aby bylo zajištěno realističtější vykreslování křižovatek s příznakem „Yellow Box“ – prostor příslušných křižovatek nebude vykreslován se žlutým šrafováním. Rovněž je vhodné vypnout zobrazování samotných kamer.

Před vlastním nahráváním je třeba zajistit, aby okno s 2D nebo 3D pohledem bylo dostatečně velké (skrýt nepotřebná okna klávesou Tab a dočasně zavřít panely nástrojů), okno však nesmí být maximalizované, aby mohla aplikace jeho rozměry automaticky upravit na násobky osmi.

V dialogovém okně pro interaktivní přehrávání simulace je nutné nastavit vhodnou rychlost přehrávání (např. Real Speed x 3) a dostatečnou plynulost animace pohybu mobilních entit, poté už lze spustit interaktivní simulaci a následně také nahrávání videa. Otevře se dialog pro výběr kompresního formátu (s možností dodatečné konfigurace vybraného kodeku). Dialog nabízí videokodeky, které jsou nainstalované v operačním systému. Pokud není vhodný kodek k dispozici, je potřeba jej nejdříve nainstalovat. Při nahrávání videa se mi podařilo dosáhnout dobré komprese a velmi dobré kvality videa pomocí kodeku DivX® v.6.7 při následující konfiguraci kodeku a okna s 3D pohledem:

- Rozměry okna 984 x 656 pixelů,
- Certification Profile: 1080HD, bez použití Encoding presets,
- Rate control mode: 1-pass quality-based, target quantizer: 1,
- Encoding Mode: Insane Quality, Max Keyframe interval: 300 frames,
- Bidirectional coding: Adaptive Multiple Consecutive,
- Format in/out: Square Pixels, No resize or format conversion,
- Noise Reduction: Off, Preserve Interlace, Quantization: H.263.

Během nahrávání videa narůstá v příslušném adresáři velikost výsledného souboru. Soubor s videem se při příštím nahrávání přepisuje. Poměrně dobrých výsledků lze dosáhnout i s kodekem XviD MPEG-4.

7 Kapacitní porovnání analytického výpočtu signálního plánu s výsledky simulačních experimentů

V této kapitole je provedeno porovnání kapacit vjezdů světelně řízené křižovatky Hradecká – Studentská – Bělehradská (HSB), které byly vypočítány analytickou metodou saturovaného toku (dále jen MST), s kapacitami, které byly experimentálně zjištěny v simulačním modelu této křižovatky. Cílem tohoto porovnání je určit, zda je simulační model implementovaný v simulačním prostředí AIMSUN NG schopen při modelování konkrétní izolované průsečné světelně řízené křižovatky a vhodné parametrizaci simulačního modelu produkovat výsledky srovnatelné s analytickou metodou.

Srovnání výstupů simulačního modelu křižovatky s výsledky jiného (matematického) modelu lze považovat alespoň za částečnou validaci simulačního modelu Studentské ulice, který obsahuje zmíněnou křižovatku a je součástí simulační studie provedené v této diplomové práci. Samotná případová simulační studie je popsána v kapitole 8.

Analytický kapacitní výpočet, který je součástí MST, byl již proveden v kapitole 5. Tento výpočet nedává přímou odpověď na to, jaká je celková kapacita křižovatky při aplikaci vypočítaného signálního plánu, ale umožňuje pro tento signální plán při určených vstupních intenzitách dopravních proudů vyjádřit rezervy, resp. deficity kapacit na jednotlivých vjezdech. Dopravní řešení světelného signalizačního zařízení s navrženým signálním plánem je vyhovující (v praxi realizovatelné), jestliže na všech vjezdech je kapacita vyšší než intenzita dopravy, tj. rezerva kapacity na všech vjezdech je větší než 0.

Pokud jsou na křižovatce uvažovány intenzity prognózované pro odpolední špičkovou hodinu v roce 2020 (viz. podkapitola 5.2), vykazuje signální plán vypočítaný MST pro tyto výchozí intenzity minimální rezervu kapacity na vjezdech 25 %. Intenzity na vjezdech lze ve stejném poměru (vynásobením stejným koeficientem) navyšovat tak, abychom při výpočtu dosáhli nulové minimální kapacitní rezervy na některém z vjezdů – takto navýšené intenzity provozu považujeme za maximální intenzity, které je křižovatka schopna propustit při zachovaném poměru zátěže na jednotlivých vjezdech.

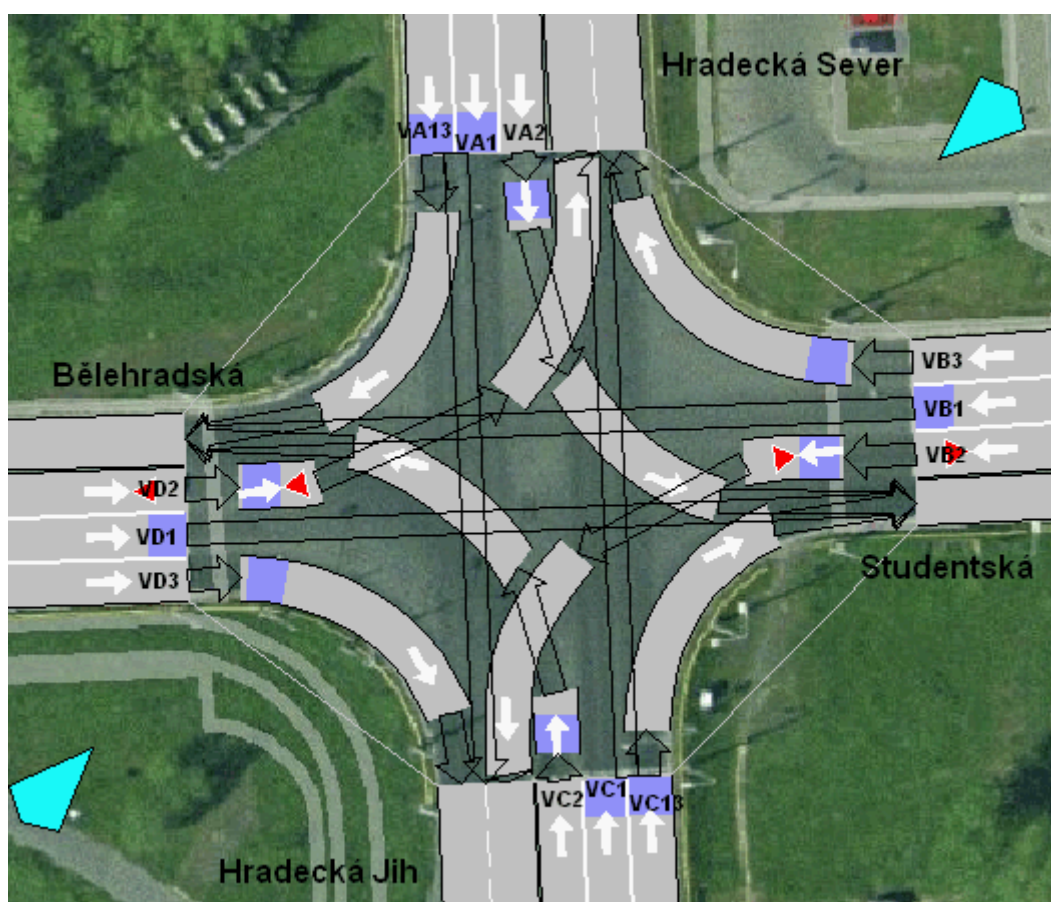
Experimentální určení kapacit vjezdů izolované světelně řízené průsečné křižovatky provedeme sledováním počtu vozidel, která v simulačním experimentu projela stopčárou na jednotlivých vjezdech. Aby bylo zřejmé, jak se mění kapacitní propustnost křižovatky v simulačním modelu, provedeme více experimentů, které se budou odlišovat hodnotami vstupních intenzit dopravních proudů. Intenzity budeme dimenzovat např. na 90 %, 100 %, 110 %, 120 %, 130 % a 140 % výše popisovaných maximálních intenzit. Rovněž provedeme experiment pro výchozí prognózované intenzity (75 % maximálních intenzit).

Kapacita vjezdu je v MST vypočítána jako část (celkového) saturovaného toku vjezdu, přičemž podíl kapacity vjezdu a saturovaného toku vjezdu je stejný jako podíl efektivní zelené pro tento vjezd a doby cyklu. Saturovaný tok vjezdu je maximální počet vozidel, která mohou projet profilem stopčáry vjezdu za jednotku času při ideálních dopravních podmínkách. Saturovaný tok, a tedy i kapacita vjezdu, jsou uváděny v jv/h.

Při vzájemných interakcích vozidel, zejména při zařazování vozidel do příslušných řadících pruhů a nekoordinovaných rozjezdů vozidel, nemusí v simulačním modelu vždy docházet k takovému plynulému pohybu vozidel přes stopčáru řadícího pruhu, který by bylo možné charakterizovat jako saturovaný tok, proto je provedené porovnání pouze přibližné a

simulační experiment může případně vykazovat menší hodnoty experimentálně zjištěných kapacit než vlastní analytický výpočet.

Izolovaná světelně řízená křižovatka byla namodelována v produktu AIMSUN NG dle postupů a doporučení popsanych v podkapitole 6.2.1. Poptávka byla zadána pomocí centroidů a O/D matic, které definují intenzity dopravních proudů mezi jednotlivými centroidy. V modelu byly použity O/D matice, které byly zpracovány již v diplomové práci Ing. Davida Svozila [24], přičemž prognózované intenzity byly na skutečné vstupní intenzity jednotlivých experimentů převedeny přenásobením potřebným koeficientem tak, aby bylo dosaženo stanoveného procenta uvažovaných maximálních intenzit. Násobení prvků O/D matic lze provést přímo v aplikaci AIMSUN NG. Počet vozidel, která vjela na jednotlivých vjezdech do křižovatky, byl zjišťován pomocí detektorů s povolenou detekcí počtu vozidel. Označení jednotlivých vjezdů a rozmístění detektorů je uvedeno na obrázku 18. Detektory jsou v simulačním modelu zobrazovány jako modré obdélníky.



Obr 18. Označení vjezdů a rozmístění detektorů na křižovatce HSB

Aby bylo v simulačním modelu dosaženo podmínek vhodných pro porovnání kapacitní propustnosti s teoretickým výpočtem, je třeba vhodným nastavením parametrů lane-changing modelu, look-ahead modelu a také simulačního kroku a geometrie vjezdů zajistit, aby se vozidla stihla zařadit do správného řadičívho pruhu a pokračovala dále určeným směrem. Pokud by se tomu tak nestalo, vozidlo použije jiný řadičív pruh a nemusí být dále schopno dosáhnout svého cíle (v terminologii aplikace AIMSUN NG se jedná o „ztracené“ vozidlo). Bohužel správné zařazení vozidel není možné vždy 100% zajistit, zvláště pokud jsou intenzity provozu natolik veliké, že brání vozidlu včasnému přeřazení do vhodného jízdniho pruhu.

Nicméně vhodným nastavením zmíněných parametrů lze pravděpodobnost správného zařazení značně navýšit (při prognózovaných intenzitách použitých v simulační studii téměř na 100 %, při větších intenzitách se tato pravděpodobnost dále zhoršuje).

Před provedením vlastních experimentů je třeba uvážit, jakou hodnotu simulačního kroku je vhodné použít. Jak bylo popsáno v tabulce 11, nižší hodnoty simulačního kroku mohou, pokud jsou svázány s reakčními dobami řidičů (tj. i při výchozím nastavení simulačního modelu), způsobovat rychlejší reakce řidičů, ti jsou potom schopni udržovat v dopravním proudu menší mezery mezi vozidly, snáze se zařazovat do jiného dopravního proudu atp., čímž se zvyšuje kapacitní propustnost modelu.

Nejdříve tedy provedeme experimenty pro různé hodnoty simulačního kroku (0,1; 0,25; 0,4; 0,5; 0,6; 0,75 a 1), přičemž budeme uvažovat, že nevhodnější je taková hodnota simulačního kroku, při níž bude křižovatka při plném vytížení (maximálních intenzitách, při kterých je nulová rezerva kapacity na nejvíce zatíženém vjezdu) schopna propustit téměř všechna vozidla.

Výsledky těchto pomocných experimentů pro stanovení hodnoty simulačního kroku dokumentuje tabulka 14. Uvedené hodnoty byly získány jako průměr z 30 realizovaných replikací. Pro přepočítání nákladních vozidel na jednotková vozidla byl použit koeficient 2, stejně jako v MST. Poptávka ve 3. sloupci tabulky představuje vstupní intenzity na vjezdech křižovatky použité v simulačních experimentech a v MST. U tabulkového výpočtu MST byl fixován již vypočítaný signální plán (tj. všechny doby zelených a doba cyklu), sestavený pro původní prognózované intenzity vozidel, změněny byly pouze vstupní intenzity dopravních proudů z původních intenzit prognózovaných pro rok 2020 na zmiňované „maximální“ intenzity. Nulová rezerva kapacity na nejvíce zatíženém vjezdu se na křižovatce objeví při 1,34násobném navýšení původních prognózovaných intenzit. Pro takto navýšené intenzity byla znovu vyhodnocena rezerva kapacity, kterou poskytuje světelné řízení s daným signálním plánem.

Čísla v posledních dvou sloupcích udávají průměrný a maximální počet jednotkových vozidel, která čekají ve frontách na jednotlivých ramenech křižovatky. Tyto hodnoty byly doplněny na základě ukazatelů průměrných a maximálních délek front na jeden jízdní pruh úseku, které umožňuje sledovat aplikace AIMSUN NG. Získané hodnoty pro jeden jízdní pruh úseku byly přepočítány zpět na celý úsek (násobeny maximálním počtem jízdních pruhů úseku) a převedeny na jednotková vozidla. V simulačním modelu je rameno křižovatky modelováno vždy jedním úsekem, který je na konci rozšířen na několik řadících pruhů. Počet vozidel na úseku je v aplikaci AIMSUN NG rozpočítáván *rovnoměrně* na jeden jízdní (řadící) pruh úseku, tedy stejně neodráží skutečné počty vozidel na konkrétních řadících pruzích, proto byl zvolen souhrnný ukazatel pro celý úsek, tj. celé rameno křižovatky.

Tab 14. Kapacitní propustnost max. vytížené křižovatky při různých hodnotách simulačního kroku

Simulační krok 0,1									
Rameno	Vjezd	Poptávka [jv/h]	Projelo v exper. [jv/h]	Kapacita v MST [jv/h]	Rezerva kapacity v MST [%]	Rozdíl Projelo – Poptávka		jv ve frontě na rameni (v exper.)	
						Abs. [jv/h]	Rel. [%]	Ø	max.
Hradecká Sever	VA13	346	403	515	32,82	57	16,47	6,04	59,87
	VA1	347	299	523	33,65	-48	-13,83		
	VA2	154	153	310	50,32	-1	-0,65		
	Celkem	847	855			8	0,94		
Studentská	VB3	237	234	497	52,31	-3	-1,27	17,90	111,47
	VB1	532	532	543	2,03	0	0,00		
	VB2	193	191	506	61,86	-2	-1,04		
	Celkem	962	957			-5	-0,52		
Hradecká Jih	VC13	503	524	503	0,00	21	4,17	27,16	115,83
	VC1	504	481	523	3,63	-23	-4,56		
	VC2	306	289	310	1,29	-17	-5,56		
	Celkem	1313	1294			-19	-1,45		
Bělehradská	VD3	172	175	496	65,32	3	1,74	4,64	48,20
	VD1	358	353	540	33,70	-5	-1,40		
	VD2	115	113	497	76,86	-2	-1,74		
	Celkem	645	641			-4	-0,62		
Ramena celk. [jv/h]		3767	3747			-20	-0,53	55,74	335,37
Simulační krok 0,25									
Rameno	Vjezd	Poptávka [jv/h]	Projelo v exper. [jv/h]	Kapacita v MST [jv/h]	Rezerva kapacity v MST [%]	Rozdíl Projelo – Poptávka		jv ve frontě na rameni (v exper.)	
						Abs. [jv/h]	Rel. [%]	Ø	max.
Hradecká Sever	VA13	346	401	515	32,82	55	15,90	6,06	57,80
	VA1	347	297	523	33,65	-50	-14,41		
	VA2	154	150	310	50,32	-4	-2,60		
	Celkem	847	848			1	0,12		
Studentská	VB3	237	235	497	52,31	-2	-0,84	19,27	112,47
	VB1	532	526	543	2,03	-6	-1,13		
	VB2	193	184	506	61,86	-9	-4,66		
	Celkem	962	945			-17	-1,77		
Hradecká Jih	VC13	503	516	503	0,00	13	2,58	35,67	136,17
	VC1	504	488	523	3,63	-16	-3,17		
	VC2	306	293	310	1,29	-13	-4,25		
	Celkem	1313	1297			-16	-1,22		
Bělehradská	VD3	172	177	496	65,32	5	2,91	6,06	57,10
	VD1	358	363	540	33,70	5	1,40		
	VD2	115	112	497	76,86	-3	-2,61		
	Celkem	645	652			7	1,09		
Ramena celk. [jv/h]		3767	3742			-25	-0,66	67,06	363,53

Simulační krok 0,4									
Rameno	Vjezd	Poptávka [jv/h]	Projelo v exper. [jv/h]	Kapacita v MST [jv/h]	Rezerva kapacity v MST [%]	Rozdíl Projelo – Poptávka		jv ve frontě na rameni (v exper.)	
						Abs. [jv/h]	Rel. [%]	Ø	max.
Hradecká Sever	VA13	346	394	515	32,82	48	13,87	5,99	59,27
	VA1	347	292	523	33,65	-55	-15,85		
	VA2	154	154	310	50,32	0	0,00		
	Celkem	847	840			-7	-0,83		
Studentská	VB3	237	234	497	52,31	-3	-1,27	32,51	136,77
	VB1	532	518	543	2,03	-14	-2,63		
	VB2	193	179	506	61,86	-14	-7,25		
	Celkem	962	931			-31	-3,22		
Hradecká Jih	VC13	503	510	503	0,00	7	1,39	30,35	129,97
	VC1	504	474	523	3,63	-30	-5,95		
	VC2	306	291	310	1,29	-15	-4,90		
	Celkem	1313	1275			-38	-2,89		
Bělehradská	VD3	172	177	496	65,32	5	2,91	7,36	62,57
	VD1	358	359	540	33,70	1	0,28		
	VD2	115	114	497	76,86	-1	-0,87		
	Celkem	645	650			5	0,78		
Ramena celk. [jv/h]		3767	3696			-71	-1,88	76,21	388,57
Simulační krok 0,5									
Rameno	Vjezd	Poptávka [jv/h]	Projelo v exper. [jv/h]	Kapacita v MST [jv/h]	Rezerva kapacity v MST [%]	Rozdíl Projelo – Poptávka		jv ve frontě na rameni (v exper.)	
						Abs. [jv/h]	Rel. [%]	Ø	max.
Hradecká Sever	VA13	346	394	515	32,82	48	13,87	6,08	58,33
	VA1	347	301	523	33,65	-46	-13,26		
	VA2	154	157	310	50,32	3	1,95		
	Celkem	847	852			5	0,59		
Studentská	VB3	237	222	497	52,31	-15	-6,33	39,33	146,80
	VB1	532	516	543	2,03	-16	-3,01		
	VB2	193	169	506	61,86	-24	-12,44		
	Celkem	962	907			-55	-5,72		
Hradecká Jih	VC13	503	498	503	0,00	-5	-0,99	41,21	143,07
	VC1	504	486	523	3,63	-18	-3,57		
	VC2	306	292	310	1,29	-14	-4,58		
	Celkem	1313	1276			-37	-2,82		
Bělehradská	VD3	172	170	496	65,32	-2	-1,16	8,30	68,70
	VD1	358	369	540	33,70	11	3,07		
	VD2	115	108	497	76,86	-7	-6,09		
	Celkem	645	647			2	0,31		
Ramena celk. [jv/h]		3767	3682			-85	-2,26	94,93	416,90

V tabulce 14 nejsou pro přehlednost uvedeny další hodnoty simulačních kroků 0,6; 0,75 a 1 pro stejné maximální vstupní intenzity. Tyto hodnoty přinášejí pouze další snižování počtu vozidel, které je simulační model schopen propustit, a nejeví se jako vhodné pro parametrizaci simulačního modelu. Pro simulační krok 0,6 je celkový počet propuštěných jednotkových vozidel již jen 3629 jv (oproti poptávaným 3767 jv), celkový rozdíl mezi počtem propuštěných jednotkových vozidel a nadefinovanou poptávkou je -138 jv, relativní rozdíl -3,66 %, průměrný počet vozidel ve frontách na všech ramenech křižovatky je 117,76 jv. Pro simulační krok 0,75 jsou tyto hodnoty: 3528 jv, -239 jv, -6,34 %, 172 jv, pro simulační krok 1: 3405 jv, -362 jv, -9,61 %, 277,81 jv. Kompletní tabulku lze nalézt na datovém nosiči, který je přílohou této práce.

Dobrou volbou pro parametrizaci simulačního modelu se zdá být **hodnota simulačního kroku 0,25**. Výpočetní náročnost simulace je snesitelná (oproti nejmenší hodnotě 0,1) a experiment vykazuje na téměř 100% vytížených vjezdech relativní rozdíl naměřených a poptávaných intenzit blízky nule (mírně záporný) a také malé rozdíly propuštěných intenzit oproti poptávce na ostatních vjezdech, u kterých není plně využívána jejich kapacita. Při vyšších hodnotách simulačního kroku již křižovatka není schopna propustit téměř všechna vozidla. Hodnoty, které jsou v tabulce zvýrazněny červeně, jsou pro stanovení hodnoty simulačního kroku považovány za nejdůležitější.

Rozdíly naměřených a poptávaných intenzit v rámci vjezdů *V13* a *V1* a v rámci vjezdů *VC13*, *VC1* je vhodnější porovnávat souhrnně. Vozidla jedoucí přímo mohou využívat jak vjezd *V13* tak i *V1*, stejně tak tomu je i u vjezdů „*VC*“. Z výsledků experimentů je patrné, že jsou více využívány vjezdy *V13* a *VC13* na úkor vjezdů *V1* a *VC1*, při nárůstu intenzit na příslušných ramenech křižovatky by se ovšem využití vjezdů vyrovnalo a tvořily by se před nimi podobně velké fronty vozidel.

Poté, co jsme stanovili hodnotu simulačního kroku pro parametrizaci simulačního modelu na 0,25, můžeme realizovat experimenty pro narůstající intenzity dopravních proudů (pro 90 %, 100 %, 110 %, 120 %, 130 % a 140 % „maximálních“ intenzit, které vykazují nulovou rezervu kapacity na nejvíce zatíženém vjezdu křižovatky) a sledovat kapacitní propustnost simulačního modelu v porovnání s kapacitami vjezdů vypočítanými MST. Rovněž provedeme experiment s původními prognózovanými intenzitami, které představují 75 % „maximálních“ intenzit.

Výsledky experimentů jsou uvedeny v tabulce 15, která má stejnou strukturu jako předchozí tabulka, hodnoty byly získány rovněž jako průměr z 30 replikací. Porovnání kapacitní propustnosti simulačního modelu a kapacit vypočítaných v MST vychází z těchto předpokladů: Při maximálních poptávaných intenzitách (nulové rezervě kapacity na nejvíce zatíženém vjezdu) by křižovatka z celkového pohledu měla propustit téměř všechna vozidla, která jsou zahrnuta v poptávce. Pokud jsou intenzity na kritickém vjezdu vyšší, křižovatka již nebude schopna propouštět všechna vozidla. Pokud je na vjezdu poptávána intenzita převyšující kapacitu vjezdu, která byla vypočítána MST, měl by se počet jednotkových vozidel propuštěných na tomto vjezdu v simulačním experimentu blížit k vypočítané kapacitě.

Tab 15. Kapacitní propustnost křižovatky při různých intenzitách dopravních proudů

Původní prognózané intenzity pro rok 2020, tj. 75 % maximálních intenzit									
Rameno	Vjezd	Poptávka [jv/h]	Projelo v exper. [jv/h]	Kapacita v MST [jv/h]	Rezerva kapacity v MST [%]	Rozdíl Projelo – Poptávka		jv ve frontě na rameni (v exper.)	
						Abs. [jv/h]	Rel. [%]	Ø	max.
Hradecká Sever	VA13	258	312	515	49,90	54	20,93	4,40	48,33
	VA1	259	210	523	50,48	-49	-18,92		
	VA2	115	120	310	62,90	5	4,35		
	Celkem	632	642			10	1,58		
Studentská	VB3	177	177	497	64,39	0	0,00	5,80	75,37
	VB1	397	396	543	26,89	-1	-0,25		
	VB2	144	145	506	71,54	1	0,69		
	Celkem	718	718			0	0,00		
Hradecká Jih	VC13	375	428	503	25,45	53	14,13	8,14	53,03
	VC1	376	330	523	28,11	-46	-12,23		
	VC2	228	228	310	26,45	0	0,00		
	Celkem	979	986			7	0,72		
Bělehradská	VD3	128	128	496	74,19	0	0,00	2,79	33,27
	VD1	267	266	540	50,56	-1	-0,37		
	VD2	86	86	497	82,70	0	0,00		
	Celkem	481	480			-1	-0,21		
Ramena celk. [jv/h]		2810	2826			16	0,57	21,13	210,00
90 % maximálních intenzit (původní intenzity navýšené 1,206krát)									
Rameno	Vjezd	Poptávka [jv/h]	Projelo v exper. [jv/h]	Kapacita v MST [jv/h]	Rezerva kapacity v MST [%]	Rozdíl Projelo – Poptávka		jv ve frontě na rameni (v exper.)	
						Abs. [jv/h]	Rel. [%]	Ø	max.
Hradecká Sever	VA13	311	365	515	39,61	54	17,36	5,40	56,43
	VA1	312	262	523	40,34	-50	-16,03		
	VA2	139	139	310	55,16	0	0,00		
	Celkem	762	766			4	0,52		
Studentská	VB3	213	216	497	57,14	3	1,41	10,80	91,80
	VB1	479	480	543	11,79	1	0,21		
	VB2	174	175	506	65,61	1	0,57		
	Celkem	866	871			5	0,58		
Hradecká Jih	VC13	452	483	503	10,14	31	6,86	14,41	76,63
	VC1	453	426	523	13,38	-27	-5,96		
	VC2	275	277	310	11,29	2	0,73		
	Celkem	1180	1186			6	0,51		
Bělehradská	VD3	154	156	496	68,95	2	1,30	4,09	41,47
	VD1	322	322	540	40,37	0	0,00		
	VD2	104	105	497	79,07	1	0,96		
	Celkem	580	583			3	0,52		
Ramena celk. [jv/h]		3388	3406			18	0,53	34,71	266,33

100 % maximálních intenzit (původní intenzity navýšené 1,34krát)									
Rameno	Vjezd	Poptávka [jv/h]	Projelo v exper. [jv/h]	Kapacita v MST [jv/h]	Rezerva kapacity v MST [%]	Rozdíl Projelo – Poptávka		jv ve frontě na rameni (v exper.)	
						Abs. [jv/h]	Rel. [%]	Ø	max.
Hradecká Sever	VA13	346	401	515	32,82	55	15,90	6,06	57,80
	VA1	347	297	523	33,65	-50	-14,41		
	VA2	154	150	310	50,32	-4	-2,60		
	Celkem	847	848			1	0,12		
Studentská	VB3	237	235	497	52,31	-2	-0,84	19,27	112,47
	VB1	532	526	543	2,03	-6	-1,13		
	VB2	193	184	506	61,86	-9	-4,66		
	Celkem	962	945			-17	-1,77		
Hradecká Jih	VC13	503	516	503	0,00	13	2,58	35,67	136,17
	VC1	504	488	523	3,63	-16	-3,17		
	VC2	306	293	310	1,29	-13	-4,25		
	Celkem	1313	1297			-16	-1,22		
Bělehradská	VD3	172	177	496	65,32	5	2,91	6,06	57,10
	VD1	358	363	540	33,70	5	1,40		
	VD2	115	112	497	76,86	-3	-2,61		
	Celkem	645	652			7	1,09		
Ramena celk. [jv/h]		3767	3742			-25	-0,66	67,06	363,53
110 % maximálních intenzit (původní intenzity navýšené 1,474krát)									
Rameno	Vjezd	Poptávka [jv/h]	Projelo v exper. [jv/h]	Kapacita v MST [jv/h]	Rezerva kapacity v MST [%]	Rozdíl Projelo – Poptávka		jv ve frontě na rameni (v exper.)	
						Abs. [jv/h]	Rel. [%]	Ø	max.
Hradecká Sever	VA13	380	430	515	26,21	50	13,16	6,90	65,27
	VA1	382	334	523	26,96	-48	-12,57		
	VA2	170	173	310	45,16	3	1,76		
	Celkem	932	937			5	0,54		
Studentská	VB3	261	231	497	47,48	-30	-11,49	65,84	199,90
	VB1	585	552	543	-7,73	-33	-5,64		
	VB2	212	189	506	58,10	-23	-10,85		
	Celkem	1058	972			-86	-8,13		
Hradecká Jih	VC13	553	524	503	-9,94	-29	-5,24	88,14	238,93
	VC1	554	501	523	-5,93	-53	-9,57		
	VC2	336	300	310	-8,39	-36	-10,71		
	Celkem	1443	1325			-118	-8,18		
Bělehradská	VD3	189	191	496	61,90	2	1,06	7,80	67,23
	VD1	394	397	540	27,04	3	0,76		
	VD2	127	121	497	74,45	-6	-4,72		
	Celkem	710	709			-1	-0,14		
Ramena celk. [jv/h]		4143	3943			-200	-4,83	168,68	571,33

120 % maximálních intenzit (původní intenzity navýšené 1,608krát)									
Rameno	Vjezd	Poptávka [jv/h]	Projelo v exper. [jv/h]	Kapacita v MST [jv/h]	Rezerva kapacity v MST [%]	Rozdíl Projelo – Poptávka		jv ve frontě na rameni (v exper.)	
						Abs. [jv/h]	Rel. [%]	Ø	max.
Hradecká Sever	VA13	415	466	515	19,42	51	12,29	7,76	71,23
	VA1	416	374	523	20,46	-42	-10,10		
	VA2	185	185	310	40,32	0	0,00		
	Celkem	1016	1025			9	0,89		
Studentská	VB3	285	233	497	42,66	-52	-18,25	116,46	293,53
	VB1	638	543	543	-17,50	-95	-14,89		
	VB2	232	185	506	54,15	-47	-20,26		
	Celkem	1155	961			-194	-16,80		
Hradecká Jih	VC13	603	524	503	-19,88	-79	-13,10	160,70	381,00
	VC1	605	497	523	-15,68	-108	-17,85		
	VC2	367	298	310	-18,39	-69	-18,80		
	Celkem	1575	1319			-256	-16,25		
Bělehradská	VD3	206	208	496	58,47	2	0,97	14,86	95,07
	VD1	429	440	540	20,56	11	2,56		
	VD2	138	129	497	72,23	-9	-6,52		
	Celkem	773	777			4	0,52		
Ramena celk. [jv/h]		4519	4082			-437	-9,67	299,77	840,83
130 % maximálních intenzit (původní intenzity navýšené 1,742krát)									
Rameno	Vjezd	Poptávka [jv/h]	Projelo v exper. [jv/h]	Kapacita v MST [jv/h]	Rezerva kapacity v MST [%]	Rozdíl Projelo – Poptávka		jv ve frontě na rameni (v exper.)	
						Abs. [jv/h]	Rel. [%]	Ø	max.
Hradecká Sever	VA13	449	497	515	12,82	48	10,69	8,79	76,80
	VA1	451	405	523	13,77	-46	-10,20		
	VA2	200	205	310	35,48	5	2,50		
	Celkem	1100	1107			7	0,64		
Studentská	VB3	308	236	497	38,03	-72	-23,38	174,74	408,13
	VB1	692	546	543	-27,44	-146	-21,10		
	VB2	251	181	506	50,40	-70	-27,89		
	Celkem	1251	963			-288	-23,02		
Hradecká Jih	VC13	653	522	503	-29,82	-131	-20,06	244,00	538,07
	VC1	655	493	523	-25,24	-162	-24,73		
	VC2	397	302	310	-28,06	-95	-23,93		
	Celkem	1705	1317			-388	-22,76		
Bělehradská	VD3	223	216	496	55,04	-7	-3,14	20,52	113,03
	VD1	465	469	540	13,89	4	0,86		
	VD2	150	136	497	69,82	-14	-9,33		
	Celkem	838	821			-17	-2,03		
Ramena celk. [jv/h]		4894	4208			-686	-14,02	448,05	1136,0

140 % maximálních intenzit (původní intenzity navýšené 1,876krát)									
Rameno	Vjezd	Poptávka [jv/h]	Projelo v exper. [jv/h]	Kapacita v MST [jv/h]	Rezerva kapacity v MST [%]	Rozdíl Projelo – Poptávka		jv ve frontě na rameni (v exper.)	
						Abs. [jv/h]	Rel. [%]	Ø	max.
Hradecká Sever	VA13	484	526	515	6,02	42	8,68	9,96	81,50
	VA1	486	445	523	7,07	-41	-8,44		
	VA2	216	211	310	30,32	-5	-2,31		
	Celkem	1186	1182			-4	-0,34		
Studentská	VB3	332	240	497	33,20	-92	-27,71	223,15	494,97
	VB1	745	552	543	-37,20	-193	-25,91		
	VB2	270	181	506	46,64	-89	-32,96		
	Celkem	1347	973			-374	-27,77		
Hradecká Jih	VC13	704	522	503	-39,96	-182	-25,85	324,59	672,50
	VC1	705	505	523	-34,80	-200	-28,37		
	VC2	428	304	310	-38,06	-124	-28,97		
	Celkem	1837	1331			-506	-27,54		
Bělehradská	VD3	240	226	496	51,61	-14	-5,83	36,84	151,97
	VD1	501	490	540	7,22	-11	-2,20		
	VD2	161	136	497	67,61	-25	-15,53		
	Celkem	902	852			-50	-5,54		
Ramena celk. [jv/h]		5272	4338			-934	-17,72	594,54	1400,9

Z celkového pohledu lze konstatovat, že v simulačním modelu lze dosáhnout výsledků, které poměrně dobře odpovídají výsledkům získaným analytickým výpočtem (MST). Dokud nezačínají být žádné vjezdy křižovatky přetěžovány (v MST vykazují kladnou hodnotu rezervy kapacity), křižovatka je schopna propustit všechna vozidla a rovněž na jednotlivých vjezdech jsou propuštěny intenzity velmi blízké poptávaným intenzitám (s přihlédnutím k výše zmíněnému chování vozidel na vjezdech VA13, VA1 a VC13, VC1, kde se mohou vozidla jedoucí přímým směrem řadit do libovolného ze dvou možných vjezdů – tyto vjezdy je vhodnější porovnávat souhrnně).

Při nejvýše 100% vytížení křižovatky (maximálních intenzitách) je patrné, že na kritickém rameni Hradecká Jih, kde se nachází kritický vjezd VC13 s nulovou rezervou kapacity a rovněž další zatížené vjezdy, začínají narůstat fronty vozidel a také na poměrně zatíženém rameni Studentská se začínají fronty prodlužovat. Nicméně zmíněná ramena jsou dosud schopna propustit téměř všechna vozidla a celkově křižovatka propustí jen o 0,66 % vozidel méně, než je poptáváno.

Při nejvýše 110% zatížení křižovatky je zaznamenán další značný nárůst fronty na ramenech Hradecká Jih a Studentská, přičemž tato ramena nepropustí poptávané intenzity s deficitem přes 8 %, můžeme tedy již mluvit o zahlcování provozu. Ostatní ramena zatím nedosahují svých kapacitních limitů a propustí poptávané intenzity bez většího nárůstu front.

Při maximálně 120% zatížení křižovatky se u zmiňovaných nejvíce zatížených ramen dále zvyšuje (zhruba zdvojnásobuje) procentuální kapacitní deficit a délka front, při maximálně 130% zatížení se tento deficit pohybuje už kolem 23 %. V případě nejvýše 140% zatížení vjezdů křižovatky deficit na kritických ramenech Hradecká Jih a Studentská přesahuje

27 % a rovněž na rameni Bělehradská se objevuje kapacitní deficit přes 5 %. Celkový relativní rozdíl propuštěného a poptávaného počtu vozidel je -17,72 %.

Pokud bychom teoreticky připustili situaci, kdy budou všechny vjezdy plně vytiženy, mohli bychom vysledovat, jaký počet jednotkových vozidel jsou jednotlivé vjezdy v simulačním modelu schopny propustit a zda se tento počet přibližně rovná teoreticky vypočítaným kapacitám vjezdů. Tento případ zachycuje tabulka 16 při nejvýše 500% zatížení vjezdů, kdy podle MST dosahuje nejvyšší deficit kapacity na vjezdu 400 % a nejnižší deficit 16 %. Tento dodatečný experiment byl realizován při menším počtu 15 replikací z důvodu výpočetní náročnosti simulace velmi vysokých intenzit provozu. Rovněž na měření délek front na ramenech křižovatky bylo rezignováno, v simulačním modelu by se brzy zaplnila všechna už tak dlouhá ramena křižovatky. Podle počtu nepropuštěných vozidel lze průměrnou délku fronty na každém rameni křižovatky odhadovat i na několik tisíc vozidel.

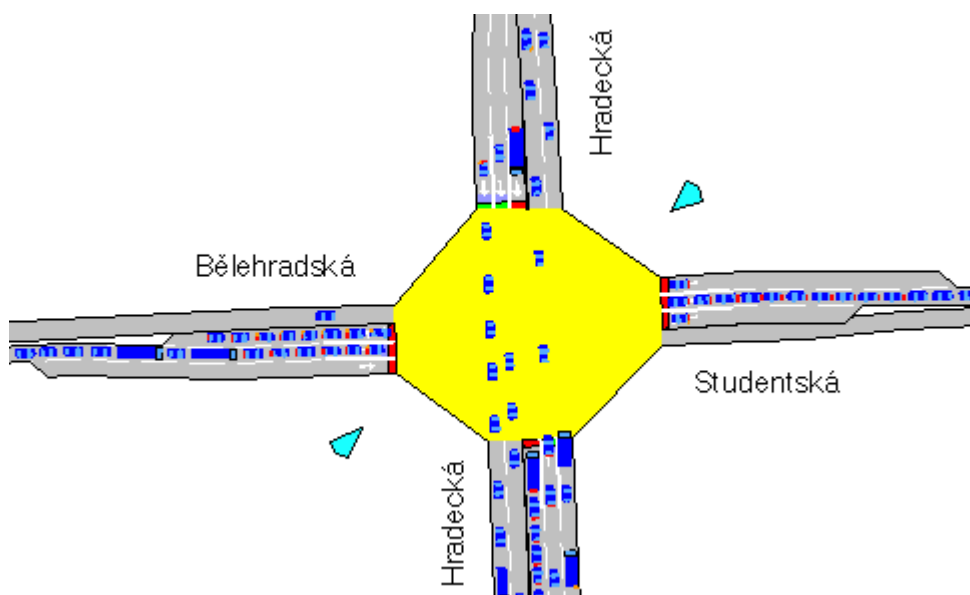
Tab 16. Kapacitní propustnost křižovatky při plném zatížení všech vjezdů

500 % maximálních intenzit (původní intenzity navýšené 6,7krát)							
Rameno	Vjezd	Poptávka [jv/h]	Projelo v exper. [jv/h]	Kapacita v MST [jv/h]	Rezerva kapacity v MST [%]	Rozdíl Projelo – Poptávka	
						Abs. [jv/h]	Rel. [%]
Hradecká Sever	VA13	1729	591	515	-235,73	-1138	-65,82
	VA1	1735	554	523	-231,74	-1181	-68,07
	VA2	771	249	310	-148,71	-522	-67,70
	Celkem	4235	1394			-2841	-67,08
Studentská	VB3	1186	232	497	-138,63	-954	-80,44
	VB1	2660	543	543	-389,87	-2117	-79,59
	VB2	965	177	506	-90,71	-788	-81,66
	Celkem	4811	952			-3859	-80,21
Hradecká Jih	VC13	2513	525	503	-399,60	-1988	-79,11
	VC1	2519	490	523	-381,64	-2029	-80,55
	VC2	1528	299	310	-392,90	-1229	-80,43
	Celkem	6560	1314			-5246	-79,97
Bělehradská	VD3	858	240	496	-72,98	-618	-72,03
	VD1	1789	513	540	-231,30	-1276	-71,32
	VD2	576	141	497	-15,90	-435	-75,52
	Celkem	3223	894			-2329	-72,26
Ramena celk. [jv/h]		18829	4554			-14275	-75,81

U vjezdů VA13, VA1, VB1, VC13, VC1, VC2 a VD1 odpovídá maximální propuštěný počet jednotkových vozidel poměrně dobře kapacitě vjezdu stanovené v MST, u ostatních vjezdů je propuštěn menší počet vozidel. Vzhledem k tomu, že tyto „méně propustné“ vjezdy představují vždy levé nebo pravé odbočení v křižovatce, lze se domnívat, že menší kapacitní propustnost je způsobena především velmi dlouhými frontami vozidel v přímém směru, které neumožňují vpravo nebo vlevo odbočujícím vozidlům dostat se včas do prostoru, kde je možné provést přeřazení do levého nebo pravého řadicího pruhu, jak demonstruje obrázek 19. Pokud se na řadicích pružích pro odbočení vlevo nebo vpravo nenashromáždí před začátkem zelené dostatečný počet vozidel, nemohou tato vozidla po celou dobu zelené projíždět přes stopčáru vždy v saturovaném toku, jak předpokládá metoda saturovaného toku (MST), proto

ani příslušné vjezdy nemohou reálně dosahovat takové propustnosti, jakou udává kapacita v MST.

Tyto kapacitní disproporce jsou závislé na počtu základních jízdních pruhů na komunikaci ve směru jízdy ke křižovatce (jeden jízdní pruh může při nadměrných intenzitách přímého směru znemožnit odbočujícím vozidlům dostatečně plynulý přístup do oblasti odbočných řadicích pruhů), ale také na délce řadicích pruhů, kterou MST vůbec nezohledňuje. Menší propustnost odbočných jízdních pruhů nelze tedy v tomto případě považovat za chybu simulátoru nebo parametrizace simulačního modelu, v tomto případě by zřejmě provoz realizovaný v simulačním modelu, který uvažuje geometrické uspořádání řadicích pruhů, lépe odpovídal reálnému provozu než provoz realizovaný plně podle teoretických výsledků MST. Při běžných (nikoliv nadměrných) intenzitách provozu, na které je křižovatka Hradecká – Studentská – Bělehradská dimenzována, by se však blokování prostoru postranních řadicích pruhů nemělo vyskytovat.



Obr 19. Obtížné zařazování odbočujících vozidel do postranních řadicích pruhů při nadměrných intenzitách přímého směru

Závěrem je možné konstatovat, že byla dosažena poměrně dobrá shoda výsledků simulačních experimentů s výsledky analytické metody (MST). Pouze při nadměrném zatížení všech vjezdů křižovatky vykazují simulační experimenty menší kapacitní propustnost vjezdů pro pravé a levé odbočení, neboť plynulé přeřazování proudů odbočujících vozidel je omezováno dlouhými frontami vozidel v intenzivním přímém směru. Takto vysoké intenzity provozu však nejsou v realitě uvažovány. V tomto případě nejde o chybu simulátoru či simulačního modelu, spíše o nedostatek MST. Metoda neuvažuje specifickou situaci, ve které by se odbočující vozidla nemohla kvůli vysoké intenzitě přímého směru a krátkým řadicím pruhům dostat před zahájením zelené v dostatečném počtu do postranních řadicích pruhů tak, aby po celou dobu zelené mohla vjíždět do křižovatky v saturovaném toku.

Pokud jsou v rámci konstrukce simulačního modelu k dispozici také kapacity jednotlivých vjezdů křižovatky s více řadicími pruhy na vjezdech, nebo lze tyto kapacity vypočítat, doporučuji v rámci každého konkrétního modelu pro dané skutečně aplikované intenzity provést verifikaci parametrizace modelu podobným způsobem jako v této kapitole. Na základě této verifikace je možné vhodně nastavit velikost simulačního kroku, parametry Distance

Zone 2 a 1 a další parametry související s provozem na sledované křižovatce a zajistit tak, aby bylo dosaženo poptávaných intenzit na řadicích pruzích křižovatky a aby vozidla byla správně směřována do dalších částí modelu.

Parametrizace modelu, která byla provedena v rámci těchto experimentů a zaručuje poměrně dobrou shodu kapacitní propustnosti modelu s kapacitními propočty v analytické metodě (MST), bude použita také v simulační studii, která je realizována v rámci této diplomové práce. Provedené porovnání výstupů části simulačního modelu s výsledky analytické metody lze považovat alespoň za dílčí prověření validity výsledků produkovaných simulátorem v rámci této simulační studie.

Nicméně při verifikaci a validaci jiných simulačních modelů je třeba provést vždy nové porovnání poptávaných a modelem realizovaných intenzit, zejména s ohledem na celkovou propustnost simulačního modelu a kapacitní propustnost kruhových a světelně řízených křižovatek. Zejména je vhodné zaměřit se na verifikaci křižovatek s více řadicími pruhy na vjezdech, jejichž parametrizace může být problematická.

8 Případová simulační studie provozu na Studentské ulici a přilehlých křižovatkách

8.1 Úvod k simulační studii

Hlavním cílem této diplomové práce je demonstrovat využití experimentální výzkumné metody simulace pro podporu rozhodování v dopravním inženýrství na případové studii, ve které bude navržen signální plán na vybrané průsečné křižovatce, vytvořen a verifikován simulační model této křižovatky a následně zpracovány výsledky simulačních experimentů s tímto modelem s akcentem na ukazatele uplatnitelné v dopravním inženýrství.

V kapitole 5 byl navržen signální plán pro průsečnou křižovatku Hradecká – Studentská – Bělehradská v Pardubicích (dále HSB). Model této křižovatky bude v rámci simulační studie zařazen do modelu Studentské ulice, který vypracoval Ing. David Svozil ve své diplomové práci [24] v simulačním prostředí AIMSUN NG. V původním modelu byla na místě křižovatky HSB uvažována dvoupruhová okružní křižovatka, simulační studie realizovaná v rámci této diplomové práce ji nahradí zmíněnou průsečnou světelně řízenou křižovatkou, přičemž na konci simulační studie bude provedeno také porovnání výstupů experimentů s oběma variantami modelu.

Simulační studie ve variantě s okružní křižovatkou byla vypracována již dříve⁸ také na Dopravní fakultě Jana Pernera Univerzity Pardubice (DFJP) [16], ovšem v makroskopickém simulátoru Villon, který je primárně určen pro simulaci dopravy v železničních uzlech.

Uvedené simulační studie, včetně studie provedené v této práci, prověřují riziko zahlcování silničního provozu a plynulost provozu na Studentské ulici a přilehlých komunikacích pro intenzity vozidel prognózované pro odpolední špičkovou hodinu 15:30 – 16:30 roku 2020. Tyto intenzity odpovídají navrhovanému dopravnímu řešení města Pardubice s vybudovaným městským obchvatem, které bylo podrobněji popsáno již v úvodu práce.

8.2 Formulace problému a vymezení objektu zkoumání

V posledních letech je plánována modernizace, rozvoj a optimalizace silniční sítě města Pardubice. Koncepce vnější dopravní sítě je v zásadě vyřešena, problematika vnitřní dopravní sítě města je však dosud předmětem odborné diskuze.

Objekt zkoumání této simulační studie lze vymezit jako souvislou podsít' navrhované silniční sítě města Pardubice, která se skládá ze:

- Studentské ulice, která prochází kampusem Univerzity Pardubice v městské části Polabiny, a z přilehlých částí odbočných komunikací,
- světelně řízené průsečné křižovatky Hradecká – Studentská – Bělehradská (HSB), do které je zaústěna západní část Studentské ulice,
- okružní křižovatky, do které je zaústěna východní část Studentské ulice,
- dvou přechodů pro chodce se zpomalovacími bariérami na ulici Studentská.

Vymezená oblast je v širším kontextu plánované vnitřní dopravní sítě města Pardubice zobrazena na obrázku 2 (viz. oblast vyznačená modrým obdélníkem).

8.3 Cíle simulační studie

Hlavním cílem této simulační studie je prověřit riziko zahlcování silničního provozu a plynulost provozu na Studentské ulici a přilehlých komunikacích pro intenzity vozidel prognózované pro odpolední špičkovou hodinu 15:30 – 16:30 roku 2020. Intenzity odpovídají tzv. 5. variantě komunikační sítě města Pardubice, jež byla navržena firmou Highway Design z Hradce Králové. Intenzity a složení dopravních proudů byly převzaty ze simulační studie [16].

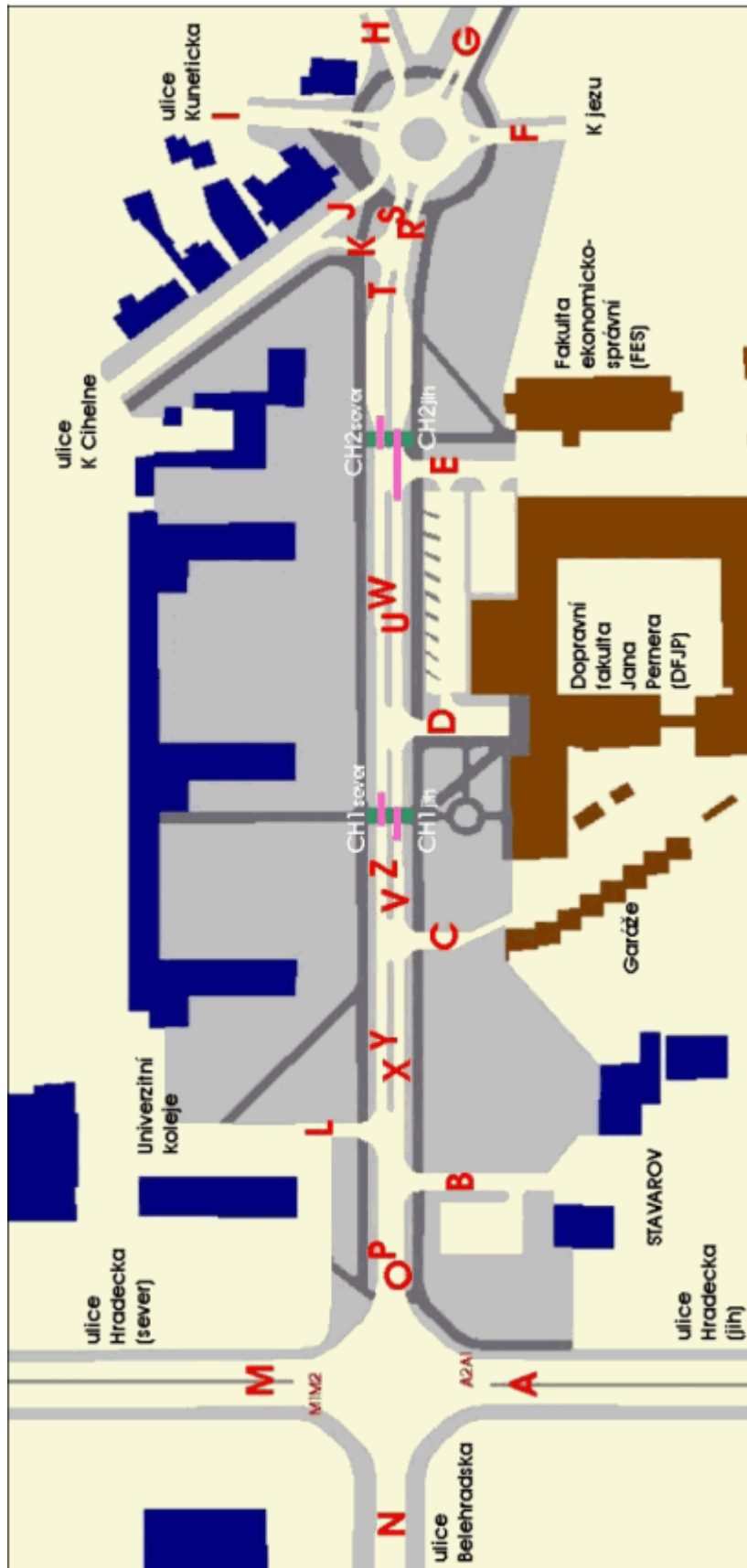
Základní otázkou, kterou má simulační studie zodpovědět, je, zda navrhované řešení zkoumaného segmentu silniční sítě bude kapacitně vyhovující pro zkoumané intenzity dopravních proudů, tj. zda umožní plynulý provoz bez zahlcování. Výsledky simulační studie je třeba doložit vhodnými dopravně-inženýrskými ukazateli.

V simulační studii bude na základě výstupních statistických ukazatelů vypracováno porovnání dopravního řešení prověřovaného v této studii s variantou, která byla vyhodnocena již dříve v [24] a která uvažovala na místě světelně řízené křižovatky Hradecká – Studentská – Bělehradská dvoupruhovou okružní křižovatkou.

8.4 Vymezení systému na objektu zkoumání

Na výše specifikovaném objektu zkoumání je třeba vymežit simulovaný systém (originál), který abstrahuje od vlastností objektu zkoumání, jež nejsou podstatné pro zpracování případové simulační studie. Vymezený systém zahrnuje následující prvky a procesy (stejně jako simulovaný systém vymezený v simulační studii [16]):

- Stabilní permanentní prvky – úseky dopravní infrastruktury zkoumaného segmentu silniční sítě. Každý úsek je označen písmenem dle obrázku 20. U každého úseku je známé jeho geometrické uspořádání a maximální povolená rychlost.
- Mobilní temporární prvky – osobní a nákladní automobily a chodce, kteří se mohou dle pravidel silničního provozu pohybovat po vymezených úsecích silniční infrastruktury.
- Procesy přemísťování mobilních temporárních prvků po dopravní infrastruktuře a jejich vzájemné interakce.
- Okolí zkoumaného systému – od jeho struktury abstrahujeme, nicméně je nutné jej uvažovat, protože jsou jím generovány mobilní temporární prvky, které vstupují do systému, a následně absorbovány prvky, které vystupují ze systému. K zahajování přemísťovacích procesů může docházet na množině úseků $U_S = \{A, M, N, B, C, D, E, F, G, H, I, K, L\}$, k ukončování přemísťování na úsecích $U_K = \{A, M, N, B, C, D, E, F, G, H, I, J, L\}$. Množinu sledovaných interagujících dopravních proudů vozidel tvoří kartézský součin $P_V = U_S \times U_K$, u chodců sledujeme proudy, které se vzájemně neovlivňují: $P_{CH} = \{(CH1sever, CH1jih), (CH1jih, CH1sever), (CH2sever, CH2jih), (CH2jih, CH2sever)\}$. Chodecké proudy z množiny P_{CH} však interagují s některými vozidlovými proudy z množiny P_V , jak je patrné z obrázku 20.



Obr 20. Identifikace komunikací a jejich částí pro účely značení dopravních proudů (zdroj: [16])

8.5 Konceptuální model vymezeného systému

Pro implementaci simulačního modelu bylo vybráno simulační prostředí AIMSUN NG od španělské společnosti TSS – Transport Simulation Systems, které se specializuje na mikroskopickou simulaci silničních dopravních systémů. Tento produkt je v současnosti považován za jeden z nejlepších mikroskopických simulátorů silničního provozu a nabízí všechny vlastnosti potřebné pro implementaci simulačního modelu. Aplikace AIMSUN NG byla podrobněji popsána v kapitole 6 této práce.

Pro realizaci této simulační studie není nezbytně nutné, resp. účelné vytvářet konceptuální model vymezeného systému pomocí obecnějšího neimplementačního formalismu a lze přistoupit přímo k implementaci simulačního modelu v prostředí AIMSUN NG.

8.6 Vstupní data pro simulační model

Simulační model byl vystavěn nad původním modelem Studentské ulice, který byl v rámci diplomové práce [24] zpracován Ing. Davidem Svozilem v simulačním prostředí AIMSUN NG. Původní model byl modifikován – dvoupruhová okružní křižovatka Hradecká – Studentská – Bělehradská byla nahrazena průsečnou světelně řízenou křižovatkou s navrženým pevným signálním plánem. Pro parametrizaci dopravní poptávky byly použity O/D matice z původního modelu, které odpovídají níže uvedeným intenzitám prognózovaným pro špičkovou hodinu roku 2020. Při sestavení a parametrizaci simulačního modelu byly dále použity tyto podkladové materiály:

- Intenzity dopravních proudů osobních a nákladních vozidel prognózované pro odpolední špičkovou hodinu 15:30 – 16:30 roku 2020, převzaté ze simulační studie [16]. Intenzity původně pochází z počítačového dopravního modelu komunikační sítě města Pardubice, který byl zhotoven na zakázku magistrátu města Pardubice firmou DHV CR, s. r. o., Praha, přičemž tyto intenzity byly dále upřesněny na základě dopravního průzkumu realizovaného Dopravní fakultou Jana Pernera na Univerzitě Pardubice („Dopravní průzkum v oblasti silniční komunikace ulice Studentská“, jež je přílohou simulační studie [16]). Intenzity vozidlových dopravních proudů jsou uvedeny v příloze C.
- Intenzity proudů chodců prognózované ve výše zmíněné špičkové hodině, které byly převzaty ze simulační studie [16] a původně pochází z dopravní studie „Dopravní průzkum v oblasti silniční komunikace ulice Studentská“, která byla vypracována Dopravní fakultou Jana Pernera Univerzity Pardubice v březnu 2004. Intenzity chodeckých proudů jsou uvedeny v tabulce 17.
- Maximální povolené rychlosti mobilních entit na úsecích zkoumaného segmentu silniční sítě, které byly převzaty z [16].
- Pevný signální plán vypočítaný pro průsečnou křižovatku Hradecká – Studentská – Bělehradská v kapitole 5 této diplomové práce.
- Digitální mapové podklady dostupné v geografickém informačním systému města Pardubice (<http://gis.mmp.cz>), který byl vytvořen firmou GEOVAP, spol. s r. o., z Pardubic, a podrobná situace dopravního řešení Studentské ulice od firmy Highway Design z Hradce Králové (výkres 916-1-00-2.2).

Prognózané intenzity chodců (viz. tabulka 17) jsou rozděleny na proudy studentů a proudy ostatních chodců. Proudů studentů sestávají částečně z elementárních entit, které reprezentují jediného studenta, a částečně z elementárních entit, které reprezentují čtyřčlenné skupinky studentů, kteří se pohybují vždy společně. Pro proudy ostatních chodců představuje jedna entita vždy jediného chodce.

Tab 17. Prognózané proudy chodců přes Studentskou ulici ve špičkové hodině

Proudů chodců		Celkem jednotlivců	Studenti		Ostatní jednotlivci
Z	Do		Studenti-jednotlivci	Čtyřčlenné skupinky	
CH1sever	CH1jih	350	216	54	134
CH1jih	CH1sever	441	252	63	189
CH2sever	CH2jih	154	96	24	58
CH2jih	CH2sever	338	192	48	146
Σ		1283	756	189	527

zdroj: [16]

Proudů studentů je třeba generovat tak, že 80 % z celkového počtu skupinek studentů přejde Studentskou ulici v intervalu 15:50 – 16:10 (uprostřed špičkové hodiny) a zbylých 20 % skupinek je generováno ve zbytku špičkové hodiny. Proudů studentů-jednotlivců a ostatních jednotlivců jsou rozloženy do celé špičkové hodiny.

Všechny vstupní proudy považujeme za Poissonovské toky, časové intervaly mezi příjezdy vozidel, resp. příchody chodců budou tedy generovány nezávislými generátory exponenciálního rozdělení. Přemísťovací procesy mobilních entit (osobních a nákladních automobilů a chodců) jsou charakterizovány maximálními povolenými rychlostmi na jednotlivých úsecích modelované silniční sítě. Tyto rychlosti jsou uvedeny v tabulce 18.

Tab 18. Střední hodnoty maximálních rychlostí automobilů a chodců na úsecích

Osobní a nákladní doprava		
Studentská ulice	Nekřížovatkové úseky	40,0 km/h
	Nekřížovatkové úseky se zpomalovacími bariérami	32,0 km/h
	Křížovatkové úseky	30,0 km/h
	Křížovatkové úseky se zpomalovacími bariérami	24,0 km/h
Ostatní komunikace	Komunikace A,M,N	50,0 km/h
	Komunikace G	70,0 km/h
	Ostatní křížovatkové úseky	30,0 km/h
	Ostatní nekřížovatkové úseky	40,0 km/h
Chodci		
Studentská ulice	Přechody pro chodce (CH1 a CH2)	3,1 km/h

zdroj: [16]

8.7 Tvorba simulačního modelu

Simulační model byl vytvořen v mikroskopickém simulačním prostředí pro simulaci silniční dopravy AIMSUN NG, přičemž byly využity principy tvorby simulačního modelu popsané v podkapitole 6.2. Implementaci modelu v této simulační studii lze shrnout do několika základních kroků:

- 1) Sestrojení geometricky přesného podkladu křižovatky Hradecká – Studentská – Bělehradská (HSB) v podobě výkresu AutoCADu s vyznačením trajektorií pohybů uvnitř křižovatky. Tento podklad byl zkonstruován na základě mapových podkladů z geografického informačního systému města Pardubice.
- 2) Importování výkresu AutoCADu (formátu DWG) i mapového podkladu (formátu JPG) ve správném měřítku do simulačního modelu v aplikaci AIMSUN NG.
- 3) Implementace modelu průsečné světelně řízené křižovatky HSB na podkladových materiálech, včetně tvorby pomocných vnitřních úseků pro modelování pohybu vozidel uvnitř křižovatky.
- 4) Parametrizace úseků křižovatky (typy úseků, rychlosti na úsecích, parametry „Distance Zone 1“, „Distance Zone 2“, „Yellow Box Speed“, případně „Maximum Give Way Time Variability“), nastavení předností v jízdě a signálního plánu na křižovatce HSB.
- 5) Importování dílčího modelu světelně řízené křižovatky HSB do původního modelu Studentské ulice (pomocí položky File → Import... → AIMSUN NG Network v hlavním menu aplikace) a napojení okolních úseků křižovatky na původní úseky v modelu. Napojení centroidů (zdrojů a cílů dopravních proudů) na hraniční úseky křižovatky.
- 6) Dotvoření 3D animační scény modelu – vytvoření nových budov v okolí křižovatky, aplikování fotorealistických textur na stěny objektů, tvorba dekorací.

8.8 Verifikace simulačního modelu

V rámci simulační studie byla provedena velmi podrobná verifikace simulačního modelu Studentské ulice, která po konzultaci nalezených problémů s výrobcem aplikace AIMSUN NG napomohla nejen ke zlepšení chování simulačního modelu, ale také samotného simulačního prostředí AIMSUN NG.

8.8.1 Porovnání očekávaných a skutečných intenzit provozu

Poměrně důležitou a efektivní metodou verifikace je porovnání nadefinovaných (požadovaných) intenzit v simulačním modelu se skutečně realizovanými (naměřenými) intenzitami, které je simulační model schopen propustit. Pokud model jako celek nepropustí požadované intenzity dopravních proudů, je možné že v daném experimentu dochází k zahlcování provozu, které není důsledkem chybné funkcionality modelu, ale předmětem samotného posuzování simulovaného charakteru provozu ve výstupní analýze, možnou příčinou je však také chybné nastavení simulačního modelu, nebo dokonce chyba simulátoru – například uvážnutí dopravních proudů při specifických interakcích mezi vozidly. Toto porovnání může tedy posloužit i pro indikování replikací experimentu, v nichž mohlo potenciálně dojít k chybnému modelování silničního provozu, které je třeba odstranit.

Zvláště mohou být porovnávány poptávané a skutečně realizované vstupní a výstupní intenzity v modelu. Významné neshody ve vstupních intenzitách mohou indikovat problémy s nastavením generátorů pseudonáhodných čísel, které generují intervaly mezi příjezdy vozidel do systému, resp. intervaly mezi příchody chodců.

Počet mobilních temporárních entit, které vstoupily, resp. vystoupily do, resp. ze systému, lze v aplikaci AIMSUN NG měřit pomocí detektorů umístěných na všech vstupních a výstupních úsecích simulovaného segmentu silniční sítě, přičemž tyto detektory musí mít povolenu schopnost měření počtu entit („Count“). Informace o počtu detekovaných entit lze v průběhu simulačního výpočtu ukládat do externí databáze a následně vyhodnocovat pomocí vlastních SQL dotazů, které umožňují získat z databáze výpis údajů vhodných pro přímé porovnání, včetně vypočítaných odchylek.

Pro tento účel bylo ve výstupní databázi MS Accessu, která byla napojena na simulační model, vytvořeno několik pojmenovaných SQL dotazů:

- *RB_Pocty{Vstupnich|Vystupnich}EntitVReplikacich* – zobrazuje očekávaný a skutečně realizovaný počet vstupů/výstupů entit a absolutní a relativní rozdíly mezi očekávanými a naměřenými počty vstupů/výstupů entit v jednotlivých replikacích, a pokud jsou rozdíly větší než stanovená mez, zároveň indikuje možný problém v dané replikaci.
- *RB_Pocty{Vstup.|Vystup.}EntitVPrumReplPodleTypuEntitNezavisleNaAverage* – zobrazuje průměrný počet vstupů/výstupů entit vypočítaný ze všech replikací, zvlášť pro jednotlivé typy entit. Průměrné počty vstupů, resp. výstupů entit jsou zjišťovány z údajů uložených v databázi pro jednotlivé replikace, dotaz není závislý na předchozím vypočítání průměru v aplikaci AIMSUN NG.
- *RB_Pocty{Vstup.|Vystup.}EntitVPrumReplPodleDetektoruNezavisleNaAverage* – zobrazuje průměrný počet vstupů/výstupů entit vypočítaný ze všech replikací, zvlášť pro jednotlivé detektory na vstupních/výstupních úsecích silniční sítě. Průměrné údaje jsou zjišťovány z údajů uložených v databázi pro jednotlivé replikace, dotaz není závislý na předchozím vypočítání průměru v aplikaci AIMSUN NG.

Pro ilustraci je na následujících řádcích uveden SQL dotaz *RB_PoctyVystupnichEntitVPrumReplPodleTypuEntitNezavisleNaAverage*:

```

SELECT R.entita,
AVG(R.ocekavany_pocet) AS ocekavany_pocet,
Round (AVG (R.skutecny_pocet),2) AS skutecny_pocet,
Round (AVG (R.skutecny_pocet)-AVG (R.ocekavany_pocet), 2) AS
rozdil_skutecny_ocekavany,
Round ((rozdil_skutecny_ocekavany/ocekavany_pocet)*100,2) AS
procento_navyseni
FROM [
SELECT DetecMea.rid,
Verifikace.name AS entita,
SUM(Verifikace.ODMatice) AS ocekavany_pocet,
SUM(DetecMea.countveh) AS skutecny_pocet,
SUM(DetecMea.countveh)-SUM(Verifikace.ODMatice) AS
rozdil_skutecny_ocekavany,
Round ((rozdil_skutecny_ocekavany/ocekavany_pocet)*100,2) AS
procento_navyseni
FROM Verifikace, DetecMea, vehTypes
WHERE DetecMea.rid=vehTypes.rid And DetecMea.ctype=vehTypes.ctype

```

```

And DetecMea.namedet=Verifikace.Detektor
And Verifikace.name=vehTypes.name
And DetecMea.rid<>1700 And Verifikace.Smer='VYSTUP'
GROUP BY DetecMea.rid, Verifikace.name
ORDER BY DetecMea.rid, Verifikace.name
]. AS R
GROUP BY R.entita;

```

Vnořený příkaz SELECT vybere pro každou replikaci tři řádky, jeden řádek pro každý typ entit (osobní automobil, nákladní automobil, chodec), přičemž na řádku je zobrazen očekávaný (poptávaný) počet výstupních entit, skutečně naměřený počet výstupních entit a absolutní a relativní rozdíl těchto počtů. Do výběru není zahrnována replikace 1700, která představuje průměr vypočítaný v aplikaci AIMSUN NG ze všech replikací.

Vnější SELECT počty výstupních entit vybrané vnořeným SELECTem zprůměruje přes všechny replikace a vypíše průměrné počty očekávaných a naměřených výstupních entit a průměrné rozdíly těchto počtů souhrnně pro jednotlivé typy entit (tj. celkem 3 řádky: 1 řádek pro osobní automobily, 1 řádek pro nákladní automobily a 1 řádek pro chodce). V tabulce vehTypes jsou ukládány informace o typech entit, v tabulce DetecMea jsou ukládány údaje z detektorů (počty entit naměřené v simulačním modelu) a tabulka Verifikace je tabulka, která výjimečně nebyla vytvořena aplikací AIMSUN NG, nýbrž Ing. Davidem Svozilem, a poskytuje počet vstupních a výstupních entit očekávaný (poptávaný) na jednotlivých detektorech.

Pomocí výše uvedených dotazů bylo v simulačním modelu zjištěno poměrně velké relativní navýšení počtu skutečně realizovaných vstupů nákladních automobilů oproti očekávanému (poptávanému) počtu vstupů nákladních automobilů, jak uvádí tabulka 19 (jedná se o průměrné údaje z 50 replikací). V důsledku toho byly realizovány i vyšší výstupní intenzity nákladních automobilů.

Tab 19. Porovnání poptávaných a skutečně naměřených intenzit provozu v rámci verifikace

Typ entit	Poptávaná intenzita [entit/h]	Průměrná naměřená intenzita [entit/h]	Průměrný rozdíl naměřená – poptávaná intenzita [entit/h]	Průměrné navýšení [%]
Vstupní toky				
osob. aut.	2 537	2 619,40	82,40	3,25
nákl. aut.	254	307,08	53,08	20,90
chodci	716	720,22	4,22	0,59
Výstupní toky				
osob. aut.	2 537	2537,08	0,08	0,00
nákl. aut.	254	297,62	43,62	17,17
chodci	716	720,00	4,00	0,56

Velké navýšení intenzit nákladních automobilů naměřených v modelu oproti definovaným intenzitám bylo reportováno výrobcí aplikace AIMSUN NG jako možná chyba v generování vstupů vozidel (při použití generátoru exponenciálních dob mezi příjezdy). Výrobce potvrdil, že našel chybu v interním algoritmu pro generování příjezdů vozidel, a uvedl, že tato závažná chyba bude opravena v AIMSUN NG verze 6. Chyba se tedy projevuje ve verzích nižších, nalezena byla ve verzi 5.1.7 a následně potvrzena také ve verzi 5.1.8.1.

Výrobce mi poměrně promptně zaslal speciální neveřejný patch, který opravuje reportované chyby (další nalezené problémy jsou popsány v následujícím textu). Tento patch upravuje verzi 5.1.8.1 aplikace AIMSUN NG na speciální verzi 5.1.9 (generovanou dne 29.11.2007). Výstupní statistické údaje experimentu byly samozřejmě vyhodnocovány až po aplikování této opravy. Po provedení opravy bylo znovu provedeno stejné měření jako v tabulce 19, výsledné údaje lze nalézt v tabulce 28, u které je rovněž uveden komentář k účinnosti opravy (oprava snížila navýšení počtu generovaných nákladních automobilů oproti poptávce zhruba z 21 % na 8 %, 8% navýšení je při nízkých intenzitách provozu nákladních automobilů již zanedbatelné).

Uvedený problém se týká generátoru dob mezi příjezdy vozidel, přičemž tyto doby mají exponenciální rozdělení pravděpodobnosti a příslušná vozidla jsou generována v poměrně nízkých intenzitách. Například u rovnoměrného rozdělení pravděpodobnosti dob mezi příjezdy vozidel k uvedenému navýšení počtu generovaných vozidel nedochází, nicméně generátor pseudonáhodných čísel s rovnoměrným rozdělením pravděpodobnosti není vhodný pro modelování příjezdů vozidel, jejichž vstupní proudy jsou považovány za Poissonovské toky.

Otestování hypotézy exponenciálního rozdělení časových intervalů mezi příjezdy vozidel

Předtím, než byl výrobcí reportován výše uvedený problém, byl proveden pomocný statistický test, který ověřoval shodu rozdělení pravděpodobnosti dob mezi příjezdy vozidel na vybraném vstupním úseku s exponenciálním rozdělením pravděpodobnosti (χ^2 -test shody). Tímto testem lze ověřit, zda simulátor AIMSUN skutečně produkuje „exponenciální“ doby mezi příjezdy vozidel tak, jak je nastaveno ve vlastnostech experimentu, a zda nemůže být nesprávné navýšení vstupních intenzit v simulačním modelu způsobeno právě chybnou implementací generátoru pseudonáhodných čísel s exponenciálním rozdělením pravděpodobnosti.

Vstupní údaje testu představovaly doby mezi průjezdy všech typů vozidel přes detektor, který byl umístěn na jižní části komunikace Hradecká, zaústěné do průsečné světelně řízené křižovatky Hradecká – Studentská – Bělehradská. Tento test však neprokázal, že by se rozdělení pravděpodobnosti naměřených dob mezi průjezdy vozidel statisticky významně odchýlovalo od exponenciálního rozdělení pravděpodobnosti. Provedený χ^2 -test shody lze nalézt na datovém nosiči, který je přiložen k diplomové práci, konkrétně v souboru „doby_mezi_prijezdny_ng5181_rid884_v1_0_1.xls“.

Testování intenzit v experimentu s dlouhým během jediné replikace

Před reportováním problému bylo dále prověřeno, zda se problém s navýšenými vstupními intenzitami nákladních vozidel oproti poptávaným intenzitám projevuje také v experimentu s jedinou dlouhou replikací, v němž je simulován nepřetržitý 50hodinový provoz na silniční síti namísto provedení 50 samostatných replikací.

Pokud by v experimentu nebylo zjištěno podobné navýšení vstupních intenzit jako v experimentu s 50 izolovanými replikacemi (aniž by došlo k zahlcení provozu), mohli bychom usuzovat, že v případě 50 izolovaných replikací nejsou generátory pseudonáhodných čísel používané pro generování intervalů mezi příjezdy vozidel v rámci jednotlivých replikací nezávislé a jejich násady bychom mohli sami ručně nastavit tak, aby proudy čísel generované

napříč různými generátory nezávislé byly⁹. Vzájemná závislost generátorů by mohla být příčinou odchýlení vstupních intenzit v simulačním modelu od intenzit definovaných v poptávce.

Pro účely tohoto experimentu musel být simulační model modifikován. Vzhledem k tomu, že v rámci špičkové hodiny se v simulačním modelu standardně střídají tři O/D matice s rozdílnými intenzitami pro proudy chodců, bylo třeba tyto tři matice také 50x zopakovat v plánu dopravní poptávky, jehož celková doba trvání byla nastavena na 50 h. O/D matice s intenzitami osobních a nákladních automobilů jsou neměnné po celou dobu špičkové hodiny, proto mohly být snadno modifikovány vynásobením intenzit číslem 50 a interval, ve kterém jsou intenzity realizovány, byl nastaven na 50 h simulačního času. Rovněž doba platnosti signálního plánu na křižovatce Hradecká – Studentská – Bělehradská byla nastavena v globálním plánu s časovým rozvržením signálních plánů na 50 h.

Výsledné porovnání průměrných poptávaných a skutečně naměřených intenzit provozu pro vstupní a výstupní proudy jednotlivých typů entit je provedeno v tabulce 20. Průměrné hodnoty byly získány přepočítáním výsledných hodnot z dlouhého 50h běhu na 1 h. Údaje byly ve výstupní databázi zpracovány pomocí SQL dotazů *RB_DlouhyBehPrumernyPocetEntitNaVstupu* a *RB_DlouhyBehPrumernyPocetEntitNaVystupu*.

Tab 20. Porovnání poptávaných a skutečně naměřených intenzit provozu z dlouhého běhu replikace

Typ entit	Poptávaná intenzita [entit/h]	Průměrná naměřená intenzita [entit/h]	Průměrný rozdíl naměřená – poptávaná intenzita [entit/h]	Průměrné navýšení [%]
Vstupní toky				
osob. aut.	2 537	2 529,92	-7,08	-0,28
nákl. aut.	254	297,20	43,20	17,01
chodci	716	728,20	12,20	1,70
Výstupní toky				
osob. aut.	2 537	2 528,22	-8,78	-0,35
nákl. aut.	254	296,88	42,88	16,88
chodci	716	728,14	12,14	1,70

Jak je patrné z tabulky 20, k určitému snížení vygenerovaných vstupních intenzit nákladních vozidel oproti intenzitám uvedeným v tabulce 19 sice došlo, avšak toto snížení je pouze nepatrné, intenzity jsou téměř stejně velké jako v původním experimentu s více samostatnými replikacemi, proto nelze uvažovat o tom, že by nežádoucí navýšení počtu vstupů nákladních vozidel do systému ovlivňovala závislost generátorů používaných v jednotlivých replikacích.

8.8.2 Prověření vlivu simulačního kroku na intenzity v modelu

V rámci verifikace simulačního modelu bylo dále prověřováno nejvhodnější nastavení hodnoty simulačního kroku, tj. časového intervalu, ve kterém jsou pravidelně aktualizovány stavy všech elementů v systému. Jedná se o významný parametr experimentu v aplikaci AIM-SUN NG. Hodnotu simulačního kroku lze podle manuálu [1] zadávat v rozmezí $\langle 0,1; 1 \rangle$. Ve výchozím nastavení simulačního modelu jsou od hodnoty simulačního kroku odvozovány

⁹ Nastavení násad generátorů pseudonáhodných čísel s exponenciálním rozdělením pravděpodobnosti tak, aby různé generátory produkovaly vzájemně nezávislé hodnoty, je popsáno v dostupné literatuře.

reakční doby řidičů, přičemž nižší hodnoty simulačního kroku způsobují rychlejší reakce řidičů, ti jsou potom schopni udržovat v dopravním proudu menší mezery mezi vozidly, snáze se vřadí do jiného dopravního proudu atp., čímž se zvyšuje kapacitní propustnost modelu. Na základě porovnání kapacitní propustnosti simulačního modelu světelně řízené křižovatky Hradecká – Studentská – Bělehradská s kapacitami vjezdů vypočítanými analytickou metodou saturovaného toku, které bylo provedeno v kapitole 7, lze vybrat vhodnou hodnotu simulačního kroku 0,25.

V této podkapitole bude dále prověřen vliv různých hodnot simulačního kroku na vstupní a výstupní intenzity entit v simulačním modelu. Intenzity realizované v simulačním modelu by měly být nezávislé na nastavené hodnotě simulačního kroku.

Průměrné vstupní a výstupní intenzity entit naměřené v modelu při různých hodnotách simulačního kroku jsou uvedeny v tabulce 21. Celkem bylo provedeno 9 experimentů pro 9 různých hodnot simulačního kroku, v každém experimentu bylo provedeno 50 replikací simulačního výpočtu. V jednotlivých replikacích byly skutečné počty entit naměřeny pomocí detektorů umístěných na vstupních a výstupních úsecích silniční sítě.

Z tabulky je patrné, že nastavení simulačního kroku ovlivňuje skutečné vstupní a výstupní počty entit v simulačním modelu, výsledné relativní rozdíly mezi naměřenými a poptávanými vstupními intenzitami entit se při různých hodnotách simulačního kroku v případě vozidlových proudů liší i o několik jednotek procent – v případě osobních automobilů maximálně o 5,67 %, u nákladních automobilů maximálně o 10,63 %.

Trend závislosti počtu generovaných vstupních entit na hodnotě simulačního kroku není příliš patrný, nicméně u osobních automobilů a částečně i u nákladních automobilů lze vyzorovat, že nižší hodnoty simulačního kroku zapříčiňují vyšší vstupní intenzity vozidel. Zejména u nejnižších hodnot 0,1 a 0,175 dochází k výraznějšímu navýšení intenzit. Vývoj výstupních intenzit přibližně kopíruje situaci u vstupních intenzit.

Popsané kolísání vstupních a následně výstupních intenzit provozu v závislosti na různých hodnotách simulačního kroku bylo oznámeno výrobcí aplikace AIMSUN NG jako potenciální chyba v implementaci simulátoru, společně s výše uvedeným problémem generování nadměrných vstupních intenzit nákladních automobilů oproti poptávaným intenzitám.

Výrobce našel na základě obou reportovaných problémů chybu v interním algoritmu simulátoru pro generování vozidel pomocí exponenciálního rozdělení pravděpodobnosti a zaslal mi výše zmiňovaný opravný patch, který chybu odstraňuje. Po aplikování patche jsou vozidla dle výrobce generována přesněji podle poptávky a nezávisle na nastavené hodnotě simulačního kroku. Pro veřejnost bude chyba opravena v aplikaci AIMSUN NG verze 6. Intenzity uvedené v tabulce 21 byly měřeny před aplikováním opravného patche, po aplikování patche bylo provedeno celé měření znovu – výsledky nového měření jsou shrnuty v tabulce 22.

Tab 21. Průměrné vstupní a výstupní počty entit pro různé hodnoty simulačního kroku před opravou

Sim. krok	Vstupní intenzity			Výstupní intenzity		
	Ø naměř. intenzita [entit/h]	Ø rozdíl naměř. – popt. intenzita [entit/h]	Ø relat. rozdíl naměř. – popt. intenzita [%]	Ø naměř. intenzita [entit/h]	Ø rozdíl naměř. – popt. intenzita [entit/h]	Ø relat. rozdíl naměř. – popt. intenzita [%]
Osobní automobily, poptávaná intenzita: 2537 entit/h						
0,100	2712,68	175,68	6,92	2691,08	154,08	6,07
0,175	2701,48	164,48	6,48	2676,34	139,34	5,49
0,250	2670,96	133,96	5,28	2634,64	97,64	3,85
0,375	2673,56	136,56	5,38	2626,90	89,90	3,54
0,500	2655,60	118,60	4,67	2595,38	58,38	2,30
0,625	2634,40	97,40	3,84	2570,30	33,30	1,31
0,750	2656,60	119,60	4,71	2605,64	68,64	2,71
0,875	2568,60	31,60	1,25	2504,44	-32,56	-1,28
1,000	2586,38	49,38	1,95	2557,98	20,98	0,83
Nákladní automobily, poptávaná intenzita: 254 entit/h						
0,100	329,90	75,90	29,88	327,04	73,04	28,76
0,175	314,52	60,52	23,83	311,26	57,26	22,54
0,250	318,20	64,20	25,28	313,76	59,76	23,53
0,375	316,80	62,80	24,72	309,26	55,26	21,76
0,500	314,80	60,80	23,94	307,36	53,36	21,01
0,625	308,26	54,26	21,36	300,20	46,20	18,19
0,750	313,90	59,90	23,58	307,98	53,98	21,25
0,875	302,90	48,90	19,25	295,00	41,00	16,14
1,000	305,56	51,56	20,30	299,94	45,94	18,09
Chodci, poptávaná intenzita: 716 entit/h						
0,100	718,74	2,74	0,38	718,34	2,34	0,33
0,175	723,96	7,96	1,11	723,72	7,72	1,08
0,250	720,92	4,92	0,69	719,24	3,24	0,45
0,375	718,84	2,84	0,40	716,38	0,38	0,05
0,500	720,90	4,90	0,68	718,98	2,98	0,42
0,625	719,60	3,60	0,50	718,86	2,86	0,40
0,750	720,86	4,86	0,68	720,72	4,72	0,66
0,875	719,36	3,36	0,47	719,10	3,10	0,43
1,000	720,98	4,98	0,70	720,04	4,04	0,56

Tab 22. Průměrné vstupní a výstupní počty entit pro různé hodnoty simulačního kroku po opravě

Sim. krok	Vstupní intenzity			Výstupní intenzity		
	Ø naměř. intenzita [entit/h]	Ø rozdíl naměř. – popt. intenzita [entit/h]	Ø relat. rozdíl naměř. – popt. intenzita [%]	Ø naměř. intenzita [entit/h]	Ø rozdíl naměř. – popt. intenzita [entit/h]	Ø relat. rozdíl naměř. – popt. intenzita [%]
Osobní automobily, poptávaná intenzita: 2537 entit/h						
0,100	2591,40	54,40	2,14	2592,42	55,42	2,18
0,175	2604,62	67,62	2,67	2608,82	71,82	2,83
0,250	2586,86	49,86	1,97	2588,10	51,10	2,01
0,375	2588,86	51,86	2,04	2589,88	52,88	2,08
0,500	2592,76	55,76	2,20	2593,04	56,04	2,21
0,625	2588,76	51,76	2,04	2582,88	45,88	1,81
0,750	2592,98	55,98	2,21	2584,22	47,22	1,86
0,875	2588,30	51,30	2,02	2567,18	30,18	1,19
1,000	2581,10	44,10	1,74	2553,60	16,60	0,65
Nákladní automobily, poptávaná intenzita: 254 entit/h						
0,100	279,82	25,82	10,17	280,16	26,16	10,30
0,175	282,22	28,22	11,11	282,34	28,34	11,16
0,250	273,22	19,22	7,57	273,32	19,32	7,61
0,375	273,44	19,44	7,65	273,04	19,04	7,50
0,500	275,70	21,70	8,54	276,32	22,32	8,79
0,625	277,00	23,00	9,06	276,96	22,96	9,04
0,750	275,26	21,26	8,37	273,34	19,34	7,61
0,875	278,32	24,32	9,57	276,12	22,12	8,71
1,000	276,46	22,46	8,84	272,74	18,74	7,38
Chodci, poptávaná intenzita: 716 entit/h						
0,100	721,62	5,62	0,78	720,66	4,66	0,65
0,175	721,26	5,26	0,73	720,94	4,94	0,69
0,250	719,02	3,02	0,42	718,34	2,34	0,33
0,375	720,22	4,22	0,59	719,56	3,56	0,50
0,500	721,06	5,06	0,71	720,38	4,38	0,61
0,625	720,48	4,48	0,63	719,32	3,32	0,46
0,750	720,54	4,54	0,63	719,66	3,66	0,51
0,875	720,18	4,18	0,58	718,88	2,88	0,40
1,000	721,48	5,48	0,77	720,32	4,32	0,60

I po opravě reportovaných problémů lze vyzorovat určitý nepatrný vliv simulačního kroku na různé vstupní (a potažmo i výstupní) počty entit v simulačním modelu, tento vliv však byl oproti předchozí situaci před opravou problému podstatně zredukován – naměřené procentuální rozdíly mezi skutečně realizovanými a poptávanými intenzitami se v závislosti na nastavené hodnotě simulačního kroku odlišují maximálně o 2 % u všech typů entit, kromě nákladních vozidel.

U nákladních vozidel jsou pro hodnoty simulačního kroku menší než 0,25 více navýšeny skutečné vstupní a výstupní intenzity. Nutno podotknout, že skutečně realizované intenzity provozu jsou oproti poptávaným intenzitám u všech entit vždy mírně navýšeny, bez ohledu na hodnotu simulačního kroku. Nejvíce se tato skutečnost projevuje u nákladních vozidel. To může být způsobeno tím, že nákladní vozidla dosahují ve zkoumaném modelu nejslabších intenzit, a proto se zde nejvíce projevil vliv zaokrouhlovací chyby v metodě použité pro generování vozidel.

Na základě výše uvedených skutečností doporučuji v simulačních modelech používat hodnotu simulačního kroku z intervalu $\langle 0,25; 1 \rangle$. Velmi nízké hodnoty simulačního kroku (např. méně než 0,2) navyšují znatelně výpočetní náročnost simulace. Konkrétní hodnotu simulačního kroku je vhodné zvolit například na základě experimentu, ve kterém je porovnána analyticky zjištěná kapacita určitých úseků/vjezdů křižovatky s kapacitní propustností vykazovanou v modelu. Ta hodnota simulačního kroku, pro niž jsou rozdíly porovnávaných kapacit nejmenší, je vhodným kandidátem pro parametrizaci simulačního modelu. Pro simulační model Studentské ulice byla vybrána hodnota simulačního kroku 0,25.

8.8.3 Problémy zjištěné verifikačními SQL dotazy a sledováním animace simulačního výpočtu

Porovnáváním skutečně realizovaných a poptávaných intenzit provozu pomocí SQL dotazů, které zpracovávají naměřené a poptávané počty vozidel na jednotlivých detektorech, lze identifikovat replikace, které nepropustily poptávané intenzity vozidel a chodců. Pokud není příčinou malé propustnosti modelu korektní modelování zahlučeného provozu, je možné, že v těchto replikacích došlo k problémům, které vedou k zablokování dopravních proudů a znemožňují realistické modelování pohybu entit dopravní sítě.

Následným pozorováním 2D nebo 3D animace běhu vytipovaných replikací lze příslušné problémy lokalizovat a pokusit se o jejich nápravu. Také v simulačním modelu Studentské ulice se světelně řízenou křižovatkou Hradecká – Studentská – Bělehradská a okružní křižovatkou Kunětická – Studentská – K Cihelně – Ke Koupališti byly tímto způsobem zjištěny některé problémy obecnějšího charakteru, které budou popsány v následujících odstavcích.

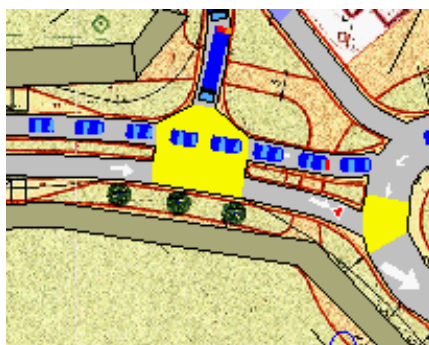
Všechny křižovatky v simulačním modelu (kromě dílčích křižovatek na výjezdech z kruhového objezdu) je nutné označit příznakem „Yellow Box“, který zabraňuje vozidlům, aby najela do prostoru křižovatky, pokud nemají zaručen průjezd celou křižovatkou (z důvodu obsazenosti navazujícího úseku). Toto chování je v praxi vyžadováno pravidly silničního provozu. Pokud není označení provedeno, snadno může dojít k zablokování prostoru křižovatky a následně k postupnému zablokování provozu na celé lokální síti, které znemožňuje získat relevantní výsledky simulačního experimentu. Mohou se vyskytnout například situace analogické k vzájemnému zablokování vozidel, které je zachyceno na obrázku 21.



Obr 21. Nevhodné najetí vozidla do prostoru křižovatky neoznačené příznakem „Yellow Box“

U vybraných úseků (hlavních) komunikací, které ústí do křižovatky, můžeme nastavit jejich parametr „Yellow Box Speed“ na 0 km/h, a lokálně tak zrušit funkci příznaku „Yellow Box“ pro vozidla najíždějící do křižovatky z tohoto úseku – vozidla budou vjíždět do prostoru křižovatky i bez zaručeného průjezdu. Tímto můžeme dosáhnout reálnějšího chování vozidel na některých křižovatkách s málo významnými vedlejšími směry. Toto nastavení však doporučuji používat velmi obezřetně. Vždy je třeba zvážit, zda nemůže v modelu dojít k vzájemnému zablokování vozidel z důvodu nevhodného najetí vozidla do křižovatky, které může například omezit vozidla v protisměru.

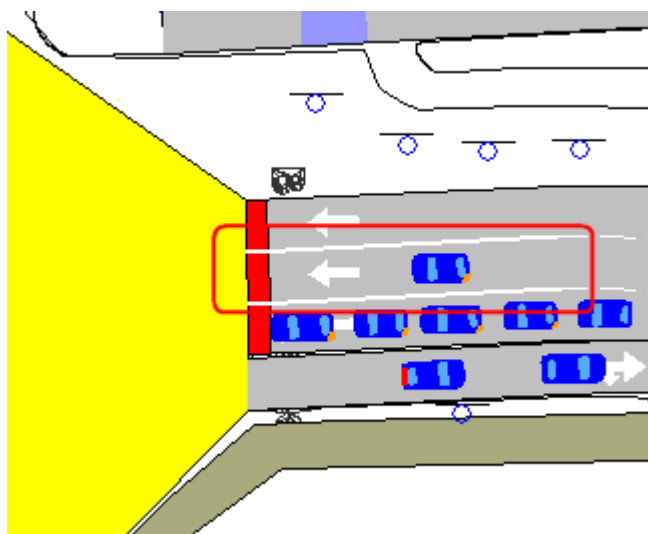
Obrázek 22 ukazuje situaci, ve které je zrušení příznaku „Yellow Box“ výhodné – vozidla opouštějící okružní křižovatku jedou po hlavní silnici a je žádoucí, aby mohla zastavit i v rámci malé žlutě vyznačené křižovatky a neblokovala zbytečně prostor u výjezdu z okružní křižovatky a potažmo provoz na celém okruhu. Vozidla v tomto směru navíc nemohou přicházet do kontaktu s vozidly v protisměru.



Obr 22. Vhodné lokální zrušení příznaku „Yellow Box“ na výjezdu z větší křižovatky

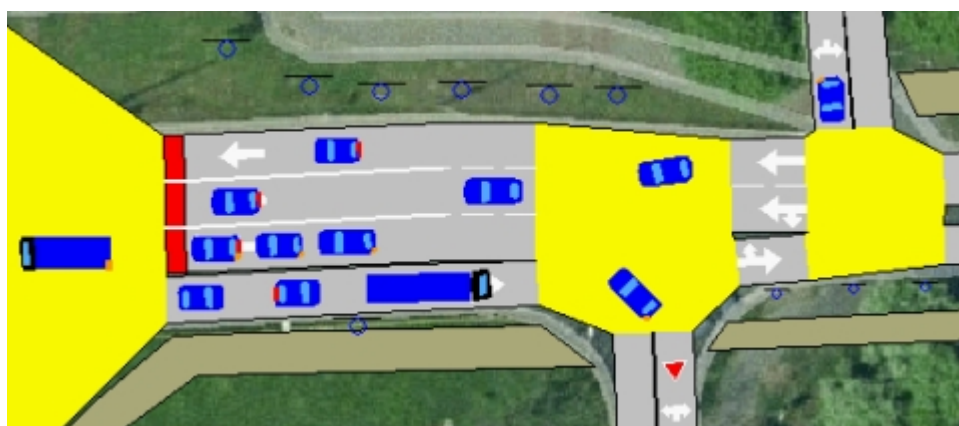
Další problém úzce souvisí s vyznačením plných dělicích čar na řadicích pružích světelně řízené křižovatky. Během simulace bez korektně vyznačených dělicích čar se stávalo, že vozidla chaoticky a na velmi malém prostoru měnila svoje zařazení do jízdních pruhů na vjezdu do křižovatky (a to i těsně před stopčárou). Občas vozidla zastavila tak, že zhruba jejich polovina přesahovala stopčáru, a do křižovatky poté vjela na červený signál. Těmto problémům zabránilo korektní vyznačení plných dělicích čar o dostatečné délce mezi řadicími pruhy

na vjezdu do křižovatky (viz. obrázek 23). Vozidla se poté s dostatečným časovým předstihem (je třeba vhodně zadat parametry „Distance Zone 1“ a „Distance Zone 2“ na úsecích ústících do křižovatky) zařazují do příslušného řadícího pruhu a správně zastavují před stopčárou. Tento „problém“ se vyskytoval ve všech verzích aplikace AIMSUN NG, s kterými jsem pracoval (5.1.7 a 5.1.8).



Obr 23. Vyznačení plných dělicích čar na vjezdu do křižovatky

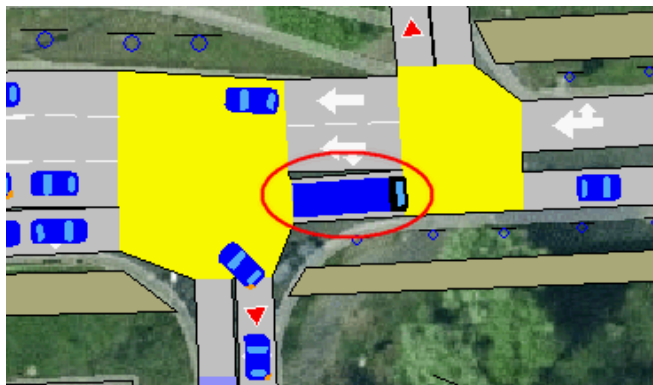
Následující problém souvisí s krátkou délkou úseku mezi dvěma křižovatkami. V simulačním modelu se vyskytla následující situace: Dlouhé nákladní vozidlo bezdůvodně zastavilo před křižovatkou a setrvalo dlouhou dobu na místě, než projelo přímým směrem následující dvojicí křižovatek, což způsobilo nahromadění vozidel na západní světelně řízené křižovatce a posléze zahlcení celého systému. Situace se nejprve vyskytla v případě, kdy nákladní vozidlo bylo ovlivňováno odbočujícím vozidlem z vedlejší komunikace (viz. obrázek 24), později se však identická situace objevila i v případě, kdy nákladní vozidlo nebylo ovlivňováno jinými vozidly.



Obr 24. Dlouhodobé zastavení nákladního vozidla před dvojicí křižovatek

Problém byl odstraněn prodloužením krátkého úseku mezi dvěma průsečnými křižovatkami tvaru T tak, aby se na něj vešlo celé nákladní vozidlo a mohlo na něm zastavit, jak

ukazuje obrázek 25. Nákladní vozidlo muselo před prodloužením úseku projet najednou oběma křižovatkami – na žlutě vyznačeném vnitřním prostoru křižovatek s příznakem „Yellow Box“ by nemělo zastavovat a mezilehlý úsek byl příliš krátký, což vedlo k chybnému rozhodování, zda může nákladní vozidlo projet první křižovatkou. Problém se vyskytuje ve verzi AIMSUN NG 5.1.7, ve verzi 5.1.8 zatím nebyl pozorován.



Obr 25. Prodloužení úseku mezi blízkými křižovatkami

Dalším nepříjemným problémem, na který jsem při verifikaci simulačního modelu narazil, je zablokování okružní křižovatky v hustém provozu (tzv. deadlock). V tomto případě vjíždělo na kruhový objezd takové množství vozidel, až byl celý okruh zaplněn a vozidla se z důvodu vzájemného zablokování, z kterého nelze vyváznout bez současné koordinace jízdy všech vozidel, přestala pohybovat. Nemohla se dostat k výjezdu a trvale zablokovala provoz na velké části dopravní sítě, jak ukazuje obrázek 26.



Obr 26. Vzájemné zablokování vozidel na okružní křižovatce

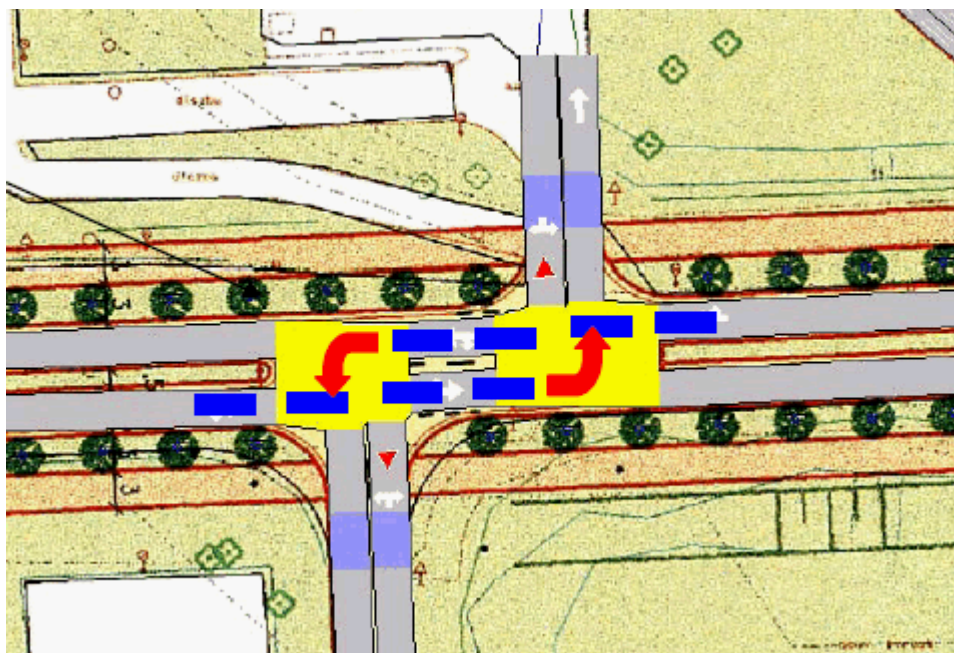
Tato situace by v praxi nenastala, protože řidiči by zřejmě na okružní křižovatce dodržovali větší vzdálenosti mezi vozidly a nezařazovali se těsně před jiná pomalu jedoucí vozidla. Problém lze podstatně omezit vhodným způsobem modelování okružních křižovatek, který je popsán v podkapitole 6.2.1 – zmíněné postupy vychází z mých vlastních zkušeností

s modelováním dopravní infrastruktury v aplikaci AIMSUN NG a z doporučení od výrobce aplikace, jemuž jsem problém reportoval.

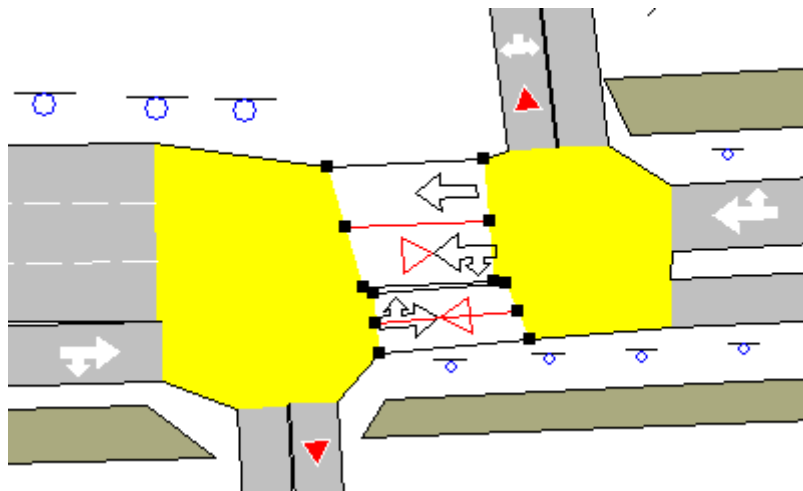
Je ovšem třeba poznamenat, že ani po provedení popisovaných opatření nelze výskyt deadlocku zcela vyloučit a v ojedinělých případech, kdy jsou do okružní křižovatky vpouštěny velmi vysoké intenzity vozidel, se může problém znovu objevit.

Při verifikaci simulačního modelu byl dále zjištěn problém se vzájemným zablokováním vlevo odbočujících vozidel jedoucích v protisměrných jízdních pruzích, který již byl popsán v diplomové práci Ing. Davida Svozila [24] (viz. obrázek 27). Problém se vyskytuje na krátkých protisměrných úsecích, které jsou umístěny mezi blízkými křižovatkami. Při zablokování se přitom nemusí jednat o celé proudy vozidel – pokud mají mezilehlé protisměrné úseky délku akorát takovou, aby na každém z nich mohlo zastavit jedno nákladní vozidlo, může dojít k zablokování pouze této dvojice vozidel, která chtějí současně odbočit doleva a přitom si vzájemně vadí svou zadní částí. Simulátor bohužel nedisponuje dostatečnou mírou inteligence, aby podobnou situaci identifikoval a následně vyřešil. Problém vede k postupnému zahlcení okolní silniční sítě.

Výskyt problému lze významně omezit použitím příznaku „Yellow Box“ na obou křižovatkách a předsazením konců mezilehlých úseků pro odbočení vlevo více do prostoru křižovatky, jak ukazuje obrázek 28. Toto opatření bohužel nevede k úplnému vyloučení problému, je možné, že přibližně ve 2 % replikací se problém znovu objeví. U těchto replikací je možné k odstranění problému použít poněkud účelové opatření – pozměnit nasadu generátorů pseudonáhodných čísel pro tyto replikace. Vzhledem k nízké četnosti výskytu problému lze předpokládat, že vliv tohoto opatření na výsledky realizovaných simulačních experimentů bude zcela zanedbatelný.



Obr 27. Vzájemné zablokování vlevo odbočujících vozidel (zdroj: [24])



Obr 28. Řešení vzájemného zablokování vlevo odbočujících vozidel

Videozáznamy problémů, které byly zjištěny pozorováním animace simulačního výpočtu, jsou k dispozici na datovém nosiči, který je přiložen k této práci.

8.9 Validace simulačního modelu

Úkolem validace simulačního modelu je prověřit, zda zkonstruovaný, funkčně verifikovaný simulační model dostatečně přesně odráží chování (reálného/projektovaného) objektu zkoumání.

V případě této simulační studie modelovaný systém v realitě neexistuje (intenzity provozu jsou prognózovány pro rok 2020), nelze zjistit jeho výstupní dopravně-inženýrské charakteristiky, proto nebylo možné provést ani podrobnější validaci simulačního modelu porovnáním charakteristik modelovaného systému s výstupy simulačního modelu.

Matematický model celého simulovaného systému by byl jen stěží realizovatelný a jeho realizace při stávající složitosti silniční sítě a plánu světelné signalizace rovněž neefektivní. Nelze tedy využít ani porovnání výstupů simulačního modelu s výstupy vypočítanými na základě zkonstruovaného matematického modelu.

Za částečné zhodnocení validity výsledků produkovaných simulátorem AIMSUN lze považovat porovnání kapacit vjezdů křižovatky Hradecká – Studentská – Bělehradská vypočítaných analytickou metodou saturovaného toku s kapacitní propustností simulačního modelu této křižovatky. Porovnání bylo provedeno v kapitole 7 a prokázalo poměrně dobrou shodu výsledků. Prověřená křižovatka byla importována spolu s nastavením parametrů křižovatky a okolních úseků a s parametrem simulačního kroku do výsledného simulačního modelu Studentské ulice.

Kredibilitu simulačního modelu vytvořeného v rámci této simulační studie lze založit především na dlouhodobém sledování animace simulačních výpočtů, které po odstranění problémů nalezených v rámci verifikace potvrzovalo správné chování simulačního modelu, a na podrobně provedené verifikaci modelu.

8.10 Plán simulačních experimentů

Cílem této simulační studie je prověření kapacitní propustnosti varianty dopravního řešení Studentské ulice, která zahrnuje:

- Studentskou ulici zaústěnou na západní straně do průsečné světelně řízené křižovatky Hradecká – Studentská – Bělehradská (HSB) a na východní straně do okružní křižovatky Kunětická – Studentská – K Cihelně – Ke Koupališti,
- dva přechody pro chodce přes Studentskou ulici – přechod *CHI* před budovou Dopravní fakulty Jana Pernera a přechod *CH2* před budovou Fakulty ekonomicko-správní Univerzity Pardubice,
- zpomalovací bariéry umístěné před oběma zmíněnými přechody pro chodce.

Bude tedy proveden jediný simulační experiment s výše uvedenou konfigurací, která odpovídá experimentu číslo 1, jenž byl realizován v simulační studii Ing. Davida Svozila [24], až na to, že experiment provedený v této práci bude namísto dvoupruhové okružní křižovatky HSB uvažovat průsečnou světelně řízenou křižovatkou. Studie Ing. Svozila vyhodnocovala celkem čtyři experimenty, které se lišily vybudováním, resp. nevybudováním podchodu pod Studentskou ulicí, který by nahradil přechod pro chodce *CHI*, a instalováním, resp. neinstalováním zpomalovacích bariér před přechody pro chodce. Zpomalovací bariéry před přechody pro chodce jsou v experimentu modelovány snížením maximálních povolených rychlostí na odpovídajících úsecích silniční sítě dle tabulky 18.

Před provedením simulačního experimentu je dále třeba určit, jaké výstupní dopravně-inženýrské ukazatele budou sledovány, aby byly zodpovězeny otázky položené při stanovování cílů simulační studie. Zvoleny byly tyto ukazatele podporované simulačním prostředím AIMSUN NG:

- Průměrná intenzita provozu [vozidel/h],
- průměrná hustota provozu [vozidel/km],
- průměrná rychlost [km/h],
- průměrný čas zdržení vozidla (oproti ideálnímu průjezdu) [s/km],
- průměrný čas stání vozidla [s/km],
- průměrný počet zastavení vozidla [počet/km],
- součet cestovních časů všech vozidel v dopravní síti [h].

8.11 Provedení experimentů a analýza výstupních údajů

Strategie spouštění simulačních výpočtů použitá v rámci této simulační studie je založena na opakovaném provedení více nezávislých replikací (běhů) simulačního výpočtu, které se odlišují pouze nasadami generátorů pseudonáhodných čísel.

Alternativně by mohl být použit i druhý typ strategie, který představuje realizaci simulačního výpočtu po nepřetržitý časový interval několika špičkových hodin simulačního času, které v simulaci bezprostředně navazují bez „vyprazdňování“ simulačního modelu mezi jednotlivými špičkovými hodinami. Tento typ strategie lze použít, pokud není nutné speciálně

ošetřovat náběhy simulujícího systému na počátcích jednotlivých špičkových hodin z důvodu zabezpečení kvalitních výsledků sledovaných charakteristik. [16]

V této simulační studii by mohla být použita i druhá strategie, neboť dopravní poptávka definovaná pomocí O/D matic je na počátku špičkové hodiny stejná jako na konci této hodiny, byla však zvolena první strategie s více nezávislými replikacemi, protože ji simulační prostředí AIMSUN NG nativně podporuje při vyhodnocování výstupních údajů.

8.11.1 Délka běhu jedné replikace simulačního výpočtu

Podle zadání simulační studie má být provoz na silniční síti sledován ve špičkové hodině 15:30 – 16:30. Doba běhu jedné replikace experimentu byla tedy stanovena na 60 minut simulačního času.

8.11.2 Doba náběhu simulátoru

V případě simulační studie, která je prezentována v této práci, je nutné aplikovat na začátku každé replikace náběh simulátoru, protože po spuštění simulačního výpočtu je silniční síť modelu prázdná – neobsahuje žádné chodce ani dopravní prostředky.

Doba náběhu byla určena dříve, než byl stanoven vhodný počet replikací simulačního výpočtu, neboť již při určování počtu replikací je potřeba aplikovat odpovídající náběh simulátoru. Pro stanovení doby náběhu byly použity průměrné hodnoty z 60 replikací. Tento počet replikací lze považovat za horní odhad potřebného počtu replikací. Pokud by dále v procesu stanovení počtu replikací bylo zjištěno, že je potřeba provést pro dosažení dostatečné přesnosti výsledků simulace více než 60 replikací (i když je to málo pravděpodobné), bylo by třeba dobu náběhu stanovit znovu na základě většího počtu replikací.

Vhodnou dobu provádění náběhu simulace lze určit na základě sledování hustoty provozu v simulované silniční síti, neboť právě hustota indikuje dostatečné počáteční zaplnění úseků sítě v modelu. Po spuštění simulačního výpočtu je hustota provozu zpočátku nulová, poté narůstá, až se ustálí na určité hladině, která je dána neměnnou dopravní poptávkou zadanou pomocí O/D matic. Simulační čas, ve kterém nastane ustálení hustoty provozu, určuje minimální potřebnou dobu náběhu. Doplnkově lze sledovat také vývoj dalších klíčových ukazatelů, které budou vyhodnocovány při experimentování se simulačním modelem – například průměrnou rychlost vozidel.

Vývoj průměrné hustoty provozu a dalších ukazatelů v simulačním modelu je však poměrně výrazně ovlivňován cyklem stanoveným v pevném plánu světelné signalizace na křižovatce Hradecká – Studentská – Bělehradská, proto lze ve vývoji průměrné hustoty či jiných charakteristik očekávat rovněž kolísání s cyklickým charakterem. Ustálení průměrných hodnot není tak zřetelné jako v simulačním modelu bez světelně řízené křižovatky.

Z tohoto důvodu je vhodnější sledovat kumulativní průměrné hodnoty ukazatelů a stanovit dobu náběhu jako dobu, od které můžeme považovat časový vývoj kumulativního průměru u všech posuzovaných ukazatelů za ustálený. Toto představuje poměrně silnou podmínku na ustálení sledovaných ukazatelů, díky které získáme dosti dlouhou dobu náběhu, která bezpečně odstraní nežádoucí počáteční podmínky v modelu.

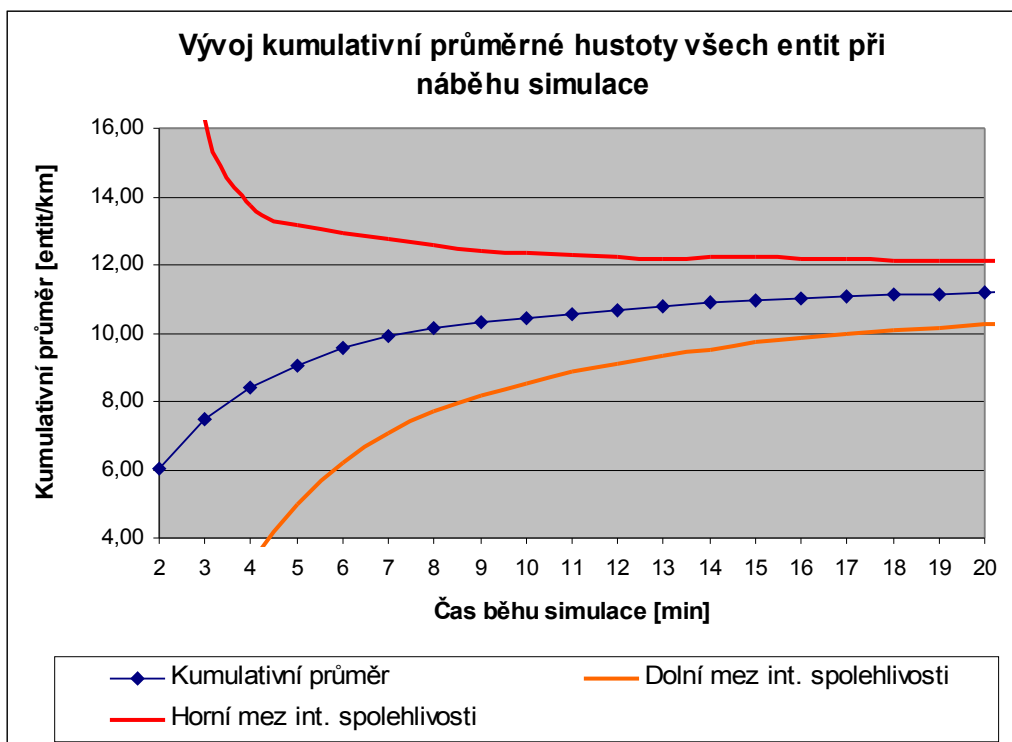
Je třeba si rovněž uvědomit, že dobu náběhu je nutné stanovit v časovém intervalu s neměnnou dopravní poptávkou, tj. v intervalu od 15:30 do 15:50. Od 15:50 je pro proudy

chodců použita jiná O/D matice s navýšenými intenzitami, což se v modelu projeví například dalším nárůstem průměrné hustoty chodců i vozidel. Doba náběhu simulace může být tedy maximálně 20 minut.

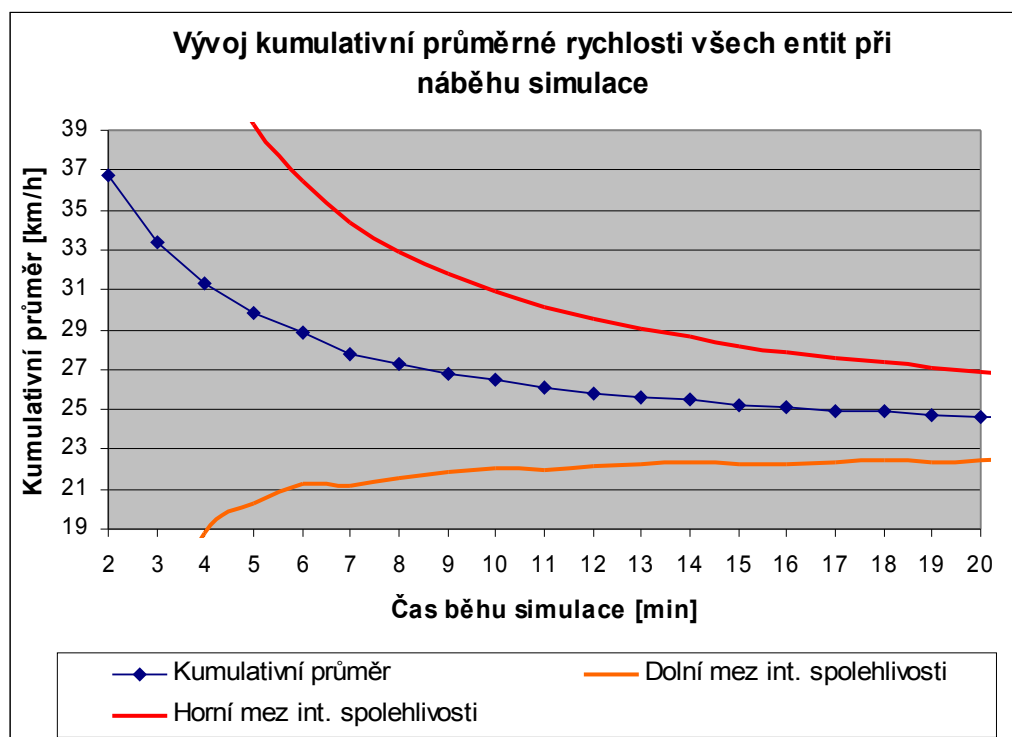
Na základě vývoje kumulativní průměrné hustoty provozu všech entit při náběhu simulace (viz. tabulka 23 a obrázek 29) je možné uvažovat o 15minutové době náběhu. Tuto dobu potvrzuje také vývoj kumulativní průměrné rychlosti všech entit znázorněný na obrázku 30. Po přičtení určité rezervy byla **doba náběhu stanovena na 20 minut**.

Tab 23. Vývoj kumulativní průměrné hustoty všech entit při náběhu simulace

Počet minut od začátku simulace [min]	Průměrná hustota za danou minutu [entit/km]	Kumulativní průměrná hustota x [entit/km]	Pološířka Δ 95% int. spoleh. pro x [entit/km]	Dolní mez $x - \Delta$ [entit/km]	Horní mez $x + \Delta$ [entit/km]
1	3,56	—	—	—	—
2	8,52	6,04	31,51	-25,47	37,55
3	10,42	7,50	8,80	-1,30	16,30
4	11,01	8,38	5,38	2,99	13,76
5	11,76	9,05	4,09	4,96	13,15
6	12,16	9,57	3,37	6,20	12,94
7	12,04	9,92	2,84	7,08	12,77
8	11,57	10,13	2,43	7,70	12,56
9	11,60	10,29	2,12	8,17	12,42
10	11,75	10,44	1,89	8,55	12,33
11	11,77	10,56	1,71	8,85	12,27
12	11,78	10,66	1,56	9,11	12,22
13	12,00	10,76	1,43	9,33	12,20
14	12,26	10,87	1,34	9,53	12,21
15	12,22	10,96	1,25	9,71	12,21
16	11,87	11,02	1,17	9,85	12,19
17	11,73	11,06	1,10	9,96	12,16
18	11,86	11,10	1,03	10,07	12,14
19	11,95	11,15	0,98	10,17	12,13
20	11,55	11,17	0,92	10,25	12,09



Obr 29. Vývoj kumulativní průměrné hustoty entit při náběhu simulace



Obr 30. Vývoj kumulativní průměrné rychlosti entit při náběhu simulace

8.11.3 Počet replikací simulačního výpočtu

Minimální počet replikací, které je nutné v rámci simulačního experimentu provést, závisí na požadované přesnosti výstupních charakteristik, jak je popsáno v podkapitole 3.4.4. Vzhledem k tomu, že je v této studii sledováno velké množství dopravně-inženýrských ukazatelů, bude potřebný počet replikací stanoven na základě přesnosti vybraných charakteristik, které jsou klíčové pro vyslovení závěrů simulační studie (podobně jako v [24]). Přesnost naměřená při stanoveném počtu replikací u dalších charakteristik bude prezentována v rámci závěrečného vyhodnocení všech výsledných ukazatelů, a to pomocí pološířky 95% intervalu spolehlivosti pro odhad střední hodnoty.

Klíčové charakteristiky byly vybrány tak, aby umožnily kapacitně-provozní prověření provozu na Studentské ulici a umožnily zodpovědět následující otázky:

- Bude docházet k zahlcování silničního provozu na některých ze sledovaných úseků silniční sítě?
- Jak lze charakterizovat plynulost silničního provozu na Studentské ulici během špičkové hodiny?

Tab 24. Klíčové ukazatele vybrané pro stanovení počtu replikací

Klíčová charakteristika	Stanovená přesnost
Průměrná rychlost entit na ulici Studentská ve směru „Hradecká → U Josefa“	1 km/h
Průměrná rychlost entit na ulici Studentská ve směru „U Josefa → Hradecká“	1 km/h
Průměrný čas zpoždění entity (oproti ideál. průjezdu sítí) (Delay Time)	2 s/km

Tabulka 24 uvádí sledované klíčové charakteristiky s požadovanou mírou přesnosti. Počet replikací simulačního výpočtu byl stanoven při 5% hladině významnosti ($\alpha = 0,05$) na základě výpočtu kumulativních průměrů a jejich intervalů spolehlivosti (podrobný postup je popsán v podkapitole 3.4.4). Prvotní maximalistický odhad počtu replikací byl stanoven na hodnotu 60. Průměrné údaje jednotlivých replikací byly získány z příslušných databázových tabulek výstupní databáze „Output.mdb“, do které byla ve statistických intervalech simulačního výpočtu pravidelně exportována výstupní data.

Kumulativní průměry a jejich intervaly spolehlivosti byly vypočítány pomocí programu SimStat, který jsem pro účely usnadnění výstupní statistické analýzy simulačních experimentů implementoval v programovacím jazyce C# [22]. Program umožňuje vypočítat pro vstupní řadu reálných čísel průměr, směrodatnou odchylku a interval spolehlivosti pro odhad střední hodnoty normálního rozdělení pravděpodobnosti při dané hladině významnosti a umožňuje exportovat řadu kumulativních průměrů s intervaly spolehlivosti pro tyto průměry.

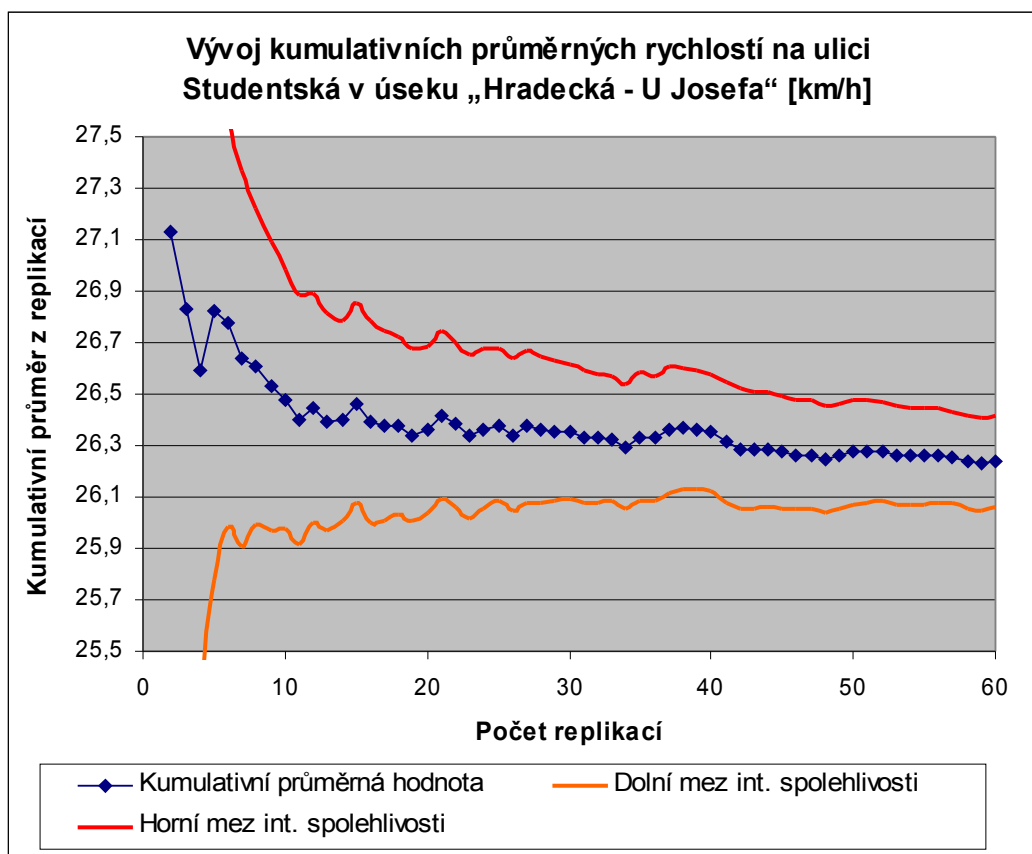
Stanovení počtu replikací dokumentují tabulky 25, 26 a 27 a odpovídající grafy na obrázcích 31, 32 a 33. Červeně zobrazené hodnoty pološířek intervalů spolehlivosti v tabulkách indikují, že při daném počtu replikací ještě nebylo dosaženo požadované přesnosti. V tabulkách nejsou pro přehlednost uváděny všechny provedené replikace. Replikace, u nichž vždy bylo dosaženo požadované přesnosti, jsou vynechány a připojena je až poslední replikace, u které je uveden (kumulativní) průměr ze všech 60 replikací s příslušným intervalem spolehlivosti.

Z provedené analýzy plyne, že pro zabezpečení požadované přesnosti výsledků je potřeba provést minimálně 41 replikací, pro zajištění určité rezervy přesnosti výsledků **bude provedeno 50 replikací simulačního výpočtu.**

Tab 25. Průměrná rychlost na ulici Studentská v úseku „Hradecká – U Josefa“

Požadovaná přesnost: 1 km/h

Rychlosti v replikacích [km/h]			95% interval spol. kumulat. průměru		
Rep.	Ø rychlost	Kumul. Ø rychlost	Pološířka Δ	Dolní mez	Horní mez
1	27,68	–	–	–	–
2	26,58	27,13	6,99	20,14	34,12
3	26,24	26,83	1,87	24,96	28,70
4	25,88	26,60	1,24	25,36	27,83
5	27,73	26,82	1,05	25,77	27,87
6	26,57	26,78	0,80	25,98	27,58
7	25,79	26,64	0,73	25,91	27,37
8	26,41	26,61	0,61	26,00	27,22
9	25,88	26,53	0,56	25,97	27,09
10	26,03	26,48	0,50	25,97	26,98
...
60	26,75	26,24	0,18	26,06	26,41

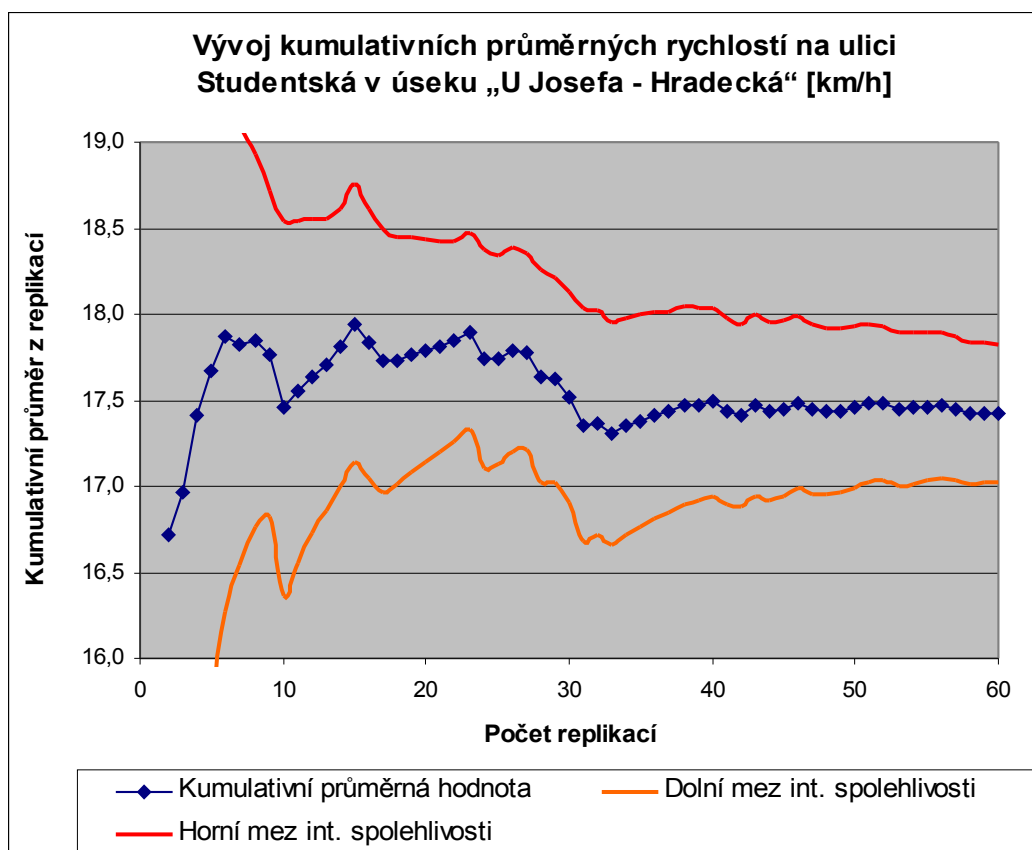


Obr 31. Vývoj kumulat. prům. rychlostí na ulici Studentská v úseku „Hradecká – U Josefa“

Tab 26. Průměrná rychlost na ulici Studentská v úseku „U Josefa – Hradecká“

Požadovaná přesnost: 1 km/h

Rychlosti v replikacích [km/h]			95% interval spol. kumulat. průměru		
Rep.	Ø rychlost	Kumul. Ø	Pološířka Δ	Dolní mez	Horní mez
1	18,50	—	—	—	—
2	14,93	16,72	22,68	-5,97	39,40
3	17,46	16,96	4,56	12,40	21,52
4	18,78	17,42	2,79	14,63	20,21
5	18,71	17,68	2,02	15,66	19,69
6	18,81	17,87	1,60	16,26	19,47
7	17,61	17,83	1,29	16,54	19,12
8	17,98	17,85	1,08	16,77	18,93
9	17,12	17,77	0,95	16,82	18,71
10	14,66	17,46	1,09	16,37	18,55
11	18,47	17,55	0,99	16,56	18,54
12	18,66	17,64	0,92	16,72	18,56
13	18,53	17,71	0,85	16,86	18,56
14	19,08	17,81	0,81	17,00	18,61
15	19,88	17,95	0,80	17,14	18,75
...
60	17,38	17,43	0,40	17,03	17,82

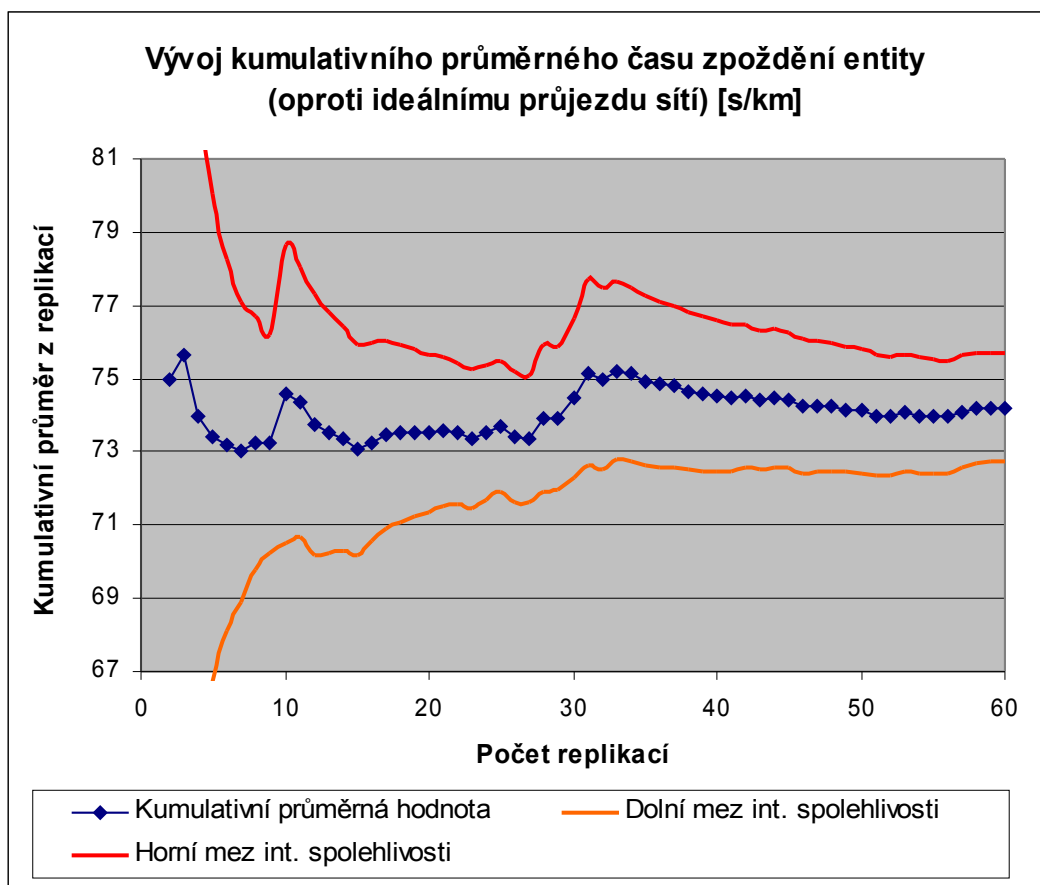


Obr 32. Vývoj kumulat. prům. rychlostí na ulici Studentská v úseku „U Josefa – Hradecká“

Tab 27. Průměrný čas zpoždění entity (oproti ideálnímu průjezdu sítí)

Požadovaná přesnost: 2 s/km

Čas zpoždění v replikacích [s/km]			95% interval spol. kumulat. průměru		
Rep.	Ø čas	Kumul. Ø	Pološírka Δ	Dolní mez	Horní mez
1	69	—	—	—	—
2	81	75,00	76,24	-1,24	151,24
3	77	75,67	15,18	60,49	90,85
4	69	74,00	9,55	64,45	83,55
5	71	73,40	6,66	66,74	80,06
6	72	73,17	5,07	68,09	78,24
7	72	73,00	4,10	68,90	77,10
8	75	73,25	3,48	69,77	76,73
9	73	73,22	3,00	70,23	76,22
10	87	74,60	4,08	70,52	78,68
11	72	74,36	3,67	70,69	78,03
12	67	73,75	3,57	70,18	77,32
13	71	73,54	3,29	70,25	76,83
14	71	73,36	3,04	70,31	76,40
15	69	73,07	2,88	70,19	75,95
16	76	73,25	2,71	70,54	75,96
17	77	73,47	2,57	70,90	76,04
18	74	73,50	2,41	71,09	75,91
19	74	73,53	2,27	71,25	75,80
20	73	73,50	2,15	71,35	75,65
21	75	73,57	2,04	71,53	75,62
22	72	73,50	1,95	71,55	75,45
23	70	73,35	1,88	71,46	75,23
24	78	73,54	1,84	71,70	75,38
25	77	73,68	1,79	71,89	75,47
26	67	73,42	1,79	71,63	75,22
27	72	73,37	1,72	71,65	75,10
28	89	73,93	2,02	71,91	75,94
29	74	73,93	1,94	71,99	75,87
30	90	74,47	2,17	72,30	76,64
31	96	75,16	2,53	72,63	77,69
32	70	75,00	2,47	72,53	77,47
33	82	75,21	2,43	72,78	77,64
34	72	75,12	2,36	72,76	77,48
35	69	74,94	2,32	72,63	77,26
36	72	74,86	2,26	72,60	77,12
37	72	74,78	2,20	72,59	76,98
38	70	74,66	2,15	72,51	76,81
39	72	74,59	2,10	72,49	76,69
40	72	74,53	2,05	72,48	76,57
41	73	74,49	2,00	72,49	76,49
42	77	74,55	1,95	72,60	76,50
43	69	74,42	1,92	72,50	76,34
44	77	74,48	1,88	72,60	76,36
45	72	74,42	1,84	72,58	76,26
...
60	74	74,22	1,46	72,76	75,68



Obr 33. Vývoj kumulativního průměrného času zpoždění entity

8.11.4 Provedení simulačního experimentu

Pro experiment s dvěma přechody pro chodce a dvěma bariérami před těmito přechody bylo provedeno stanovených 50 replikací simulačního výpočtu v dávkovém režimu. Pro orientaci lze uvést, že provedení těchto replikací trvalo včetně vypočítání průměrných údajů zhruba 20 minut při následující konfiguraci hardwaru a softwaru: Notebook HP nx6125 s procesorem Mobile AMD Sempron 3000+ (1,8 GHz), 384 MB nesdílené operační paměti a OS Windows XP Professional při nastaveném simulačním kroku 0,25, intervalu detekce a statistickém intervalu 1 h, době náběhu 20 minut simulačního času a při povoleném sběru údajů pro celý systém, všechny úseky a statistické proudy, s výstupem do externí databáze. S 1152 MB nesdílené operační paměti se tato doba snížila na 17 minut. Uvedené údaje jsou skutečně pouze ilustrativní, ovlivněné například nepříliš velkou rychlostí pevného disku.

Statistické údaje byly při provádění simulačních výpočtů ukládány do externí databáze (MS Access), aby mohly být kdykoliv později načteny do simulačního modelu a pohodlně zpracovány.

8.11.5 Posouzení celkové propustnosti silniční sítě

Po provedení simulačního experimentu byly podobně jako při verifikaci simulačního modelu srovnávány poptávané intenzity dopravních proudů (naděfinované v simulačním modelu pomocí O/D matic) se skutečně realizovanými intenzitami, které byly v modelu

naměřeny pomocí detektorů na vstupních a výstupních úsecích zkoumaného segmentu silniční sítě.

Bylo zjištěno, že zkoumaný segment sítě je v průměrném případě schopen propustit dopravní toky s intenzitami prognózovanými pro rok 2020. V modelu byly dokonce naměřeny v průměru o 2,03 % vyšší vstupní a rovněž o 2,03 % vyšší výstupní intenzity dopravních proudů vozidel a chodců oproti nadefinovaným prognózovaným intenzitám.

Tabulka 28 uvádí průměrné navýšení intenzit v modelu zvláště pro vstupní a výstupní toky a jednotlivé typy vozidel a chodce. Naměřené hodnoty představují průměr z 50 replikací. Z tabulky je patrné, že v případě nákladních automobilů a chodců bylo na výstupech silniční sítě naměřeno více entit než na vstupech. To je možné, neboť při zahájení simulace se v modelu vyskytují entity z doby náběhu, jejichž vstup nebyl zaznamenán detektory, výstup však ano.

Tab 28. Porovnání poptávaných a skutečně naměřených intenzit provozu

Typ entit	Poptávaná intenzita [entit/h]	Průměrná naměřená intenzita [entit/h]	Průměrný rozdíl naměřená – poptávaná intenzita [entit/h]	Průměrné navýšení [%]
Vstupní toky				
osob. aut.	2 537	2 582,00	45,00	1,77
nákl. aut.	254	275,38	21,38	8,42
chodci	716	720,84	4,84	0,68
Výstupní toky				
osob. aut.	2 537	2 580,94	43,94	1,73
nákl. aut.	254	275,64	21,64	8,52
chodci	716	721,74	5,74	0,80

V rámci verifikace simulačního modelu bylo identifikováno velké navýšení intenzit nákladních automobilů naměřených v modelu oproti definovaným intenzitám, což bylo reportováno výrobcí simulačního prostředí AIMSUN NG jako potenciální chyba. Výrobce potvrdil, že se jedná o chybu v interním algoritmu pro generování příjezdů vozidel, a uvedl, že tato závažná chyba bude opravena v AIMSUN NG verze 6. Údaje z tabulky 28, stejně jako další výstupní údaje ze simulačního experimentu, pochází z produktu AIMSUN NG ve speciální neověřené verzi 5.1.9 (generované 29.11.2007), kde je opraven výše zmíněný problém.

I po provedené opravě programu je patrné, že zejména u nákladních vozidel se slabými intenzitami dopravních proudů je průměrná relativní odchylka porovnávaných intenzit vyšší než u ostatních typů entit. To je však patrně způsobeno zaokrouhlovacími chybami algoritmu pro generování vstupů entit, případně numerickou chybou použité metody. Vzhledem k nízkému podílu těchto entit na celkových tocích v silniční síti lze tyto odchylky tolerovat. Před opravou uvedené chyby ovšem činilo průměrné navýšení intenzity u nákladních vozidel i více než 20 %.

Absolutní odchylky intenzit v jednotlivých replikacích jsou u chodců a nákladních vozidel poměrně nízké a vyrovnané, u osobních vozidel, která mají v simulačním modelu daleko vyšší intenzitu, jsou absolutní rozdíly dle očekávání mírně vyšší. Celkové průměrné navýšení intenzit v simulačním modelu je pouze nepatrné a jeho vliv na výsledky experimentu lze zanedbat.

Průměrné odchylky naměřených intenzit a poptávaných (očekávaných) intenzit na jednotlivých detektorech ve špičkové hodině dokumentují tabulky 29 a 30. Uvedené hodnoty byly získány pomocí SQL dotazu *RB_VerifikaceDetektory* vytvořeného ve výstupní databázi MS Accessu. Značení detektorů vozidel vychází z označení komunikací, na kterých se detektory nacházejí (k názvu komunikace je přidána předpona „Det“ a přípona „In“, resp. „Out“ podle toho, zda se jedná o detektor na vstupním nebo výstupním úseku silniční sítě).

Tab 29. Porovnání intenzit z O/D matic a naměřených intenzit na vstupních úsecích

Entita	Detektor	Očekávaný počet [entit/h]	Ø naměřený počet [entit/h]	Ø rozdíl [entit/h]
Chodec	CH1JihIn	252	248,82	-3,18
Chodec	CH1SeverIn	188	191,02	3,02
Chodec	CH2JihIn	194	197,32	3,32
Chodec	CH2SeverIn	82	83,68	1,68
Nákl. aut.	DetAIn	62	66,04	4,04
Nákl. aut.	DetBIn	2	3,36	1,36
Nákl. aut.	DetCIn	0	0,00	0,00
Nákl. aut.	DetDIn	0	0,00	0,00
Nákl. aut.	DetEIn	3	4,64	1,64
Nákl. aut.	DetFIn	2	3,06	1,06
Nákl. aut.	DetGIn	54	55,36	1,36
Nákl. aut.	DetHIn	0	0,00	0,00
Nákl. aut.	DetIIn	4	6,02	2,02
Nákl. aut.	DetKIn	6	7,86	1,86
Nákl. aut.	DetLIn	2	2,60	0,60
Nákl. aut.	DetMIn	59	62,16	3,16
Nákl. aut.	DetNIn	60	64,28	4,28
Os. aut.	DetAIn	855	857,26	2,26
Os. aut.	DetBIn	39	42,80	3,80
Os. aut.	DetCIn	4	6,18	2,18
Os. aut.	DetDIn	10	12,46	2,46
Os. aut.	DetEIn	70	73,28	3,28
Os. aut.	DetFIn	34	35,78	1,78
Os. aut.	DetGIn	451	456,40	5,40
Os. aut.	DetHIn	9	11,74	2,74
Os. aut.	DetIIn	120	123,82	3,82
Os. aut.	DetKIn	52	56,76	4,76
Os. aut.	DetLIn	18	21,40	3,40
Os. aut.	DetMIn	514	518,20	4,20
Os. aut.	DetNIn	361	365,92	4,92
Celkem		3 507	3 578,22	71,22
Průměrný rozdíl v %				2,03 %

Tab 30. Porovnání intenzit z O/D matic a naměřených intenzit na výstupních úsecích

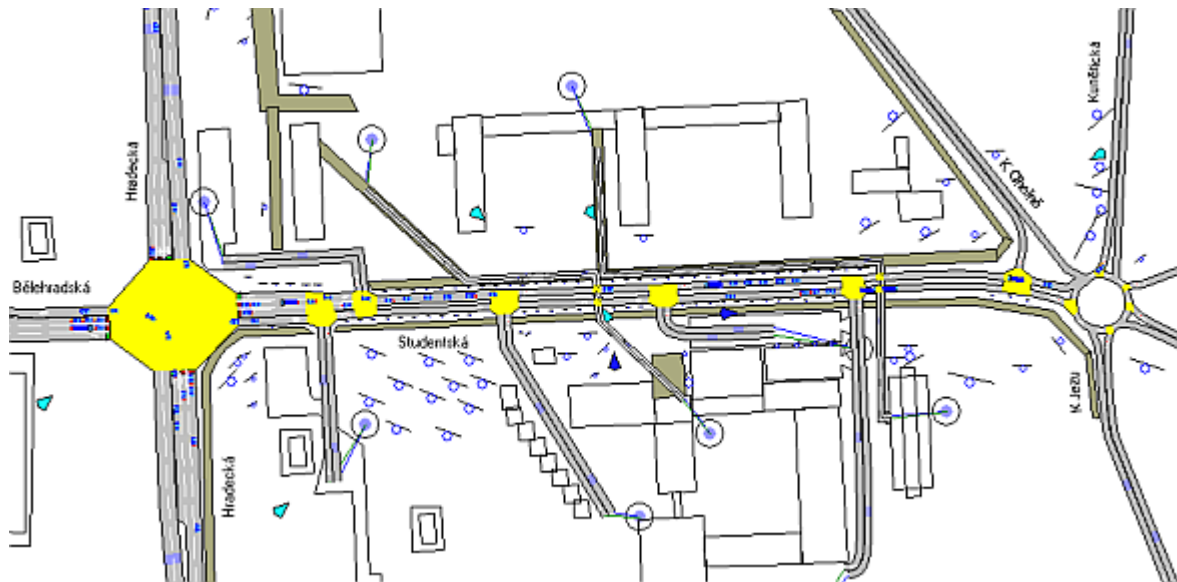
Entita	Detektor	Očekávaný počet [entit/h]	Ø naměřený počet [entit/h]	Ø rozdíl [entit/h]
Chodec	CH1JihOut	188	191,12	3,12
Chodec	CH1SeverOut	252	249,18	-2,82
Chodec	CH2JihOut	82	84,22	2,22
Chodec	CH2SeverOut	194	197,22	3,22
Nákl. aut.	DetAOut	61	66,60	5,60
Nákl. aut.	DetBOut	7	9,98	2,98
Nákl. aut.	DetCOut	2	2,80	0,80
Nákl. aut.	DetDOut	0	0,00	0,00
Nákl. aut.	DetEOut	3	4,18	1,18
Nákl. aut.	DetFOut	0	0,00	0,00
Nákl. aut.	DetGOut	58	61,50	3,50
Nákl. aut.	DetIOut	5	6,32	1,32
Nákl. aut.	DetJOut	2	3,32	1,32
Nákl. aut.	DetLOut	2	2,80	0,80
Nákl. aut.	DetMOut	60	61,78	1,78
Nákl. aut.	DetNOut	54	56,36	2,36
Os. aut.	DetAOut	609	628,10	19,10
Os. aut.	DetBOut	59	63,00	4,00
Os. aut.	DetCOut	2	3,26	1,26
Os. aut.	DetDOut	8	10,24	2,24
Os. aut.	DetEOut	39	43,64	4,64
Os. aut.	DetFOut	19	22,26	3,26
Os. aut.	DetGOut	278	280,18	2,18
Os. aut.	DetIOut	124	128,10	4,10
Os. aut.	DetJOut	76	80,18	4,18
Os. aut.	DetLOut	13	15,38	2,38
Os. aut.	DetMOut	735	730,02	-4,98
Os. aut.	DetNOut	575	576,58	1,58
Celkem		3 507	3 578,32	71,32
Průměrný rozdíl v %				2,03 %

8.11.6 Posouzení charakteru provozu

Tato kapitola podrobněji komentuje charakter provozu na Studentské ulici s využitím dopravně-inženýrských ukazatelů sledovaných v průběhu simulace. Jednotlivé ukazatele budou vyhodnoceny zvlášť pro nákladní a osobní automobily a také pro jednotlivé směry Studentské ulice. Vyhodnocení ukazatelů se soustřeďuje především na posouzení rizika zahlcování provozu a na charakterizování plynulosti provozu na simulovaném segmentu silniční sítě. U odhadů středních hodnot ukazatelů jsou uváděny i směrodatné odchylky a pološířky 95% intervalu spolehlivosti pro střední hodnotu.

Riziko zahlcování provozu

Během pozorování 2D animace simulačních výpočtů se provoz na silniční síti jevil jako provoz bez zahlcování, pouze na Studentské ulici se kolem 16. hodiny projeví zvýšené intenzity chodců a před přechody pro chodce se tvořily pouze dočasné fronty vozidel. Příklad typického pozorovaného provozu v tomto špičkovém intervalu 15:50 – 16:10 je znázorněn na obrázku 34.



Obr 34. Ilustrační pohled na typicky zaplněnou silniční síť ve špičkovém intervalu 15:50 – 16:10

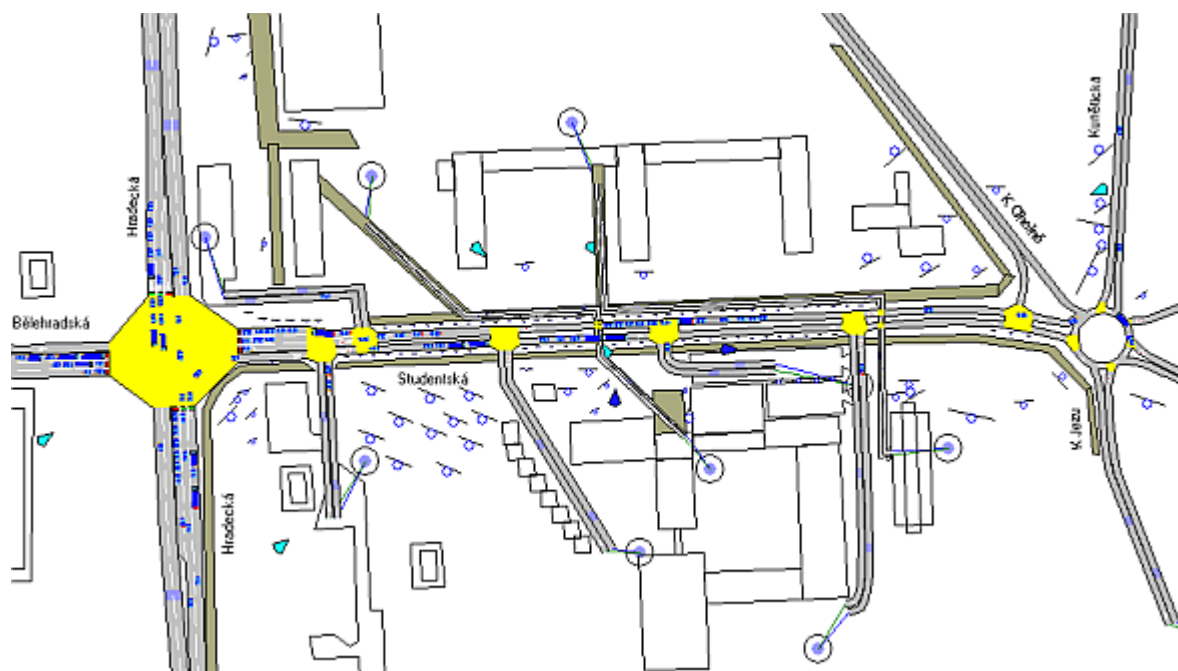
Vzhledem k tomu, že není z časových důvodů možné (a ani efektivní) takto sledovat animaci všech prováděných replikací simulačního výpočtu, byly nejdříve identifikovány replikace, které vykazovaly nejméně příznivé hodnoty těchto ukazatelů: Průměrný čas zdržení entity [s/km] (replikace 913, 912, 910), průměrná hustota provozu [entit/km] (replikace 913, 892, 912), průměrný počet zastavení entity [počet/km] (replikace 913, 912, 910), průměrná rychlost [km/h] (replikace 913, 915, 912), průměrný čas stání entity [s/km] (replikace 913, 912, 910) a celkový součet cestovních časů všech entit [h] (replikace 913, 892, 912).

„Nepříznivé“ replikace lze snadno určit pomocí SQL dotazů, které jsem vytvořil ve výstupní databázi MS Accessu. Jedná se o dotazy s názvy *RB_vystup_System<Jméno ukazatele>*, které zobrazují průměrné hodnoty ukazatelů pro jednotlivé replikace, vztažené na celý zkoumaný segment silniční sítě.

U replikací s nejhorsími výsledky byla poté pozorována 2D animace. Největší hustotu provozu a zpoždění vozidel ze všech odsimulovaných replikací vykazovala replikace s identifikátorem 913, a to především v období zvýšené intenzity chodců křižujících Studentskou ulici, tj. od 15:50 do 16:10 (viz. stav sítě na obrázcích 35 a 36). Ani provoz simulovaný v této replikaci však nevykazuje riziko tvorby kongescí.

Fronty vozidel se v nejhorsím pozorovaném případě tvoří především na Studentské ulici ve vytíženějším směru „U Josefa – Hradecká“, v návaznosti na tuto komunikaci by při mimořádně nepříznivých okolnostech mohly přesáhnout až na nově plánovanou komunikaci, ústící do jihovýchodní části okružní křižovatky. Komunikace s největším časovým zpožděním vozidel lze snadno vypočítat z obrázku 37.

Závěrem této podkapitoly lze konstatovat, že experiment se dvěma přechody pro chodce, zpomalovacími bariérami před těmito přechody a světelně řízenou křižovatkou modeluje provoz bez zahučování. Pouze dočasně, a to především v časovém intervalu 15:50 – 16:10, se před přechody pro chodce na Studentské ulici mohou tvořit fronty vozidel.



Obr 35. Ilustrační pohled na vytížení silniční sítě v jedné z nejméně příznivých replikací



Obr 36. Ilustrační pohled na tvorbu front v jedné z nejméně příznivých replikací



Obr 37. Podíl zpoždění na celkové době jízdy v nejméně příznivé replikaci č. 913

Charakteristika plynulosti provozu

Charakter provozu na sledovaném segmentu silniční sítě lze nejlépe posoudit pomocí hodnot dopravně-inženýrských ukazatelů, které jsou prostředím AIMSUN NG produkovány v rámci simulačních výpočtů. Výsledné hodnoty jednotlivých ukazatelů jsou shrnuty v tabulkách 31 a 32, zvláště pro osobní a nákladní automobily.

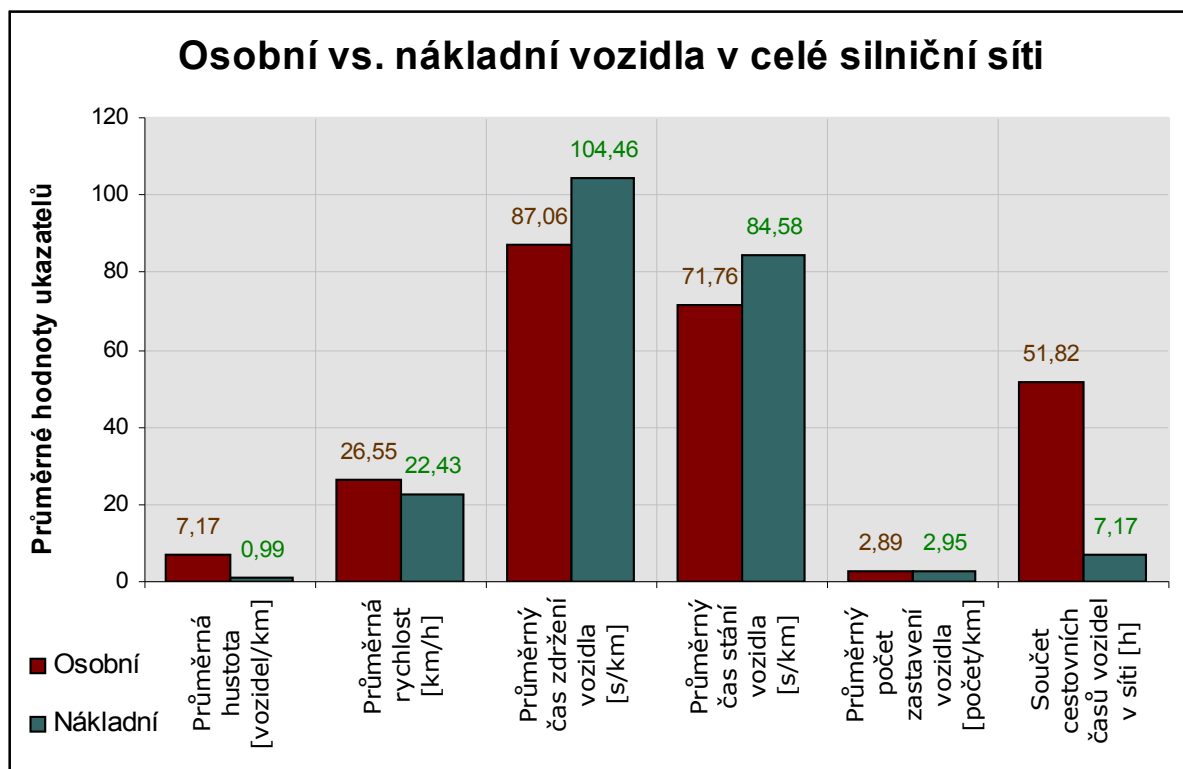
Tab 31. Statistické ukazatele pro osobní dopravu v rámci celé sítě

Osobní doprava				
Ukazatel		Průměr. hodnota	Směrod. odchylka	Δ – pološířka 95% intervalu spolehlivosti
Flow	Průměrná intenzita provozu [vozidel/h]	2580,68	51,69	14,69
Density	Průměrná hustota provozu [vozidel/km]	7,17	0,40	0,11
Speed	Průměrná rychlost [km/h]	26,55	0,57	0,16
Delay Time	Průměrný čas zdržení vozidla (oproti ideál. průjezdu) [s/km]	87,06	6,18	1,76
Stop Time	Průměrný čas stání vozidla [s/km]	71,76	5,77	1,64
Stops	Průměrný počet zastavení vozidla [počet/km]	2,89	0,16	0,04
Total Travel Time	Součet cestovních časů vozidel v síti [h]	51,82	2,95	0,84

Tab 32. Statistické ukazatele pro nákladní dopravu v rámci celé sítě

Nákladní doprava				
Ukazatel		Průměr. hodnota	Směrod. odchylka	Δ – pološířka 95% intervalu spolehlivosti
Flow	Průměrná intenzita provozu [vozidel/h]	275,76	16,98	4,82
Density	Průměrná hustota provozu [vozidel/km]	0,99	0,10	0,03
Speed	Průměrná rychlost [km/h]	22,43	0,84	0,24
Delay Time	Průměrný čas zdržení vozidla (oproti ideál. průjezdu) [s/km]	104,46	9,89	2,81
Stop Time	Průměrný čas stání vozidla [s/km]	84,58	9,62	2,73
Stops	Průměrný počet zastavení vozidla [počet/km]	2,95	0,19	0,05
Total Travel Time	Součet cestovních časů vozidel v síti [h]	7,17	0,71	0,20

Výsledné hodnoty dopravně-inženýrských ukazatelů pro osobní a nákladní dopravu (kromě intenzit) byly rovněž zpracovány do podoby přehledného grafu (viz. obrázek 38). Jak již bylo uvedeno v tabulce 28, naměřené intenzity provozu zhruba odpovídají dopravní poptávce definované v simulačním modelu. Plynulost provozu na silniční síti lze zřejmě nejlépe popsat pomocí průměrného času zdržení vozidla na 1 km oproti ideálnímu průjezdu, s tímto ukazatelem úzce souvisí průměrný čas stání vozidla na 1 km. Plynulost provozu popisuje také průměrná rychlost vozidla. Celkovou výkonnost sítě lze vhodně charakterizovat součtem cestovních časů všech vozidel, které zahrnují dobu jízdy i doby čekání jednotlivých vozidel.



Obr 38. Výsledné statistické ukazatele pro osobní a nákladní vozidla v celém systému

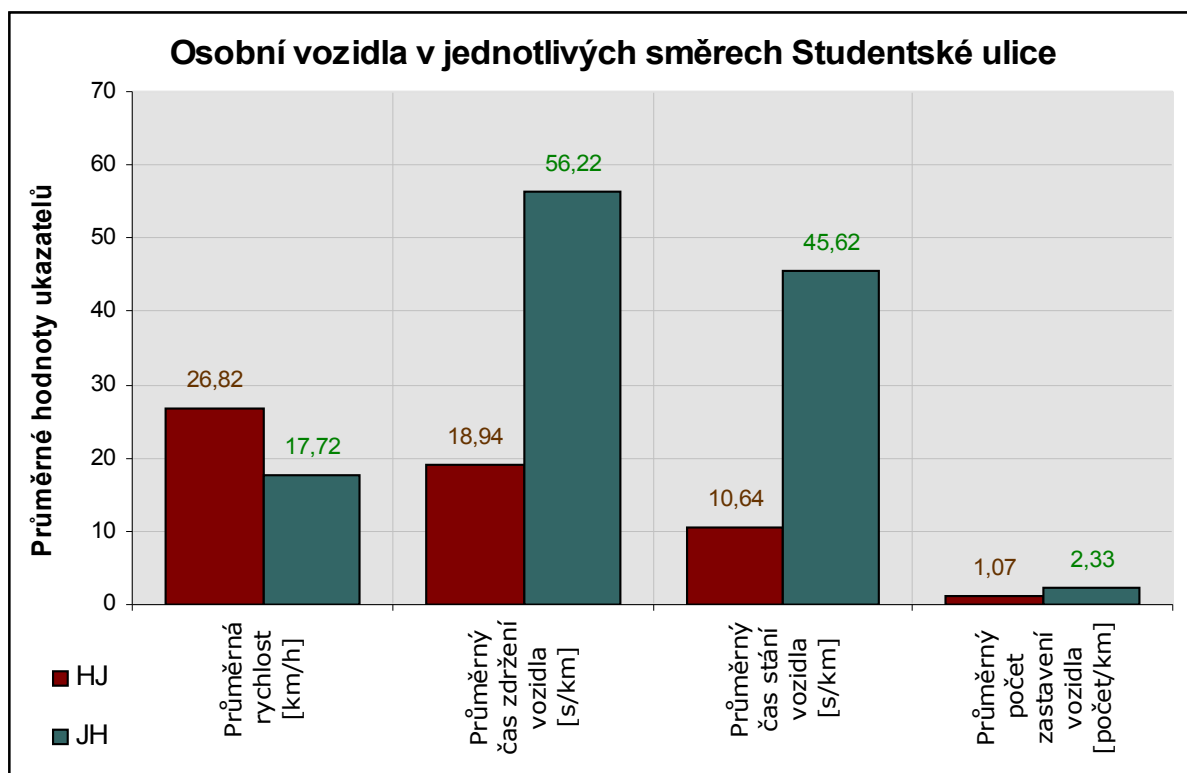
Rychlosti odpovídají skutečnosti, že na většině úseků je nastavena maximální rychlost 40 km/h (někde i méně), průměrná rychlost je snižována čekáním vozidel na vjezdech světelně řízené křižovatky a dočasnými frontami, které se tvoří před přechody pro chodce na Studentské ulici. Podobně je ovlivňován také průměrný čas zpoždění vozidel a další naměřené ukazatele. Do doby zpoždění vozidla na 1 km silniční sítě se započítává také doba čekání na zelenou na vjezdu světelně řízené křižovatky.

Studentská ulice představuje klíčovou komunikaci ve sledovaném segmentu silniční sítě (prochází přímo univerzitním kampusem a přechody pro chodce na této ulici zřejmě nejvíce snižují plynulost provozu na okolní silniční síti), proto byly statistické ukazatele vyhodnoceny také zvlášť pro jednotlivé jízdní směry této ulice. Výsledné hodnoty ukazatelů jsou uvedeny v tabulce 33. Zkratka HJ představuje směr „Hradecká → U Josefa“, JH označuje směr „U Josefa → Hradecká“. Δ je pološířka 95% intervalu spolehlivosti pro střední hodnotu.

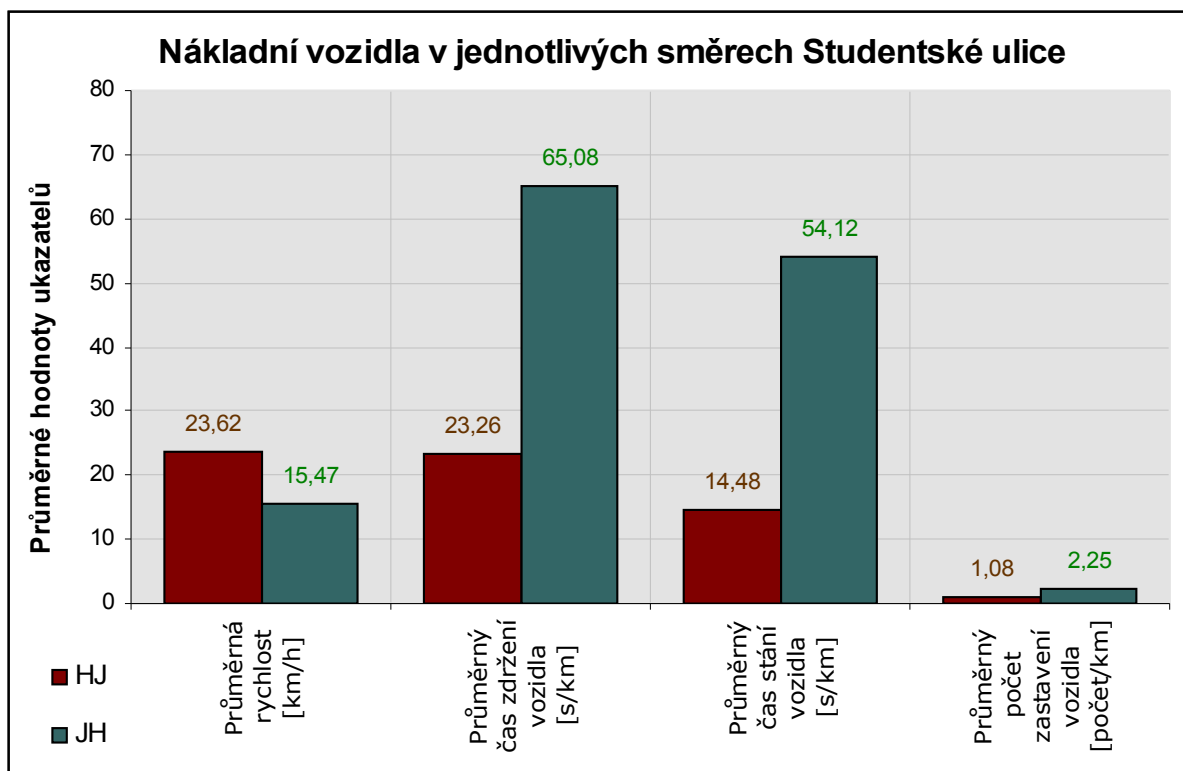
Tab 33. Statistické ukazatele pro jednotlivé jízdní směry Studentské ulice

Ukazatel		Směr	Osobní doprava			Nákladní doprava		
			Průměr. hodnota	Sm. odch.	Δ (95%)	Průměr. hodnota	Sm. odch.	Δ (95%)
Flow	Průměrná intenzita provozu [vozidel/h]	HJ	309,48	18,15	5,16	63,58	7,51	2,13
		JH	462,50	19,33	5,49	60,48	7,61	2,16
Speed	Průměrná rychlost [km/h]	HJ	26,82	0,73	0,21	23,62	0,90	0,26
		JH	17,72	1,65	0,47	15,47	1,72	0,49
Delay Time	Průměrný čas zdržení vozidla (oproti ideálnímu průjezdu) [s/km]	HJ	18,94	1,91	0,54	23,26	2,74	0,78
		JH	56,22	12,39	3,52	65,08	14,91	4,24
Stop Time	Průměrný čas stání vozidla [s/km]	HJ	10,64	1,63	0,46	14,48	2,59	0,74
		JH	45,62	11,63	3,30	54,12	14,36	4,08
Stops	Průměrný počet zastavení vozidla [počet/km]	HJ	1,07	0,11	0,03	1,08	0,14	0,04
		JH	2,33	0,36	0,10	2,25	0,38	0,11

Výsledné hodnoty statistických ukazatelů pro osobní automobily v jednotlivých směrech Studentské ulice jsou prezentovány také v grafu na obrázku 39. Tytéž ukazatele pro nákladní vozidla jsou uvedeny na obrázku 40.



Obr 39. Výsledné ukazatele pro osobní vozidla v jednotlivých směrech Studentské ulice



Obr. 40. Výsledné ukazatele pro nákladní vozidla v jednotlivých směrech Studentské ulice

Protože se přechody pro chodce velkou měrou podílejí na kvalitě provozu v okolních úsecích silniční sítě, je vhodné zmínit způsob, jakým jsou přednosti na přechodech upraveny v simulačním modelu. Přednost chodců na přechodech pro chodce není v modelu zcela absolutní. U úseků silniční sítě, které jsou umístěny těsně před přechody, není přednost chodců zajištěna příznakem „Give Way“, čímž je dosaženo věrohodnějšího chování modelu, kdy vozidla většinou dávají chodcům přednost, nicméně pokud jedou v proudu těsně za sebou (případně vyšší rychlostí), chodec čeká, dokud vozidla nepřejedou a nevyskytne se delší volný časový interval pro přejití přechodu.

Ačkoliv jsou přechody pro chodce na Studentské ulici kritickým místem v celém sledovaném segmentu silniční sítě, lze provoz na této ulici považovat za plynulý, ovšem s tvorbou dočasných front vozidel před přechody pro chodce. Z tabulky 33 plyne, že intenzity osobních vozidel ve směru „U Josefa → Hradecká“ jsou ve sledované špičkové hodině zhruba o 50 % vyšší než intenzity osobních vozidel v opačném směru, což má velký vliv na rozdílnou kvalitu provozu v jednotlivých směrech Studentské ulice. U nákladních vozidel jsou intenzity v obou směrech vyrovnané. Osobní vozidla dosahují ve více vytíženém směru „U Josefa → Hradecká“ zhruba o 9 km/h nižší průměrné rychlosti, nákladní vozidla zde jezdí pomaleji přibližně o 8 km/h.

Značné rozdíly mezi jednotlivými směry potvrzuje také průměrný čas zdržení vozidla, průměrný čas stání vozidla a průměrný počet zastavení vozidla na jednom kilometru. Například průměrný čas zdržení osobních automobilů (oproti ideálnímu průjezdu) je ve směru „U Josefa → Hradecká“ 3x větší než v opačném směru a činí 56,22 s/km.¹⁰

¹⁰ Je třeba poznamenat, že délka Studentské ulice není celý kilometr, ale přibližně 350 m.

Takto velké zdržení osobních (a potažmo i nákladních) automobilů ve směru „U Josefa → Hradecká“ lze přičíst nejen větším intenzitám osobních automobilů v tomto směru Studentské ulice, ale také světelnému řízení křižovatky Hradecká – Studentská – Bělehradská, které způsobuje na konci směru „U Josefa → Hradecká“ zastavování vozidel a čekání na signál „Volno!“, dle očekávání snižuje plynulost provozu a přispívá k tvorbě front vozidel v tomto směru Studentské ulice.

8.11.7 Vizualizace výsledků simulačních výpočtů na úsecích silniční sítě

Aplikace AIMSUN NG přímo podporuje názorné grafické zobrazení hodnot statistických ukazatelů a některých jejich poměrů na úsecích silniční sítě. Sít' je zobrazována pomocí nadefinovaných způsobů zobrazení úseků a entit (View Modes) s přiřazenými grafickými styly (View Styles). V příloze A je zpracována vizualizace výstupních ukazatelů pro experiment se světelně řízenou křižovatkou realizovaný v simulační studii – jedná se o znázornění průměrné rychlosti, průměrného času zpoždění vozidla (oproti ideálnímu průjezdu), znázornění podílu intenzity na kapacitě (využití kapacity úseků) a hustoty provozu.

Červenou barvou jsou vyznačeny úseky, které dosahují nejméně příznivých hodnot sledovaného ukazatele, zelenou barvou potom nejlépe hodnocené úseky. Výchozí barevné značení v simulačním prostředí AIMSUN NG bylo upraveno tak, aby odpovídalo zmíněné přirozené konvenci, a také intervaly hodnot byly předefinovány na základě konkrétních výsledků simulačního experimentu. Bližší informace k barevnému pokrytí úseků lze nalézt v legendě u jednotlivých zobrazení.

8.11.8 Porovnání výsledků simulační studie s výsledky předchozí studie Ing. Davida Svozila

Výsledné ukazatele experimentu se světelně řízenou křižovatkou Hradecká – Studentská – Bělehradská, dvěma přechody pro chodce přes Studentskou ulici a zpomalovacími bariérami před těmito přechody (experiment označme zkratkou SSZ) lze porovnat s výsledky experimentu č. 1, který provedl Ing. David Svozil ve své diplomové práci [24] a jenž uvažuje namísto světelně řízené křižovatky dvoupruhovou okružní křižovatkou (tento experiment označme zkratkou OK).

Oba experimenty byly realizovány v simulačním prostředí AIMSUN NG, ovšem experiment SSZ byl proveden až po opravě problémů, které byly zjištěny v této práci při verifikaci simulačního modelu (viz. podkapitola 8.8) a oznámeny výrobcem aplikace AIMSUN NG. Opravy se týkají problému navýšení skutečně realizovaných intenzit provozu u nákladních vozidel oproti poptávaným intenzitám (při plánování příjezdů vozidel pomocí generátoru pseudonáhodných čísel s exponenciálním rozdělením pravděpodobnosti) a problému částečné závislosti intenzit provozu na nastavené hodnotě simulačního kroku. Výrobce také provedl úpravu chování vozidel na okružní křižovatce, které dříve mohlo vést k častějšímu vzájemnému zablokování vozidel na okruhu při vysokých intenzitách provozu, tento problém se však v simulačním modelu Ing. Davida Svozila nevyskytoval.

Simulační experimenty byly rovněž realizovány při různých hodnotách simulačního kroku (SSZ při hodnotě 0,25, OK při simulačním kroku 0,75), což může mít za následek, že simulační model použitý v experimentu SSZ bude vykazovat mírně vyšší kapacitní propustnost. Nicméně i přes zmíněné rozdíly lze provést alespoň přibližné relevantní srovnání výsledků zmíněných experimentů, které byly jinak realizovány za zcela shodných podmínek.

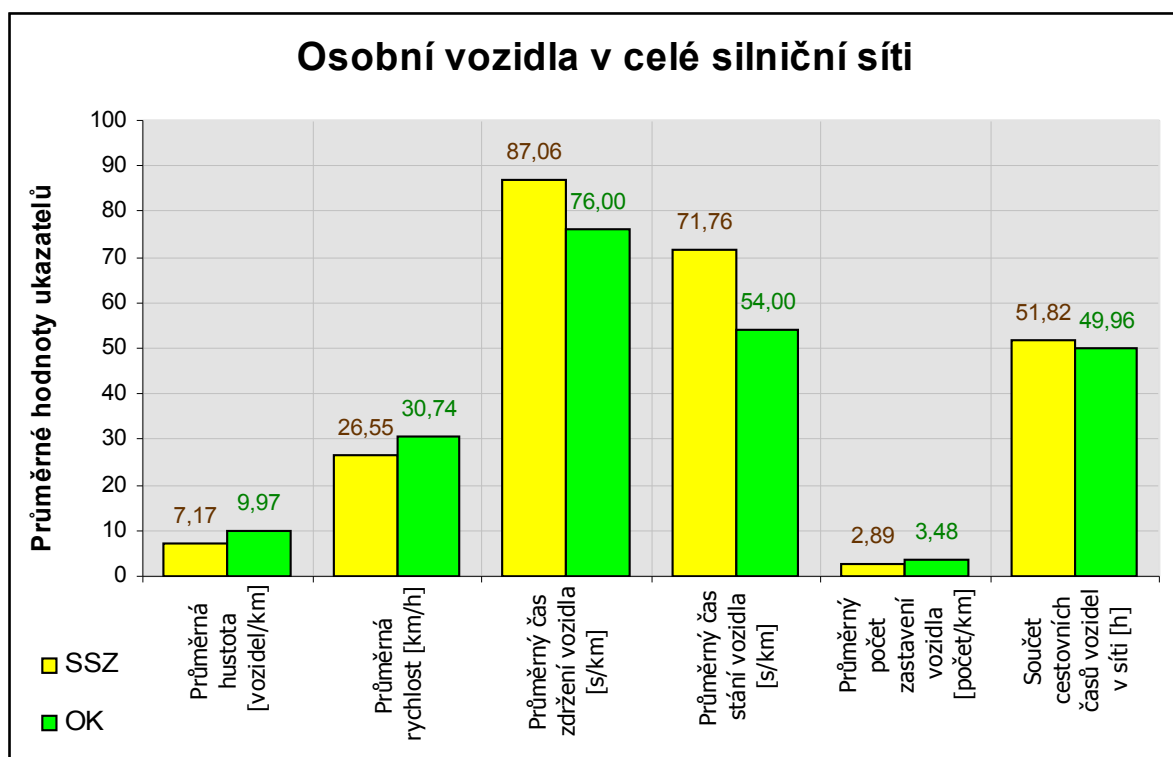
Rámcově dospěly oba experimenty SSZ a OK ke shodným závěrům, prověřované dopravní řešení bylo v obou případech posouzeno jako kapacitně vyhovující, provoz na Studentské ulici byl shledán dostatečně plynulým, ovšem s dočasnou tvorbou front před přechody pro chodce. Podrobnější porovnání výhodnosti prověřovaných variant lze provést na základě výstupních dopravně-inženýrských ukazatelů.

V tabulce 34 a na obrázcích 41 a 42 jsou porovnávány průměrné hodnoty výstupních statistických ukazatelů z obou experimentů naměřené pro celý simulovaný segment silniční sítě, zvláště pro osobní a nákladní vozidla.

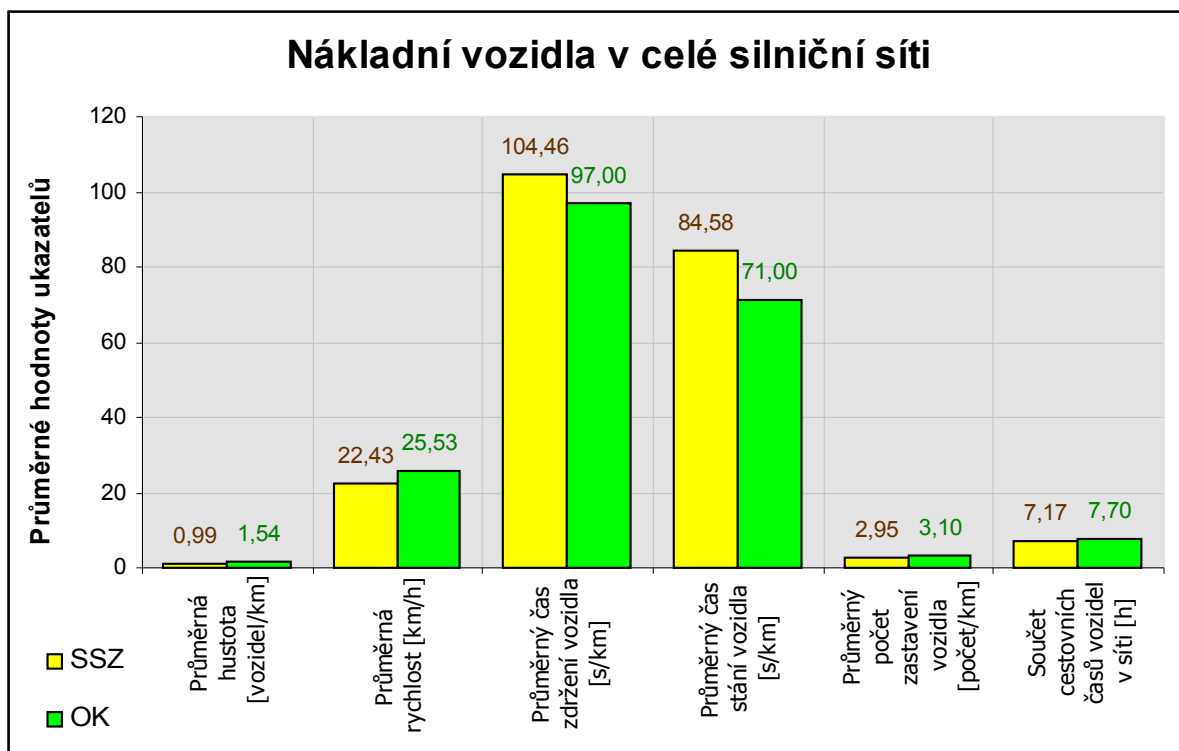
Tab 34. Průměrné hodnoty ukazatelů naměřené v experimentech SSZ a OK pro celý systém

Ukazatel		Osobní doprava		Nákladní doprava	
		SSZ	OK	SSZ	OK
Flow	Průměrná intenzita [vozidel/h]	2580,68	2683,00	275,76	313,00
Density	Průměrná hustota [vozidel/km]	7,17	9,97	0,99	1,54
Speed	Průměrná rychlost [km/h]	26,55	30,74	22,43	25,53
Delay Time	Průměrný čas zdržení vozidla [s/km]	87,06	76,00	104,46	97,00
Stop Time	Průměrný čas stání vozidla [s/km]	71,76	54,00	84,58	71,00
Stops	Průměrný počet zastavení vozidla [počet/km]	2,89	3,48	2,95	3,10
Total Travel Time	Součet cestovních časů vozidel v síti [h]	51,82	49,96	7,17	7,70

zdroj údajů experimentu OK: [24]



Obr 41. Porovnání statistických ukazatelů pro osobní vozidla (zdroj údajů experimentu OK: [24])



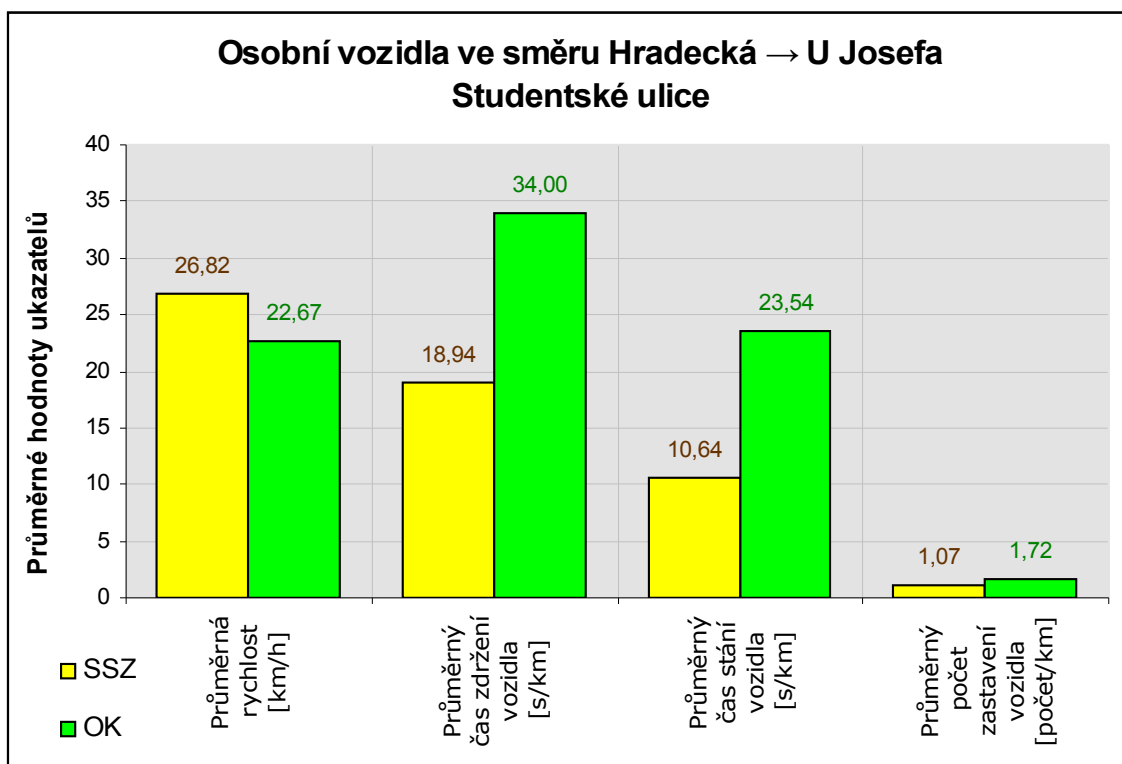
Obr 42. Porovnání statistických ukazatelů pro nákladní vozidla (zdroj údajů experimentu OK: [24])

Tabulka 35 a obrázky 43, 44, 45 a 46 porovnávají výstupní statistické údaje experimentů SSZ a OK, naměřené pro jednotlivé směry Studentské ulice: „Hradecká → U Josefa“ a „U Josefa → Hradecká“. Porovnání je rovněž provedeno zvlášť pro osobní a nákladní vozidla.

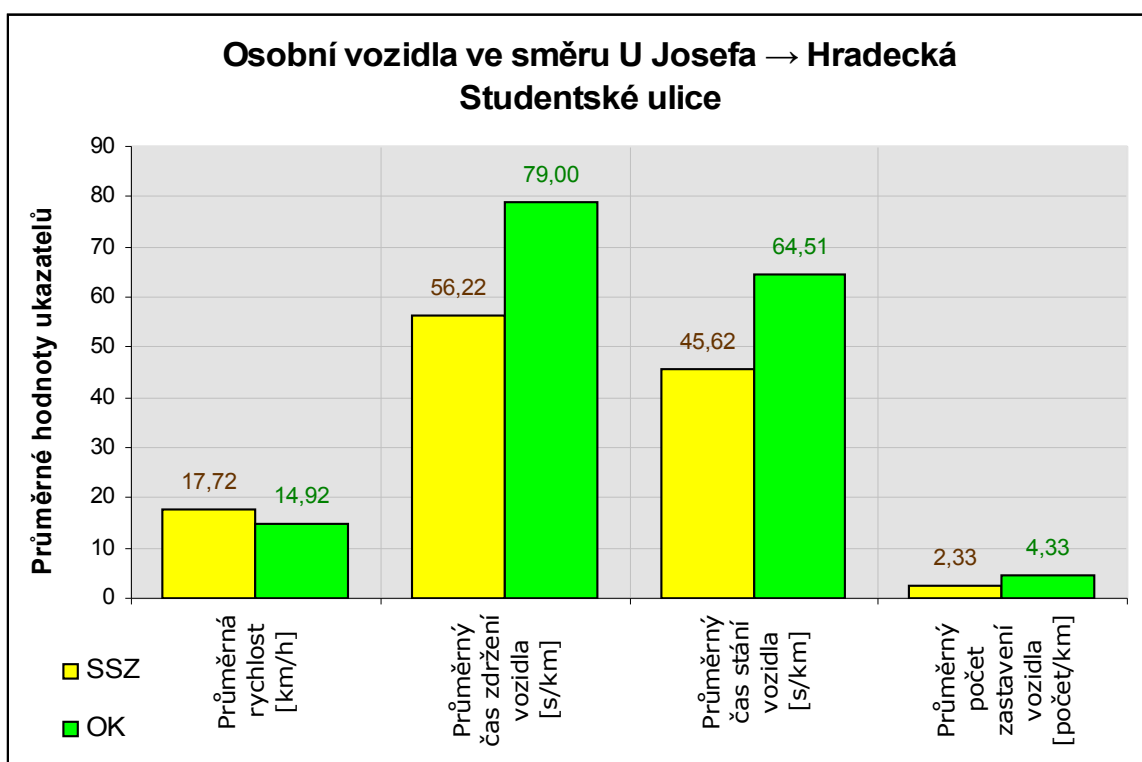
Tab 35. Průměrné hodnoty ukazatelů naměřené v experimentech SSZ a OK pro směry Studentské ulice

Ukazatel		Směr	Osobní doprava		Nákladní doprava	
			SSZ	OK	SSZ	OK
Flow	Průměrná intenzita [vozidel/h]	HJ	309,48	318,00	63,58	64,00
		JH	462,50	460,00	60,48	62,00
Speed	Průměrná rychlost [km/h]	HJ	26,82	22,67	23,62	20,27
		JH	17,72	14,92	15,47	14,08
Delay Time	Průměrný čas zdržení vozidla [s/km]	HJ	18,94	34,00	23,26	39,00
		JH	56,22	79,00	65,08	81,00
Stop Time	Průměrný čas stání vozidla [s/km]	HJ	10,64	23,54	14,48	28,03
		JH	45,62	64,51	54,12	67,91
Stops	Průměrný počet zastavení vozidla [počet/km]	HJ	1,07	1,72	1,08	1,51
		JH	2,33	4,33	2,25	3,13

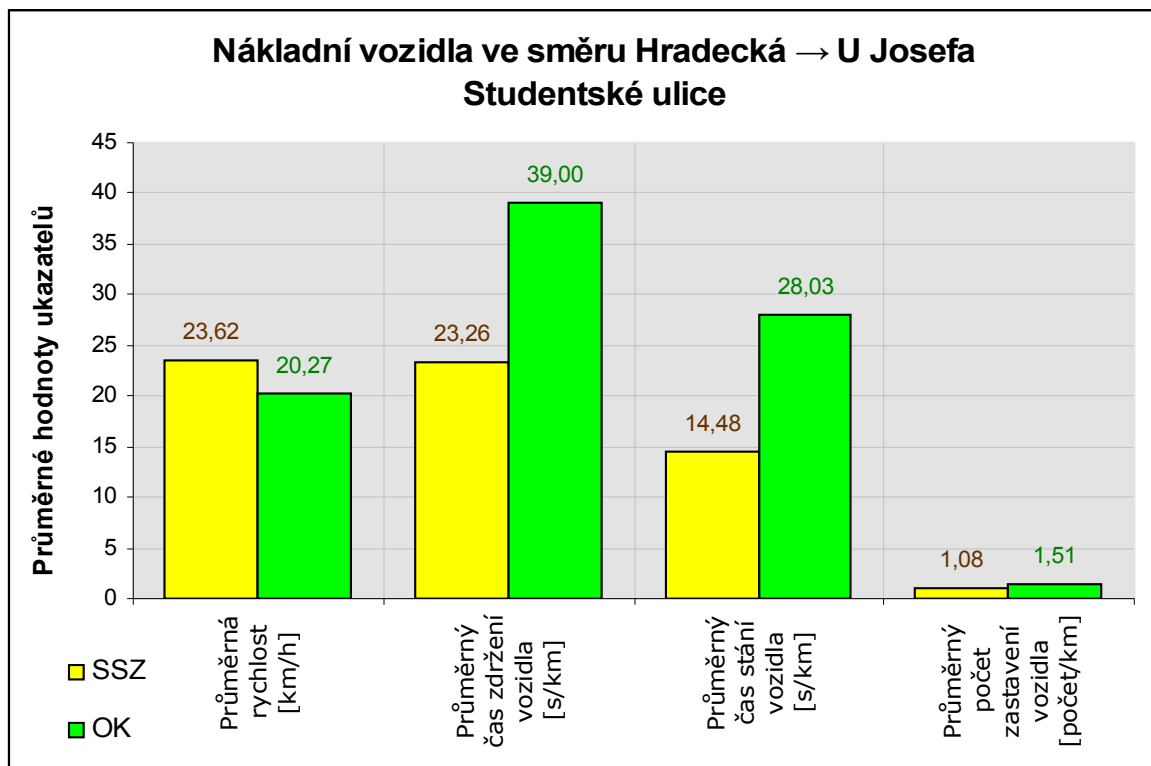
vysvětlivky: HJ – směr „Hradecká → U Josefa“, JH – směr „U Josefa → Hradecká“, zdroj údajů experimentu OK: [24]



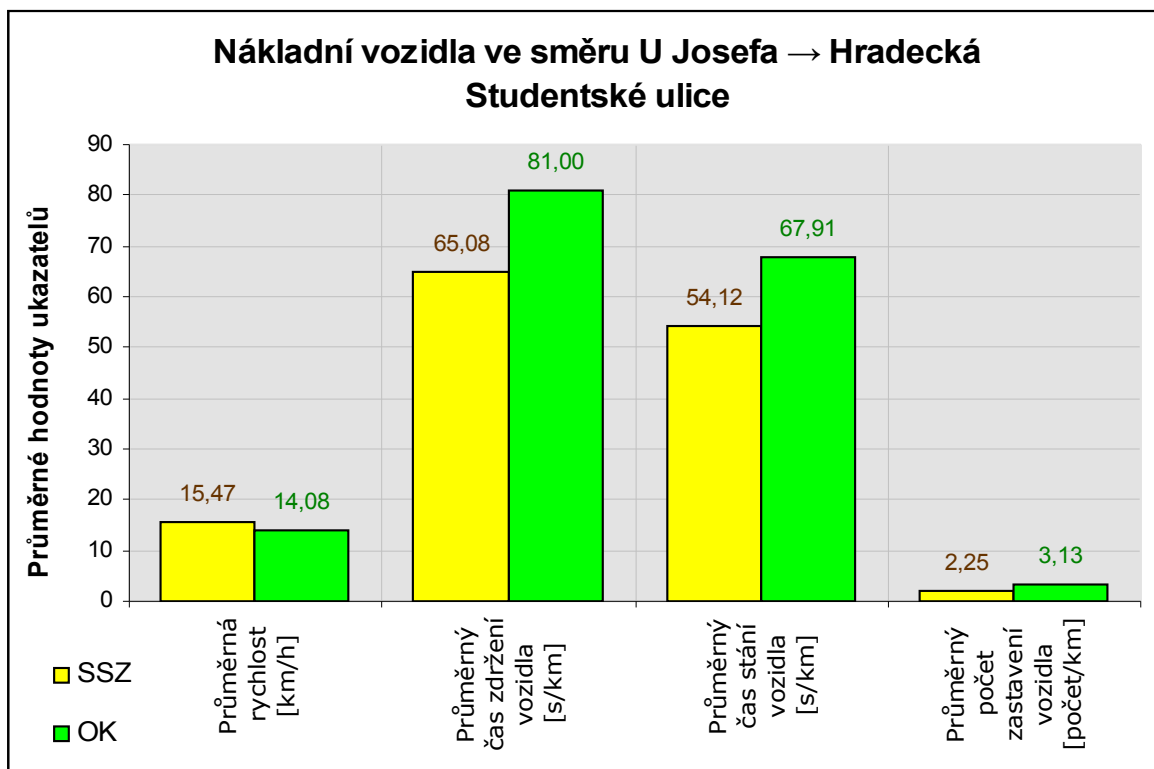
Obr 43. Porovnání výsledků experimentů pro osobní vozidla ve směru „Hradecká → U Josefa“ (zdroj údajů experimentu OK: [24])



Obr 44. Porovnání výsledků experimentů pro osobní vozidla ve směru „U Josefa → Hradecká“ (zdroj údajů experimentu OK: [24])



Obr 45. Porovnání výsledků experimentů pro nákladní vozidla ve směru „Hradecká → U Josefa“ (zdroj údajů experimentu OK: [24])



Obr 46. Porovnání výsledků experimentů pro nákladní vozidla ve směru „U Josefa → Hradecká“ (zdroj údajů experimentu OK: [24])

Z uvedených grafů a tabulek plynou tato zajímavá zjištění: Z pohledu celého sledovaného segmentu silniční sítě vykazuje mírně příznivější hodnoty výstupních statistických ukazatelů experiment OK (s dvoupruhovou okružní křižovatkou) – konkrétně se jedná o příznivější průměrnou rychlost, průměrný čas zpoždění vozidla, průměrný čas stání vozidla a také o hustotu provozu (pokud vyšší hustotu považujeme za výhodnější z hlediska realizovaných přepravních výkonů silniční sítě – takto je hustota vyhodnocována též v aplikaci AIMSUN NG). Nejpříznivějších hodnot dosahuje experiment OK oproti experimentu SSZ v případě průměrného času stání vozidla a průměrného času zpoždění vozidla. Tyto ukazatele nabývají obecně optimističtějších hodnot u okružních křižovatek než u křižovatek světelně řízených.

Součet cestovních časů všech vozidel v silniční síti je u obou experimentů poměrně vyrovnaný. Celková výkonnost sledovaného segmentu silniční sítě je tedy podobná u obou porovnávaných experimentů. U experimentu OK je trochu méně příznivý průměrný počet zastavení vozidla na jednom kilometru. Před okružní křižovatkou lze při větších intenzitách provozu pozorovat častější popojíždění vozidel, které pravděpodobně vede k vyššímu počtu zastavení.

Jestliže pro celý sledovaný segment silniční sítě vycházejí hodnoty výstupních statistických ukazatelů příznivěji pro experiment s dvoupruhovou okružní křižovatkou, při porovnání hodnot ukazatelů v jednotlivých směrech Studentské ulice si vede lépe experiment SSZ se světelně řízenou křižovatkou, a to ve všech sledovaných ukazatelích: V průměrné rychlosti, průměrném času zdržení vozidla, průměrném času stání vozidla i v průměrném počtu zastavení vozidla.

Tento zdánlivý paradox lze vysvětlit tím, že významnou část úseků sledovaných v simulačním modelu zaujímají ramena velké čtyřramenné křižovatky Hradecká – Studentská – Bělehradská, na kterých se shromažďuje značný počet vozidel. Dopravní situace na třech ramenech světelně řízené křižovatky (ramenech Bělehradská, Hradecká – sever a Hradecká – jih) nezasahuje do výsledných charakteristik provozu měřených na Studentské ulici, vykazuje ovšem méně optimistické hodnoty ukazatelů než dopravní situace na odpovídajících ramenech dvoupruhové okružní křižovatky, čímž zhoršuje postavení světelně řízené křižovatky při vyhodnocování statistických ukazatelů souhrnně pro celý systém. Lze se domnívat, že při sledování větších částí Hradecké a Bělehradské ulice by porovnání charakteristik pro celý sledovaný systém vycházelo pro světelně řízenou křižovátku příznivěji, než je tomu ve stávajícím případě.

Experiment SSZ vykazuje větší plynulost provozu na Studentské ulici především ve směru „Hradecká → U Josefa“. V tomto směru jsou světelně řízenou křižovatkou propouštěny delší ucelené proudy vozidel, které se pohybují Studentskou ulicí koordinovaněji než vozidla individuálně vyjíždějící z okružní křižovatky.

Také ve druhém směru „U Josefa → Hradecká“ jsou při uvažování světelně řízené křižovatky hodnoty všech ukazatelů příznivější. Sledováním animace experimentu s dvoupruhovou okružní křižovatkou lze vyzorovat, že vozidla vjíždějící na kruhový objezd ze Studentské ulice se poměrně obtížně zařazují mezi vozidla jedoucí po okruhu, a to především z důvodu značných intenzit dopravních proudů, které projíždějí z jižní části Hradecké ulice směrem na sever a rovněž přes velkou část kruhového objezdu směrem doleva do Bělehradské ulice.

8.12 Závěry simulační studie

Cílem této případové simulační studie bylo prověřit z kapacitně-provozního hlediska variantu dopravního řešení Studentské ulice a přilehlých komunikací, která zahrnuje světelně řízenou křižovatku Hradecká – Studentská – Bělehradská a dva přechody pro chodce se zpomalovacími bariérami na Studentské ulici. Během simulačního experimentu byly prověřovány intenzity provozu prognózované pro odpolední špičkovou hodinu roku 2020. Tyto intenzity vycházejí z předpokládaného napojení Studentské ulice na tzv. 5. variantu komunikační sítě města Pardubice, která byla navržena firmou Highway Design z Hradce Králové.

Experiment s výše uvedenou konfigurací silniční sítě byl úspěšně realizován v simulačním prostředí AIMSUN NG (ve speciální verzi 5.1.9, která opravuje problémy simulátoru odhalené při verifikaci). Výstupy simulačního experimentu byly zpracovány statistickými metodami a prezentovány přehlednou tabulkovou i grafickou formou.

Na základě analýzy výstupních statistických ukazatelů lze vyslovit tyto závěry simulační studie:

- 1) Uvažované řešení je kapacitně vyhovující. Provoz na silniční síti lze charakterizovat jako plynulý, bez zahlcování, pouze s dočasným výskytem front před přechody pro chodce na Studentské ulici. Tyto fronty se objevují především v intervalu 15:50 – 16:10 špičkové hodiny, ve kterém se vyskytují zvýšené intenzity proudů chodců.
- 2) Při porovnání prověřované varianty dopravního řešení s variantou, v níž je na místě světelně řízené křižovatky Hradecká – Studentská – Bělehradská uvažována dvoupruhová okružní křižovatka, bylo zjištěno, že z celkového pohledu sledovaného segmentu silniční sítě je mírně výhodnější realizace okružní křižovatky, u které nejsou tolik zatěžována její ramena, nicméně znatelně plynulejší provoz na samotné Studentské ulici byl modelován ve variantě se světelně řízenou křižovatkou.

Závěrem simulační studie lze podotknout, že v případě zájmu zadavatele o prozkoumání dalších variant dopravního řešení Studentské ulice, nebo jiných částí navrhovaného komunikačního systému je možné vypracovat další simulační experimenty. Implementační prostředí AIMSUN NG k tomu poskytuje dostatečně široké možnosti, umožňuje například modelovat dynamické světelné řízení na křižovatkách nebo posuzovat míru ekologické zátěže způsobené exhalacemi výfukových plynů.

9 Závěr

V práci byl demonstrován význam experimentální výzkumné metody simulace pro podporu rozhodování v dopravním inženýrství na případové simulační studii, která prověřila charakter dopravního provozu na Studentské ulici a přilehlých komunikacích. Zkoumané dopravní řešení vychází z tzv. 5. varianty navrhovaného komunikačního systému města Pardubice s intenzitami provozu prognózovanými pro odpolední špičkovou hodinu roku 2020. Postup aplikovaný při vypracování simulační studie odpovídá typickým fázím životního cyklu simulační studie, které byly popsány v teoretické části práce.

Součástí prověřovaného dopravního řešení byla průsečná světelně řízená křižovatka Hradecká – Studentská – Bělehradská, pro kterou byly vypočítány potřebné mezičasy mezi signálními dobami zelených a navržen pevný plán světelné signalizace. Doby zelených byly vypočítány metodou saturovaného toku, přičemž v práci byl popsán také princip dalších metod pro výpočet doby cyklu a zelených. Alternativní výpočet zelených metodou spotřeby času a iterační metodou lze nalézt na datovém nosiči, který je přiložen k diplomové práci. Součástí všech použitých metod je také vyhodnocení kapacitní rezervy vjezdů křižovatky při navrženém signálním plánu.

Světelná křižovatka byla namodelována v softwarovém prostředí AIMSUN NG, které je v současnosti považováno za jeden z nejlepších nástrojů pro mikroskopickou simulaci silničního provozu. V aplikaci byl geometricky věrně modelován nejen prostor křižovatky a jejích ramen, ale také pohyb vozidel ve vnitřním prostoru křižovatky. V diplomové práci bylo na základě zkušeností získaných při modelování dopravní infrastruktury a na základě zpětné vazby od výrobce aplikace formulováno doporučení pro modelování okružních a průsečných světelně řízených i neřízených křižovatek v aplikaci AIMSUN NG.

V kapitole 7 bylo provedeno porovnání kapacit vjezdů světelně řízené křižovatky vypočítaných metodou saturovaného toku s kapacitní propustností simulačního modelu této křižovatky. Na základě porovnání byla provedena taková parametrizace simulačního modelu, která následně vedla k poměrně dobré shodě porovnávaných kapacit.

Simulační model izolované světelně řízené křižovatky byl společně s provedenou parametrizací a vypracovaným signálním plánem zahrnut do modelu Studentské ulice, který byl již dříve zpracován Ing. Davidem Svozilem v diplomové práci [24]. V simulačním modelu byla rozšířena stávající 3D simulační scéna o některé další budovy v okolí světelně řízené křižovatky a na stěny těchto budov byly aplikovány fotorealistické textury.

Následně byla provedena velmi podrobná verifikace simulačního modelu pomocí statistického zpracování výstupů simulačního experimentu a sledování animace simulačního výpočtu. Výstupy experimentu byly ukládány do externí relační databáze a následně zpracovány použitím dotazovacího jazyka SQL. Verifikace poukázala na některé problémy v samotné implementaci simulátoru. Tyto problémy byly oznámeny výrobcí aplikace AIMSUN NG (španělské společnosti TSS – Transport Simulation Systems). Výrobce na všechny tři oznámené problémy promptně reagoval, identifikoval chyby v interním algoritmu simulátoru pro generování vstupů vozidel do simulačního modelu a vydal neveřejný opravný patch, který jsem aplikoval na software AIMSUN NG, abych zajistil korektní chování prověřovaného simulačního modelu. Pro veřejnost budou opravy uveřejněny v nadcházející verzi 6 aplikace AIMSUN NG.

Konkrétně se jedná o tyto problémy: Významné navýšení vstupních intenzit vozidel generovaných v simulačním modelu oproti zadaným poptávaným intenzitám, které se projevilo především při generování proudů nákladních automobilů (s uvažovanými Poissonovskými toky), nežádoucí částečná závislost generovaných počtů vozidel na nastavené hodnotě simulačního kroku a chování vozidel na okružní křižovatce, které mohlo vést k častějšímu výskytu vzájemného zablokování vozidel na okruhu, ke kterému docházelo zejména při vysokých intenzitách provozu.

S verifikovaným simulačním modelem (a alespoň částečně validovaným na základě výsledků provedeného kapacitního porovnání) byl realizován simulační experiment, jehož cílem bylo kapacitně-provozní prověření provozu na Studentské ulici. V experimentu byla uvažována světelně řízená křižovatka Hradecká – Studentská – Bělehradská a dva přechody pro chodce se zpomalovacími bariérami na Studentské ulici.

Výsledky simulačního experimentu byly statisticky zpracovány, pro ulehčení výpočtu základních charakteristik popisné statistiky, intervalů spolehlivosti a exportování řady kumulativních průměrů s pološířkami intervalů spolehlivosti byl implementován vlastní podpůrný program SimStat, který lze nalézt na přiloženém datovém nosiči včetně zdrojových kódů v jazyce C#. Hodnoty výstupních dopravně-inženýrských ukazatelů byly prezentovány v podobě přehledných tabulek, grafů a barevného grafického zobrazení hodnot výstupních ukazatelů na úsecích silniční sítě, které je nativně podporováno aplikací AIMSUN NG.

Výstupní dopravně-inženýrské ukazatele byly porovnány s výsledky předchozí realizované studie provozu na Studentské ulici [24]. V předchozí studii byla namísto světelně řízené křižovatky Hradecká – Studentská – Bělehradská uvažována dvoupruhová okružní křižovatka. Na základě provedeného porovnání lze konstatovat, že z celkového pohledu sledovaného segmentu silniční sítě je nepatrně výhodnější realizace okružní křižovatky, u které jsou méně zatěžována její ramena, ovšem z hlediska plynulosti provozu v obou směrech Studentské ulice se výhodněji jeví světelně řízená křižovatka. Simulační studie dospěly k podobným obecným závěrům, obě zkoumaná řešení vykazovala v průměrném případě dostatečnou plynulost provozu bez zahlcování.

Nasazení aplikace AIMSUN NG při provádění obdobných simulačních studií v oblasti silniční dopravy lze doporučit, aplikace poskytuje prostředí pro intuitivní modelování silniční sítě, disponuje dostatečnými možnostmi zpracování výstupních údajů simulačních experimentů a bohatou podporou pro jejich grafickou prezentaci, včetně pokročilé 2D a 3D animace. Nicméně bych ocenil, kdyby aplikace na jediném místě poskytovala přehled průměrných hodnot výstupních ukazatelů pro sledovaný systém, přičemž v přehledu by byly uvedeny také vypočítané směrodatné odchylky a intervaly spolehlivosti pro odhad střední hodnoty. Aplikace sice počítá směrodatné odchylky, ale pološířky intervalů spolehlivosti zcela chybí.

Naštěstí aplikace disponuje programovými knihovnamy v jazyce C++, které lze rozšiřovat, a potřebné dodatečné funkcionality lze doprogramovat podle potřeby. Poměrně pohodlně se pracuje s externí databází, do které lze ukládat výstupní údaje. Rovněž nad touto databází by bylo možné vystavět vlastní podpůrný programový produkt, který by usnadnil zpracování výstupních údajů. Simulační prostředí AIMSUN NG se stále dynamicky vyvíjí, již nyní však představuje výkonný, funkčně bohatý simulační nástroj, který je schopen po provedené verifikaci a validaci simulačního modelu poskytnout kvalitní podklady pro podporu rozhodování v dopravním inženýrství. Nastavení vstupních parametrů simulačního modelu bych doporučil konzultovat s odborníky z oblasti dopravního inženýrství, protože aplikace disponuje širokou paletou uvažovaných vstupních parametrů.

Soupis bibliografických citací

- [1] *AIMSUN 5.1 Microsimulator User's Manual*. Barcelona : TSS – TRANSPORT SIMULATION SYSTEMS, prosinec 2006.
- [2] *AIMSUN NG User's Manual*. Barcelona : TSS – TRANSPORT SIMULATION SYSTEMS, prosinec 2006.
- [3] *AIMSUN NG, the integrated traffic environment* [online]. Barcelona : TSS – TRANSPORT SIMULATION SYSTEMS, 1998 – 2007 [cit. 2008-04-09]. Dostupný z WWW: <<http://www.aimsun.com>>.
- [4] BANKS, J. *Handbook of simulation*. New York : Willey, 1998. 850 s. ISBN 0-471-13403-1.
- [5] Centrum dopravního výzkumu, v. v. i. *Databáze v rámci projektu RKO JM/Oblasti výzkumu* [online]. 2005 [cit. 2008-03-31]. Dostupný z WWW: <http://www.cdv.cz/rko_db/menu.php?category=raa&action=detail&rid=4>.
- [6] ČERNÁ, A., ČERNÝ, J. *Teorie řízení a rozhodování v dopravních systémech*. 1. vyd. Praha : Institut Jana Pernera, 2004. 150 s. ISBN 80-86530-15-9.
- [7] Český normalizační institut ČSN 73 6102. *Projektování křižovatek na silničních komunikacích*.
- [8] EDIP s. r. o. *Aktualizace výpočtových modelů pro stanovení kapacity neřízených úrovnových křižovatek* [online]. 2008 [cit. 2008-03-31]. Dostupný z WWW: <http://www.edip.cz/index.php?id=vyzkum&projekt=vyzkum_krizovatky>.
- [9] EDIP s. r. o. *Aktualizace výpočtových modelů pro stanovení kapacity okružních křižovatek* [online]. 2008 [cit. 2008-03-31]. Dostupný z WWW: <http://www.edip.cz/index.php?id=vyzkum&projekt=vyzkum_okruzky>.
- [10] *Exercise : editing*. Barcelona : TSS – TRANSPORT SIMULATION SYSTEMS, 2006.
- [11] Federal Highway Administration – United States Department of Transportation. *Traffic Analysis Tools by Category* [online]. 2004 [cit. 2008-04-08]. Dostupný z WWW: <http://ops.fhwa.dot.gov/trafficanalysistools/tat_vol2/sectapp_e.htm>.
- [12] HUŠEK, R., LAUBER, J. *Simulační modely*. Praha : STNL/ALFA, 1987. 349 s.
- [13] KAŠPAR, J., BARTEKOVÁ, L. *Dopravní posouzení výkonnosti křižovatky MÚK Palackého*. Duben 2004. Závěrečná zpráva simulační studie firmy DHV CR, spol. s r. o.
- [14] KAŠPAR, J., KAŠÍK, J., BARTEKOVÁ, L. *Dopravní řešení centra Pardubic : modelové hodnocení vlivu dopravy*. Září 2004. Závěrečná zpráva simulační studie firmy DHV CR, spol. s r. o.
- [15] KAVIČKA, A. *Modelování a simulace*. Pardubice. Elektronické sylaby přednášek předmětu Modelování a simulace. 2005.
- [16] KAVIČKA, A. *Provozní prověření variant dopravního řešení ulice Studentská v Pardubicích*. Závěrečná zpráva k simulační studii. Pardubice : Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, květen 2004.
- [17] KAVIČKA, A., KLIMA, V., ADAMKO, N. *Agentovo orientovaná simulácia dopravných uzlov*. Žilina : EDIS, 2006. 210 s. ISBN 80-8070-477-5.

- [18] KŘIVÝ, I., KINDLER, E. *Simulace a modelování*. Elektronická skripta Ostravské univerzity. 2001. 146 s.
- [19] MAHDALOVÁ, I. *Světelné signalizační zařízení – návrh izolované křižovatky* [online]. FAST VŠB, 2005 [cit. 2007-06-18]. Dostupný z WWW: <<http://fast10.vsb.cz/mahdalova/mestkom/zadani04/04zadani.htm>>.
- [20] *Navrhování světelných signalizačních zařízení pro řízení silničního provozu : technické podmínky*. Ministerstvo dopravy České republiky. Odbor pozemních komunikací. 1. vyd. Brno : Centrum dopravního výzkumu, 1996. 109 s. ISBN 80-902141-2-6.
- [21] PIPKOVÁ, B., et al. *Dopravní inženýrství : návod pro cvičení*. ČVUT. Fakulta stavební. 2. vyd. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1994. 144 s. ISBN 80-01-01226-3.
- [22] ROBINSON, S., et al. *C# : programujeme profesionálně*. 1. vyd. Praha : Computer Press, 2003. ISBN 80-251-0085-5.
- [23] SLABÝ, P., UHLÍK, M. *Dopravní inženýrství I*. 1. vyd. Praha : Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2006. 101 s. ISBN 80-01-03365-1.
- [24] SVOZIL, D. *Simulace dopravního provozu v omezených segmentech silničních sítí*. Diplomová práce. Pardubice : Univerzita Pardubice, 2006.
- [25] TUZAR, A. *Teorie dopravy*. Pardubice : Univerzita Pardubice, 1996. ISBN 80-7194-039-9.

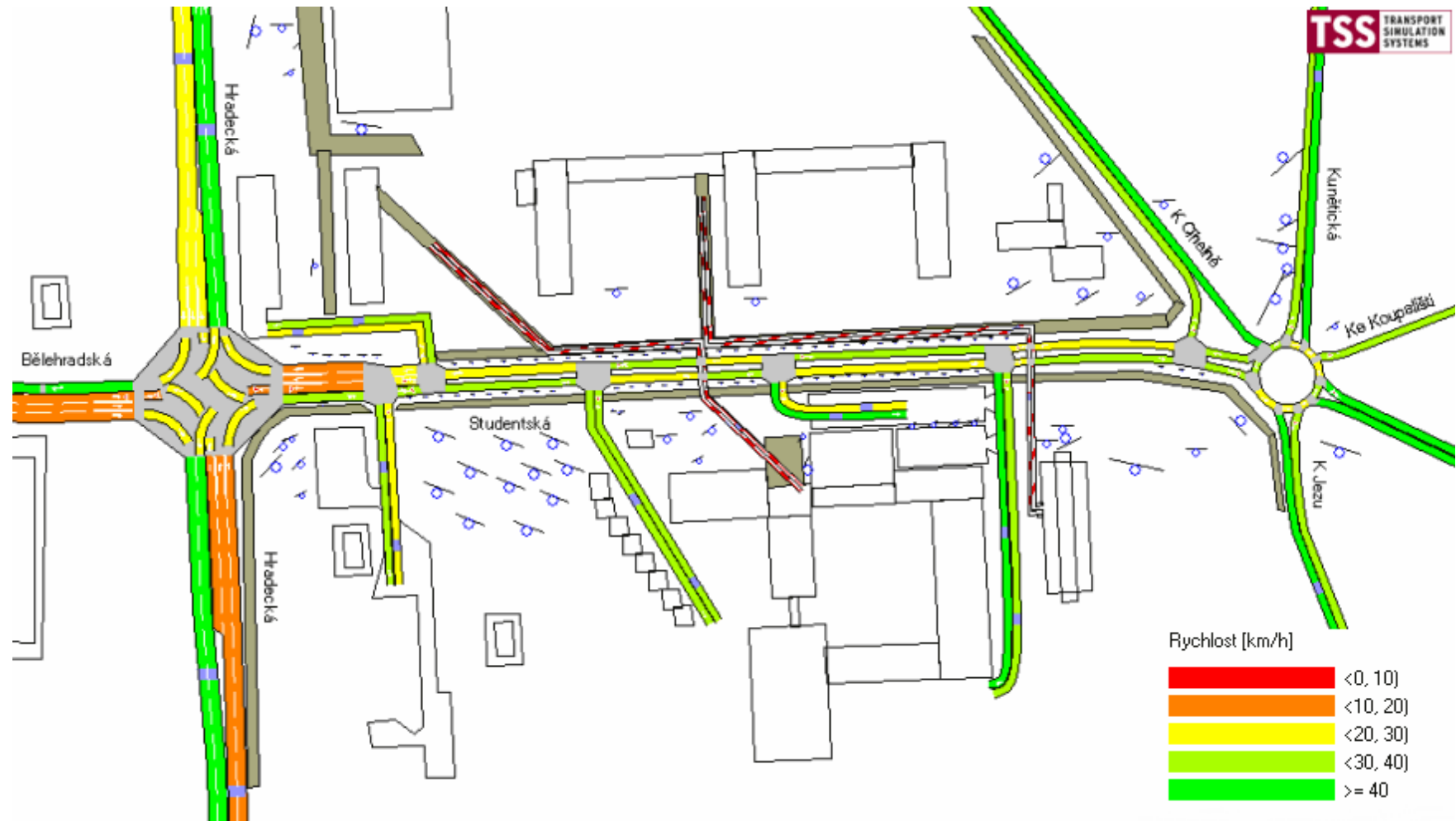
Přílohy

Seznam příloh

- Příloha A** Vizualizace výsledků simulačních výpočtů na úsecích silniční sítě
- Příloha B** Signální plány pro křižovatku Hradecká – Studentská – Bělehradská v Pardubicích
- Příloha C** Intenzity dopravních proudů na Studentské ulici prognózované pro odpolední špičkovou hodinu roku 2020
- Příloha D** Datový nosič s doprovodnými materiály. Popis adresářové struktury a obsahu datového média je uveden v souboru *readme.txt*, který je umístěn v kořenovém adresáři. Na médiu jsou umístěny zejména tyto elektronické materiály:
- Podkladové mapy, výkresy a textury pro simulační model Studentské ulice,
 - patch pro aplikaci AIMSUN NG (aplikovatelný na verzi 5.1.8.1), který opravuje chyby simulátoru nalezené při verifikaci simulačního modelu,
 - program SimStat implementovaný pro usnadnění výstupní statistické analýzy simulačních experimentů (výpočet kumulativních průměrů s intervaly spolehlivosti, popisná statistika náhodného výběru),
 - výpočet signálního plánu světelně řízené křižovatky Hradecká – Studentská – Bělehradská (výpočet cyklu a signálních dob zelené metodou saturovaného toku a výpočty provedené alternativními metodami – metodou spotřeby času a iterační metodou),
 - simulační model izolované světelně řízené křižovatky,
 - výsledný simulační model Studentské ulice se světelně řízenou křižovatkou včetně všech materiálů vytvořených v rámci verifikace simulačního modelu, tj. i výstupní databáze MS Accessu s vytvořenými SQL dotazy, které umožňují efektivní verifikaci modelu,
 - slovníček pojmů dopravního inženýrství,
 - text této práce v elektronické podobě (ve formátu PDF),
 - videozáznamy problémů zjištěných při verifikaci simulačního modelu a 2D a 3D videozáznamy z běhu mikroskopické simulace silničního provozu,
 - vlastní překlad/shrnutí cvičných tutoriálů dodávaných s aplikací AIMSUN NG.

Příloha A

Vizualizace výsledků simulačních výpočtů na úsecích silniční sítě



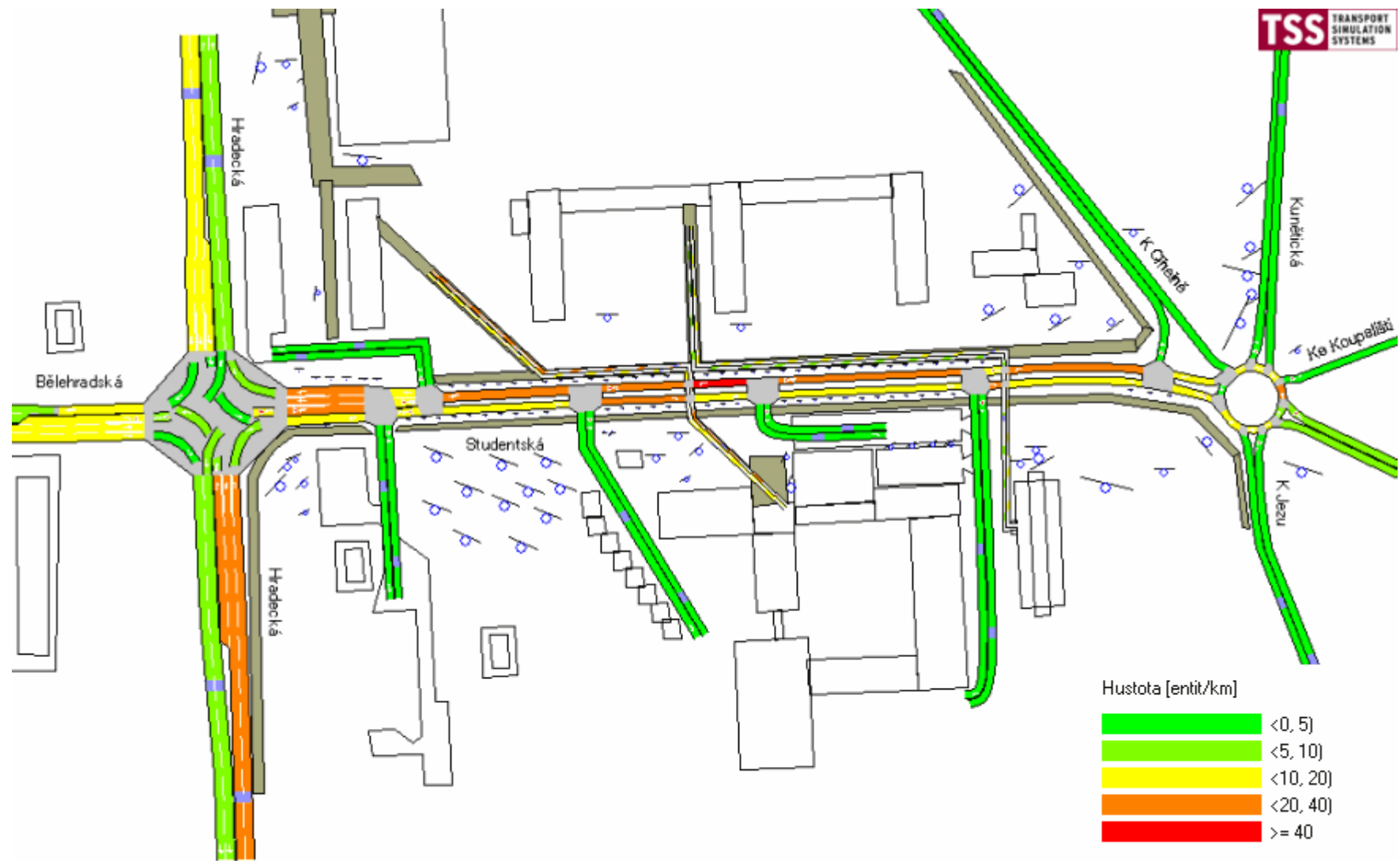
Průměrná rychlost v km/h



Průměrný čas zdržení (oproti ideálnímu průjezdu) v s/km – zahrnuje i dobu čekání na zelenou



Podíl intenzity na kapacitě (využití kapacity úseků) v %



Hustota provozu v počtu entit/km

KŘIŽOVATKA: HRADECKÁ – STUDENTSKÁ – BĚLEHRADSKÁ
 DÉLKA CYKLU 80 s
 METODA SATUROVANÉHO TOKU: REÁLNÝ SIGNÁLNÍ PLÁN

NÁVĚSTIDLO		Z	fáze 1 27 s	fáze 2 20 s	fáze 3 33 s
VOZIDLA	VA13	21	█		
	VA2	13		█	
	VB	23			█
	SB	20		█	
	VC13	21	█		
	VC2	13		█	
	VD	23			█
	SD	20		█	

Reálný signální plán pro intenzity provozu prognózované v odpolední špičkové hodině 15:30 – 16:30 roku 2020

Příloha C

Intenzity dopravních proudů na Studentské ulici prognózované pro špičkovou hodinu roku 2020

Intenzity proudů osobních automobilů ve špičkové hodině 15:30 – 16:30 roku 2020

		A	B	C	D	E	F	G	I	J	L	M	N	O	P	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z		
855	A											518	212	125												A
39	B										0				29							10				B
4	C																			1			3			C
10	D																		3						7	D
70	E														45						25					E
34	F							13	8	0							13									F
451	G						8		37	21							385									G
9	H						0	0	0	0							9									H
120	I						2	27		12							79									I
52	K															14		38								K
18	L		2												12							4				L
514	M	387											42	85												M
361	N	112										66		183												N
393	O		51								11											331				O
582	P	110										151	321													P
394	R						9	238	79	43							25									R
511	S																	511								S
549	T					31															518					T
343	U					8										335										U
346	V				6															340						V
543	W				2																				541	W
345	X			0																	345					X
549	Y		6								2				541											Y
548	Z			2																				546		Z
		A	B	C	D	E	F	G	I	J	L	M	N	O	P	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z		
		609	59	2	8	39	19	278	124	76	13	735	575	393	582	394	511	549	343	346	543	345	549	548		

zdroj: KAVIČKA, A. *Provozní prověření variant dopravního řešení ulice Studentská v Pardubicích*. Pardubice : Univerzita Pardubice.

Intenzity proudů nákladních automobilů ve špičkové hodině 15:30 – 16:30 roku 2020

		A	B	C	D	E	F	G	I	J	L	M	N	O	P	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z		
62	A											37	8	17												A
2	B										0				1							1				B
0	C																			0			0			C
0	D																		0					0		D
3	E															1					2					E
2	F							0	0	0							2									F
54	G						0		2	1							51									G
0	H						0	0	0	0							0									H
4	I						0	2		0							2									I
6	K															3		3								K
2	L		2												0							0				L
59	M	36											8	15												M
60	N	8										10		42												N
74	O		3								2											69				O
68	P	17										13	38													P
69	R					0	56	3	1								9									R
64	S																	64								S
67	T				0																67					T
68	U					3										65										U
68	V				0														68							V
69	W				0																			69		W
70	X			2																68						X
69	Y		2								0				67											Y
69	Z			0																			69			Z
		A	B	C	D	E	F	G	I	J	L	M	N	O	P	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z		
		61	7	2	0	3	0	58	5	2	2	60	54	74	68	69	64	67	68	68	69	70	69	69		

zdroj: KAVIČKA, A. *Provozní prověření variant dopravního řešení ulice Studentská v Pardubicích*. Pardubice : Univerzita Pardubice.