

**Univerzita Pardubice**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

**Posouzení signálního programu světelného signalizačního  
zařízení s využitím simulace**

**Bc. Petr Křivka**

**Diplomová práce**

**2010**

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Akademický rok: 2009/2010

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr KŘIVKA**  
Studijní program: **N2646 Informační technologie**  
Studijní obor: **Informační technologie**  
Název tématu: **Posouzení signálního programu světelného signalizačního zařízení s využitím simulace**  
Zadávající katedra: **Katedra softwarových technologií**

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

Cílem diplomové práce je posouzení alternativních signalizačních programů vybraného signalizačního zařízení. Jednotlivé části diplomové práce jsou: - analýza současného stavu, - sběr vstupních dat a jejich statistické zpracování, - návrh alternativních signalizačních programů dle dostupné metodiky, - ověření navržených signalizačních programů v simulačním modelu zpracovaném v simulačním nástroji AIMSUN, - statistické zpracování výstupů simulačního modelu a jejich porovnání se současným stavem.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

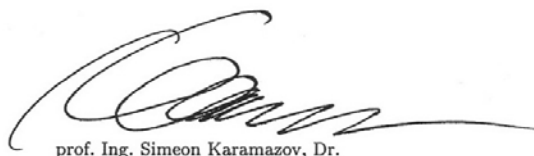
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

Navrhování světelných signalizačních zařízení pro řízení silničního provozu. CDV, Brno, 1996, 109 s., TP 81, ISBN 80-902141-2-6. Beran, R. Simulace silničního provozu v rámci průsečných křižovatek jako podpora dopravního inženýrství. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2008. 148 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Antonín Kavička, Ph.D. Kelton, W. et al., Simulation with Arena, New York, McGraw-Hill, 2004, ISBN: 0-07-285694-7.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Michael Bažant, Ph.D.  
Katedra softwarových technologií

Datum zadání diplomové práce: 30. října 2009  
Termín odevzdání diplomové práce: 21. května 2010



prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.

děkan

L.S.



doc. Ing. Antonín Kavička, Ph.D.

vedoucí katedry

V Pardubicích dne 10. listopadu 2009

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 29.8.2010.

Petr Křivka

## Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce, panu Ing. Michaelu Bažantovi, Ph.D. za odborné vedení této práce, cenné rady a podnětné připomínky.

## **ANOTACE**

Práce je zaměřena na využití experimentální výzkumné metody modelování a simulace pro posouzení alternativních signálních programů světelně řízené křižovatky Karla IV. – Jahnova v Pardubicích. V teoretické části práce jsou popsány základní principy modelování a simulace, principy návrhu signálních programů pro světelná signalizační zařízení, základní informace o simulačním nástroji Aimsun a možnostech modelování signálních plánů v tomto nástroji. Praktická část zahrnuje rozbor současného stavu řízení vybrané křižovatky, dopravní průzkum pro vybranou křižovatku a výpočet alternativních signálních plánů. Dopravní průzkum a signální plány jsou použity v simulační studii, která posuzuje jednotlivé způsoby řízení křižovatky na základě vybraných dopravně-inženýrských ukazatelů.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

mikroskopická simulace, mikrosimulace, silniční doprava, Aimsun, světelná signalizační zařízení, SSZ, signální plán, simulační studie

## **TITLE**

Assessment of the traffic lights signalling programme using simulation

## **ANNOTATION**

The work focuses on the results and utilization of the experimental research method of modelling and simulation to assess the alternative traffic lights signalling. The theoretical part describes the basic principles of modelling and simulation, the principles of signalling programme designs, basic information about the traffic simulator Aimsun and ways of modelling signal plans in this application. The practical part includes the study of the present traffic control in Karla IV. – Jahnova junction in Pardubice, traffic intensity analysis and alternative signal plans calculation.

The traffic research and signalling plans are used in the case study which evaluates the particular ways of controlling the junction on the basis of the chosen traffic-engineering indicators.

## **KEYWORDS**

microscopic simulation, microsimulation, road transport, Aimsun, traffic lights, traffic signals, signal plan, simulation study

# Obsah

<b>0 Úvod .....</b>	<b>10</b>
<b>1 Cíle diplomové práce .....</b>	<b>12</b>
<b>2 Principy návrhu SSZ.....</b>	<b>13</b>
2.1 Řízení dopravy pomocí SSZ.....	13
2.2 Způsoby řízení SSZ .....	14
2.3 Návrh signálního plánu křižovatky – souhrnný postup.....	14
2.3.1 Podklady a průzkumy .....	15
2.3.2 Výpočet tabulky mezičasů.....	15
2.3.3 Stanovení počtu fází a pořadí fázových přechodů.....	16
2.3.4 Přidělení zelené maximální fázové skupině .....	16
2.3.5 Optimalizace fázových skupin.....	17
2.3.6 Určení pořadí fázových skupin.....	18
2.3.7 Stanovení délky cyklu .....	19
2.3.8 Stanovení doby volna .....	19
2.3.9 Okrajové podmínky .....	19
2.4 Návrh signálního plánu křižovatky – metody pro stanovení délky cyklu a délky zelených.....	20
2.4.1 Metoda saturovaného toku .....	20
2.4.2 Metoda spotřeby času .....	27
2.5 Vyhodnocování parametrů SSZ.....	29
<b>3 Modelování a simulace jako experimentální výzkumná metoda .....</b>	<b>30</b>
3.1 Principy modelování a simulace.....	30
3.2 Životní cyklus simulační studie.....	33
3.3 Vstupy a výstupy simulátoru .....	37

<b>4 Simulační nástroj Aimsun .....</b>	<b>43</b>
4.1 Tvorba simulačního modelu .....	44
4.2 Formát vstupních dat .....	45
4.3 Možnosti modelování řízení dopravy .....	46
4.3.1 Definování signálních skupin .....	46
4.4 Výstupy simulačního nástroje – animace, dopravně-inženýrské ukazatele .....	51
<b>5 Analýza současného stavu řízení křižovatky Karla IV. – Jahnova.....</b>	<b>54</b>
5.1 Popis křižovatky .....	54
5.2 Dopravní situace .....	56
5.3 Řízení SSZ.....	57
<b>6 Dopravní průzkum – intenzity provozu křižovatky Karla IV. – Jahnova .....</b>	<b>59</b>
<b>7 Výpočet signálních plánů pro křižovatku Karla IV. – Jahnova .....</b>	<b>64</b>
7.1 Podklady a průzkumy potřebné pro výpočet .....	64
7.2 Kolizní plochy v křižovatce.....	64
7.3 Tabulka mezičasů .....	65
7.4 Stanovení počtu a sledu fází signálního plánu.....	66
7.5 Výpočet délky cyklu a délky jednotlivých zelených.....	68
<b>8 Simulační studie křižovatky Karla IV. – Jahnova .....</b>	<b>69</b>
8.1 Vymezení objektu zkoumání .....	69
8.2 Stanovení cílu simulační studie křižovatky .....	70
8.3 Vymezení zkoumaného systému .....	70
8.4 Konceptuální model vymezeného systému .....	71
8.5 Získání a zpracování vstupních dat pro simulační studii.....	72
8.6 Tvorba simulačního modelu .....	73
8.7 Verifikace a validace simulačního modelu.....	74
8.8 Plán simulačních experimentů.....	78
8.9 Sledované dopravně-inženýrské ukazatele.....	78



8.10 Délka simulačního výpočtu .....	79
8.11 Provedení simulačních experimentů.....	79
8.11.1 Stanovení doby náběhu simulátoru .....	79
8.11.2 Stanovení minimálního počtu replikací.....	81
8.12 Vyhodnocení výstupních údajů .....	85
8.13 Ukázky simulačního modelu .....	87
8.14 Závěr simulační studie.....	89
<b>9 Závěr .....</b>	<b>91</b>
<b>Seznam tabulek.....</b>	<b>93</b>
<b>Seznam obrázků.....</b>	<b>94</b>
<b>Seznam grafů .....</b>	<b>95</b>

## 0 Úvod

Během posledních třiceti let došlo k obrovskému rozmachu silniční dopravy. Několikanásobně vzrostly počty osobních, užitkových i nákladních vozidel. S rostoucím počtem vozidel narůstá i intenzita dopravy, která se negativně projevuje na mnohých místech silniční sítě naší republiky. Na kapacitu a propustnost dopravní sítě má významný vliv kapacita uzlových bodů sítě. V případě silniční sítě se jedná zejména o propustnost jednotlivých křižovatek. Pokud intenzita vozidel projíždějících křižovatkou přesáhne určitou mez, přestává být efektivní přednost řešená dopravními značkami. V takovém případě je třeba učinit dopravní opatření pro zlepšení podmínek průjezdu křižovatkou. Jednou z možností je použití světelného signalizačního zařízení (dále jen SSZ) pro řízení provozu. Účelnost zavedení světelně řízené křižovatky je třeba prokázat na základě již zmíněné zvýšené intenzity provozu vozidel, zvýšené intenzity chodců nebo kvůli zvýšení bezpečnosti provozu jako takového.

Každá světelně řízená křižovatka má svou vlastní logiku řízení, která vychází zejména z typu křižovatky, z velikosti křižovatky a z hodinových intenzit dopravy podle pohybů v křižovatce zjišťovaných pro každý vjezd. Součástí logiky řízení je tzv. signální plán určující délky světelných signálů pro jednotlivá návěstidla. Některé křižovatky mají sestaveno hned několik signálních plánů, které se v průběhu času mění, jiné přizpůsobují signální plán aktuálním dopravním podmínkám. Posledním způsobem řízení je jeden pevný signální plán. Signální plány je možné sestavit několika způsoby na základě různých výpočtových metod. V návaznosti na problematiku tvorby signálních plánů je třeba si položit otázku: Je aktuální způsob řízení křižovatky optimální? Bylo by možné signální plán nějakým způsobem upravit s ohledem na zlepšení propustnosti dané křižovatky, s ohledem na snížení počtu zastavení projíždějících vozidel, s ohledem na zkrácení doby zdržení, atd.? Při hledání odpovědi na tyto otázky lze využít experimentální výzkumné techniky modelování a simulace, která umožňuje mj. posuzovat možnosti současných dopravních řešení, ověřit funkčnost či vhodnost budoucích dopravních řešení.

Rozvoj výpočetní techniky a nárůst výpočetního výkonu umožnil vznik sofistikovaným simulačním nástrojům, ve kterých je možné věrohodně namodelovat zkoumaný problém a následně nad tímto modelem provést sérii simulačních experimentů. Pro posouzení různých dopravních řešení je možné například měnit vlastnosti chování modelu, jednotlivé

prvky modelu nebo způsob řízení dopravní situace. Provedené experimenty poskytnou různé dopravně-inženýrské ukazatele. Na základě statistického vyhodnocení získaných ukazatelů je možné vyvodit potřebné závěry, které pomáhají při rozhodování volby určitého dopravního řešení.

Na trhu jsou k nalezení různé simulační nástroje od tzv. univerzálních, které jsou použitelné pro široké spektrum řešených problémů, až po specializované simulační nástroje, které jsou uplatnitelné přímo na konkrétní problematiku svého oboru (např. simulace silniční dopravy, železniční dopravy, apod.) s cílem poskytnout co nejpřesnější výsledky řešeného problému.

Tato diplomová práce se zabývá posouzením různých způsobů řízení vybrané světelně řízené křižovatky právě pomocí experimentální výzkumné techniky modelování a simulace. Simulační experimenty budou provedeny ve španělském simulačním nástroji AIMSUN, který se specializuje na simulaci v oblasti silniční dopravy. Součástí diplomové práce je též vlastní dopravní průzkum zjišťující současné intenzity dopravy pro vybranou křižovatku. Na základě dopravního průzkumu budou vypočteny alternativní signální plány.

# 1 Cíle diplomové práce

Hlavním cílem diplomové práce je posouzení alternativních signálních programů světelného signalizačního zařízení vybrané křižovatky v období nejvyššího dopravního zatížení za pomoci experimentální výzkumné metody počítačové simulace. Pro realizaci simulačních experimentů byl zvolen specializovaný silniční simulátor Aimsun.

Díličmi cíli jsou:

- analýza současného stavu řízení vybrané křižovatky,
- zjištění intenzit vozidel projíždějících daným segmentem silniční sítě,
- statistické zpracování zjištěných intenzit,
- návrh a ověření alternativních signálních programů,
- posouzení alternativních signálních programů – zejména vlivu délky cyklu a délky signálních dob volna na propustnost segmentu silniční sítě,
- statistické zpracování výstupů simulačního modelu a jejich porovnání se současným stavem.

## 2 Principy návrhu SSZ

Při návrhu světelných signalizačních zařízení (semaforů) je nezbytné se řídit stanovenými pravidly, která jsou dána technickými podmínkami [13] a technickými normami (ČSN). Tato kapitola seznamuje se základními informacemi nezbytnými pro návrh SSZ a tím poskytuje teoretický základ pro výpočet a sestavení signálního plánu světelně řízené izolované křižovatky. Kapitola se nezabývá dopravním řešením křižovatky, technickou konstrukcí SSZ a technickým provedením vybraného SSZ, ale jen činností SSZ ve spojení s řízením silničního provozu. Hlavním zdrojem informací pro tuto kapitolu jsou [3] a [13].

### 2.1 Řízení dopravy pomocí SSZ

Světelně řízené křižovatky se používají zejména pro zlepšení plynulosti silničního provozu nebo pro zvýšení bezpečnosti silničního provozu. Při rozhodování o zřízení světelně řízené křižovatky je třeba vycházet z dopravních průzkumů (intenzity dopravy, rozbor nehodovosti).

Doprava v rámci takové křižovatky je řízena pomocí světelných signálů, které opravňují účastníky silničního provozu k určitému pohybu v křižovatce. Pořadí a délka jednotlivých světelných signálů je dána tzv. signálním plánem, který tvoří jednoznačně daný časový rozvrh křižovatky. V případě dynamického řízení křižovatky je takový rozvrh buď přizpůsobován dopravním podmínkám anebo je přímo tvořen řadičem SSZ. Při tvorbě signálního plánu je rozhodující doba, po kterou na jednotlivých návěstidlech svítí zelené signály. Ostatní barevné signály lze jednoznačně odvodit právě na základě zelených signálů „volno“. Signály, které v daném časovém okamžiku svítí stejnou barvou, tvoří tzv. signální skupiny (signální skupinou jsou například návěstidla na obou stranách přechodu, na kterých svítí vždy společně červená nebo zelená). Doba, během které svítí zelené pro zpravidla vzájemně nekolizní skupiny, se nazývá fáze. Jednotlivé fáze následují za sebou a tvoří cyklus, který se stále opakuje.

## 2.2 Způsoby řízení SSZ

SSZ mohou být řízena různými způsoby:

### A Pevné řízení bez možnosti zásahu do signálního programu

- pevný signální program dle aktuálních dopravních nároků

### B Rozhodování v průběhu signálního programu

– dynamické řízení (dopravně závislé)

- modifikace signálního programu
  - proměnná délka volna
  - změna pořadí fází
  - vkládání fáze na výzvu
- tvorba signálního programu
  - volná měnitelnost parametrů signálního zařízení

### C Rozhodování při řízení mimo průběh signálního programu

– volba z několika signálních programů a režimů řízení

- časově závislá – dle předem stanoveného časového nastavení programů
- dopravně závislá – dle aktuálních dopravních nároků v reálném čase
- kombinace obou předchozích kritérií

## 2.3 Návrh signálního plánu křižovatky – souhrnný postup

Popsaný postup je použit pro výpočet signálních plánů v kapitole 7. Návrh řízení světelné křižovatky se skládá z několika kroků:

- podklady a průzkumy (územní plány, rozbory dopravy),
- výpočet tabulky mezičasů,
- nalezení všech možných fází, které mohou nastat
- vyloučení fází, které nejsou vhodné pro zvolený způsob řízení
- sestavení fázového schéma (pořadí fází),
- stanovení délky cyklu řízení
- výpočet dob zelených pro jednotlivé signální skupiny různými metodami,
- sestavení signálního plánu.

Základním výpočtovým obdobím pro návrh signálního plánu i pro kapacitní posouzení křižovatky je 1 hodina.

Zásadním krokem při výpočtu signálního plánu je sestavení tabulky mezičasů, která určuje dobu mezi ukončením a začátkem signálu volno pro kolizní směry v křižovatce. Sestavení fázového schéma vychází z intenzit provozu na sledované křižovatce a je ovlivněno prostorovými možnostmi a uspořádáním křižovatky, dále je ovlivněno pravidly silničního provozu. Stanovení délky cyklu závisí na kapacitě křižovatky a časové ztrátě jednotlivých účastníků provozu na křižovatce. Vlastní výpočet (sestavení) signálního plánu je možno provést různými metodami. Získaný plán se zobrazuje graficky ve formě Ganttova diagramu.

### **2.3.1 Podklady a průzkumy**

Technické podmínky pro návrh SSZ vyžadují následující podklady a průzkumy:

- přehlednou situaci v měřítku 1:2000 – 1:5000, která zachycuje situaci organizace dopravy a rozmístění uzlů na komunikační síti, současná a plánovaná SSZ v okolí a jejich případné propojení do koordinovaných skupin,
- podrobnou situaci v měřítku 1:200 – 1:500, která detailně zachycuje problematiku místa – parametry křižovatky jako počty a délky jízdních pruhů pro řazení vozidel, příčný a podélný sklon komunikací, pěší provoz, cyklistickou dopravu, dopravní značení, zástavbu, sloupy, atd.
- údaje o skladbě a intenzitách dopravních proudů (např. osobních vozidel, nákladních vozidel, pěších, ...) vstupujících do křižovatky a to v dopravních špičkách, sedlech včetně denních a týdenních průběhů intenzit provozu,
- rozbor nehodovosti – zhodnocení statistiky počtu nehod za několik let zpět rozlišené dle druhů a následků nehod.

### **2.3.2 Výpočet tabulky mezičasů**

Mezičas je minimální nezbytná doba pro vyklizení vzájemně kolizních směrů v křižovatce. Během této doby musí poslední vozidlo, které může projet na končící zelenou, vyklidit kolizní prostor křižovatky dříve, než tohoto prostoru dosáhne vozidlo z jiného směru.

Je nezbytné stanovit mezičasy pro všechny dvojice kolizních směrů. Mezičasy se počítají na základě délky najížděcích a vyklizujících drah, délky vozidel a rychlosti vozidel, případně chodců. K výsledné hodnotě je připočtena bezpečnostní doba.

Aby nedošlo k opomenutí některého z mezičasů je vhodné sestavení tabulky kolizí pro sledovanou křižovatku, do které se zaznamenají všechny střety, křížení, připojení vozidel nebo chodců. Kolizní tabulku lze získat zakreslením drah všech pohybů v křižovatce do plánu křižovatky. Místa protnutí zakreslených drah jsou kolizní body. Všechny nalezené body musí být zaznamenány do tabulky.

Výpočet mezičasů je třeba provést s nejvyšší pečlivostí, protože je klíčový pro bezpečnost provozu na světelné křižovatce.

### **2.3.3 Stanovení počtu fází a pořadí fázových přechodů**

Počet fází vychází z rozdělení jednotlivých dopravních pohybů v křižovatce. Minimální počet fází pro řízení SZZ je 2. Odbočující dopravní proudy jsou podmíněně kolizní a účastníci silničního provozu se musí řídit pravidly silničního provozu. Pro bezkolizní řízení všech dopravních proudů v křižovatce je třeba min. 3 fází na tříramenné a min. 4 fází na čtyřramenné křižovatce. S narůstajícím počtem fází klesá výkonnost křižovatky – zvyšují se ztrátové časy potřebné pro vyklizení kolizních ploch a narůstá zdržení vozidel. Z těchto důvodů by se mělo upřednostňovat řešení s minimálním počtem fází. Pro nalezení takového řešení lze použít např. metodiku založenou na teorii grafů, která je popsána v následující podkapitole.

### **2.3.4 Přidělení zelené maximální fázové skupině**

Tato metoda byla získána z [3] a slouží pro nalezení maximálních fázových skupin (maximální množina vstupních proudů křižovatky má zelenou), čímž je zajištěno nejvhodnější využití kapacity křižovatky.

Pro vybranou křižovatku je nezbytné definovat množinu signálních skupin  $S = \{s_1, \dots, s_n\}$ . Dále je třeba rozhodnout, které dvojice signálních skupin jsou v kolizním a které dvojice v bezkolizním vztahu. Signálním skupinám v bezkolizním vztahu mohou najednou svítit zelené, signálním skupinám v kolizním vztahu ne.



Na množině  $S$  lze definovat neorientovaný graf bezkoliznosti  $GB = (S, H)$ , kde  $H$  je množina všech bezkolizních dvojic prvků množiny  $S$ . Pokud je graf  $G_1 = (S_1, H_1)$  kompletní podgraf grafu  $GB$ , potom určuje jednu fázi cyklu v signálním plánu. To znamená, že všechny signální skupiny z množiny  $S_1$  mohou mít najednou zelenou a jsou označovány jako fázová skupina. Pokud je  $G_1$  maximálním kompletním podgrafem – takovým grafem, ke kterému nelze dodat žádný další vrchol, aniž by se narušila kompletnost podgrafu  $G_1$  – bude nazván klikou. V takovém případě je nalezená fázová skupina maximální v tom smyslu, že již není možné doplnit žádnou signální skupinu, aniž by vznikla kolize. Přidělení zelené maximální fázové skupině je výhodné, protože se efektivně využije čas – maximální skupina vstupních proudů má zelenou. Dále je třeba nalézt co nejmenší množství (maximálních) fázových skupin takových, aby každá signální skupina byla alespoň v jedné z nich, z důvodu maximálního využití kapacity křižovatky. Mezi každou změnou z jedné fáze do druhé je třeba dodržet vyklizovací časy kolizních směrů, které jsou úměrné délce drah a rychlosti vozidel (chodců) v těchto směrech. Takový čas je nevyužitý a zkracuje doby zelených v rámci celého cyklu.

### 2.3.5 Optimalizace fázových skupin

Cílem optimalizace je nalézt maximální přirozené číslo  $n$  a maximální fázové skupiny  $S_1, \dots, S_n$  tak, aby každá signální skupina byla alespoň v jedné z fázových skupin  $S_1, \dots, S_n$ .

1. Sestavení grafu bezkoliznosti a nalezení maximálních fázových skupin. Graf bezkoliznosti lze sestavit z tabulky mezičasů, kde jsou zaznamenány všechny signální skupiny. Graf má právě tolik vrcholů, kolik je signálních skupin. Vrcholy, které jsou bezkolizní (v tabulce mezičasů mají prázdné místo) jsou spojeny hranou. V grafu je nutné nalézt všechny kliky (tzn. maximální kompletní podgrafy). Jejich množiny vrcholů určují možné fázové skupiny.
2. Sestavení pokrývací matice  $P$  a nalezení minimální pokrývací množiny. Z možných fázových skupin je třeba sestavit pokrývací matici. Matice vychází z grafu bezkoliznosti. Pokud jsou jednotlivé vrcholy grafu bezkoliznosti spojeny hranou, zapíše se do tabulky jednička. Získaná tabulka se dále redukuje pomocí ruční heuristiky, dokud není nalezena výsledná tabulka. Ruční heuristika uvedená v [3] vychází z následujících kroků:

### **Krok 1**

Pokud je v některém sloupci matice  $P$  jediná jednička, pak je řádek (příslušná fázová skupina), ve kterém se jednička nachází, vybrán do výsledného řešení. Tento řádek a současně sloupec jsou z matice vyřazeny. Dále jsou vyřazeny všechny sloupce, ve kterých je ve vybraném řádku jednička.

### **Krok 2**

„Mají-li pro nějakou dvojici  $i, j$ ,  $i$ -tý a  $j$ -tý řádek matice tu vlastnost, že v každém sloupci, kde je jednička v  $i$ -tém řádku je i jednička v  $j$ -tém řádku (nepřesně řečeno množina jedniček v  $i$ -tém řádku je podmnožinou množiny jedniček v  $j$ -tém řádku) je  $i$ -tý řádek z matice  $P$  vynechán.“

### **Krok 3**

Pokud je matice  $P$  stále nenulová a lze uplatnit některý z kroků 1 a 2, potom jsou tyto kroky uplatněny. Když žádný z předchozích kroků nelze uplatnit, je vybrán libovolný zatím nevybraný řádek do definitivního řešení. Tento řádek představuje příslušnou fázovou skupinu a je odstraněn společně se stejně označeným sloupcem. Dále jsou vyřazeny všechny sloupce, které mají v odstraněném řádku jedničku. Postup je ukončen ve chvíli, kdy je matice  $P$  nulová.

Pozn.: Heuristika může vést k více než jednomu řešení. Může tedy být nalezeno i více minimálních množin fázových skupin.

## **2.3.6 Určení pořadí fázových skupin**

Pro určení pořadí fázových skupin je třeba vytvořit všechny možné kombinace přechodů jednotlivých fází tak, jak budou následovat v cyklu. Následuje posouzení sledu fází, přičemž je třeba vyloučit nevhodné přechody. Sled fází nesmí odporovat pravidlům silničního provozu – určité fáze musí probíhat za sebou tak, aby plynule navazovaly zelené a aby nedocházelo ke zdržení z důvodu nahromadění vozidel v křižovatce. Pořadí fází může ovlivnit sled dob zelených pro chodce a cyklisty, může určovat požadavek koordinace signálních programů sousedních křižovatek nebo preference hromadné dopravy.

Pro maximální využití kapacity křižovatky se volí takové pořadí fází, ve kterém je součet nejdelších mezer mezi fázemi minimální. Výsledné fázové skupiny a jejich přechody se zakreslí do grafu.

### 2.3.7 Stanovení délky cyklu

Dalším důležitým krokem v tvorbě signálního plánu je stanovení délky cyklu  $C$ , během které se vystřídají všechny fáze. Potřebná délka cyklu se stanoví jako součet dob zelených pro jednotlivé fáze  $t_z$  a nejdelších mezičasů  $t_m$  potřebných pro vyklizení kolizních směrů mezi fázovými přechody. Orientačními hodnotami pro výpočet délky cyklu dle [13] jsou: minimální 30 s, optimální 50 – 80 s, maximální 100 s (120 s).

$$C = \sum t_z + \sum t_m \text{ [s]} \quad [13]$$

### 2.3.8 Stanovení doby volna

Výpočet dob zelených vychází z intenzit dopravy pro jednotlivé směry křižovatky. Jednotlivým směrům je třeba rozdělit celkovou dobu volna na  $n$  časových úseků úměrných intenzitám provozu, kde  $n$  je dáno počtem fází.

Výpočty dob zelených lze provést různými metodami „ručně“, případně využít specializovaných softwarových nástrojů, které provedou výpočet automatizovaně na základě zadání všech potřebných vstupních dat.

„Ručně“ počítané metody jsou např.:

- metoda saturovaného toku,
- metoda spotřeby času,
- metoda iterační (postupného přibližování).

### 2.3.9 Okrajové podmínky

Technické podmínky Ministerstva dopravy pro návrh SSZ [13] dále stanovují několik tzv. okrajových podmínek, které je třeba dodržet při výpočtech dob volna a následné tvorbě signálních plánů. Uvedeny jsou pouze ty podmínky, které se týkají výpočtů pro tuto práci:

1. Minimální doby světelných signálů jsou:
  - volno (zelená) pro vozidla, chodce, cyklisty, tramvaje – 5 s,
  - pozor (žlutá) pro vozidla a cyklisty – 3 s.
2. Doba světelného signálu pozor (žlutočervená) pro vozidla – 2 s.
3. U pevných signálních plánů:
  - doba zelené pro vozidla v hlavním a přímém směru – min. 15 s,
  - doba zelené pro vozidla ve vedlejším směru – min. 10 s.
4. Doba zelené pro chodce by měla být alespoň taková, aby chodec během zelené přešel nejméně polovinu přechodu.

## **2.4 Návrh signálního plánu křižovatky – metody pro stanovení délky cyklu a délky zelených**

Výpočty dob zelených křižovatky Karla IV. – Jahnova jsou uvedeny v kapitole 7. Vstupními podklady pro výpočty délky cyklu a dob zelených jsou:

- údaje o křižovatce – rozdělení pohybů, poloměry zatáček, sklon vozovky, šířky pruhů,
- hodinové intenzity dopravy rozdělené dle jednotlivých směrů, přepočtené na jednotková vozidla,
- navržené fázové schéma,
- tabulka mezeitrasů.

Každá výpočtová metoda vychází z následujících vstupních dat: jednotlivé vjezdy a jejich signální skupiny, fáze příslušející k těmto signálním skupinám (případně fázové přechody pro iterační metodu), intenzity vozidel, šířka pruhu, podélný sklon vozovky, poloměr oblouku a podíl odbočujících vozidel.

### **2.4.1 Metoda saturovaného toku**

Podstatou této metody je výpočet tzv. saturovaného toku, což je maximální počet vozidel, která mohou projet jednotlivými pruhy za jednotku času. Tento průjezd je uvažován při ideálních dopravních podmínkách a záleží především na šířce vjezdu, podélném sklonu, poloměru oblouku a podílu odbočujících vozidel. Následuje výpočet saturovaných toků jednotlivých vjezdů, který se určí jako součin základního saturovaného toku a vlivu koefi-

cientů sklonu a oblouku. V případě více pruhů pro tentýž směr se saturovaný tok určí jako součet saturovaných toků jednotlivých vjezdů.

Na základě saturovaného toku a intenzitě projíždějících vozidel jednotlivými směry se vypočítá tzv. stupeň saturace pro jednotlivé vjezdy. Pro každou fázi je určen vjezd s nejvyšším saturovaným tokem, což indikuje nejvyšší intenzitu vozidel. Vjezd s nejvyšší intenzitou pro každou fázi stanovuje délku zelené, která je úměrná počtu projetých vozidel. Aby bylo možné stanovit délky zelených, je třeba nejprve určit délku cyklu. Délka cyklu vychází ze součtu nejvyšších saturovaných toků vjezdů pro jednotlivé fáze a nejdelších (rozhodujících) mezičasů potřebných pro vyklizení kolizních ploch mezi fázovými přechody. Výpočet stanoví minimální délku cyklu, optimální délku cyklu a konečnou reálnou délku cyklu. Po stanovení dob zelených pro jednotlivé fáze následuje stanovení kapacity jednotlivých vjezdů a posouzení rezervy kapacity. Pokud je výpočet shledán jako vyhovující, je možné sestavit signální plán.

#### **Veličiny použité pro výpočet:**

$I$ ...intenzita vjezdu [jv/h]	$I$ ...ztrátový čas ve fázi [s]
$S$ ...saturovaný tok vjezdu [jv/h]	$L$ ...ztrátový čas za cyklus [s]
$S_{zakl}$ ...základní saturovaný tok vjezdu [jv/h]	$z$ ...délka signálu zelené [s]
$S_{zakl (pruhu)}$ ...základní saturovaný tok pruhu [jv/h]	$z'$ ...délka efektivní zelené [s]
$Y$ ...stupeň saturace vjezdu	$Z_{min}$ ...min. délka zelené [s]
$Y$ ...celkový stupeň saturace	$t_m$ ...mezičas [s]
$š$ ...šířka řadicího pruhu [m]	$C$ ... cyklus [s]
$k_{sklonu}$ ...koeficient sklonu (1,0–0,8)	$C_{opt}$ ...optimální cyklus [s]
$k_{oblouku}$ ...koeficient oblouku (1,0–0,4)	$C_{str}$ ...strukturální cyklus [s]
$a$ ...podélný sklon vjezdu [%]	$C_{min}$ ...min. cyklus pro zadané intenzity [s]
$R$ ...poloměr oblouku odbočovacího pruhu [m]	$K$ ...kapacita vjezdu [jv/h]
$f$ ...podíl odbočujících vozidel z celkové intenzity vjezdu (0–1)	$Rez$ ... rezerva kapacity vjezdu [%]

Všechny veličiny a vzorce uvedené v této podkapitole byly čerpány z [13].

Vlastní výpočet metodou saturovaného toku probíhá následujícím způsobem (je uvažováno pouze s automobilovou dopravou):

1. Stanovení základního saturovaného toku pruhu pro obousměrné čtyř a více-pruhové komunikace (směrově rozdělené i nerozdělené) nebo jednosměrné dvou a více pruhové s jízdní rychlostí 50 – 60 km/h s kvalitním povrchem vozovky dle vztahu:

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

v ostatních případech

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

V případě šířky řadicího pruhu  $\check{s}_{pruhu} > 4$  m se dosadí šířka 4 m.

2. Základní saturovaný tok se vypočte jako součet saturovaných toků jednotlivých pruhů ( $n$ ...počet pruhů), pokud je vjezd tvořen více pruhu. V případě jednoho řadicího pruhu je základní saturovaný tok vjezdu roven základnímu saturovanému toku pruhu:

$$S_{zakl} = \sum_{i=1}^n S_{zakl (pruhu)} \text{ [jv/h]}$$

3. Pro stanovení saturovaného toku vjezdu je třeba stanovit koeficient sklonu a koeficient oblouku.

$$k_{sklonu} = 1 - 0,02 * a$$

Koeficient sklonu je vyjádřením vlivu podélného sklonu vjezdu na saturovaný tok. V případě, že je vjezd vodorovný nebo v klesání, pak je hodnota  $a = 0$ . Pokud je stoupání vjezdu větší, než 10 % je hodnota  $a = 10$ .

$$k_{oblouku} = \frac{R}{R + 1,5 * f}$$

Koeficient oblouku je vyjádřením vlivu poloměru oblouku  $R$  v případě odbočování vozidel a podílu odbočujících vozidel na saturovaný tok. Platí obecně

pro pravé i levé odbočení. Pro samostatný odbočovací pruh  $f=1$ , jinak se  $f$  vypočítá dle vztahu:

$$f = \frac{\text{intenzita odboč. vozidel [voz/h]}}{\text{celková intenzita vjezdu [voz/h]}}$$

Skutečný poloměr oblouku lze zadat v případě, že:

- pravé odbočení není výrazně ovlivněno souběžně přecházejícími chodci,
- pro levé odbočení je vyhrazen samostatný pruh,
- existuje společný řadicí pruh pro levé odbočení a přímý směr nebo odbočení vpravo. Tento směr nesmí být ovlivněn protijedoucími vozidly.

V ostatních případech (odbočující vozidla ve společném pruhu dávají přednost protijedoucím vozidlům nebo jsou ovlivněny chodci) je zadáván fiktivní poloměr oblouku dle [13], strana 59.

Součin základního saturovaného toku, koeficientu sklonu a koeficientu oblouku tvoří saturovaný tok vjezdu.

$$S_{vjezdu} = S_{zakl} * k_{sklonu} * k_{oblouku} \text{ [jv/h]}$$

#### 4. Stanovení stupně saturace a ztrátových časů.

$$y = I/S$$

Následuje výběr vjezdů s nejvyšším stupněm saturace  $y_{max}$  pro každou fázi. Součet nejvyšších stupňů saturace pro  $i$ -tou fázi tvoří celkový stupeň saturace kritických (rozhodujících) vjezdů, kde  $n$  je počet fází.

$$Y = \sum_{i=1}^n y_{max i}$$

Výpočet ztrátového času pro každou fázi vychází z předpokladu, že v každé fázi je produktivní tzv. efektivní zelená  $z'$ , což je doba, během které projíždí vozidla stopčárou v saturovaném toku (s odečtením doby potřebné na rozjezd vozidel a přičtením průjezdu na žlutou):

$$z' = z + 1 \text{ [s]}$$

Vlastní ztrátový čas je doba mezi ukončením zelené v předchozí fázi a začátkem zelené v následující fázi. Pro určení ztrátového času se nevyužívá tabulky mezičasů, protože ztrátový čas se určuje podle skutečného mezičasu mezi fázovými přechody u kritických vjezdů dle strukturálního (případně minimálního či reálného) signálního plánu. Výpočet ztrátového času:

$$l = t_m - 1 \text{ [s]}$$

Sečtením všech ztrátových časů pro každou fázi je získán celkový ztrátový čas  $L$  za cyklus:

$$L = \sum_{i=1}^n l_i = \sum_{i=1}^n t_{mi} - n \text{ [s]}$$

$i$ ... $i$ -tá fáze,  $n$ ...počet fází,  $l_i$ ...ztrátový čas pro  $i$ -tou fázi,  $t_{mi}$ ...mezičas mezi kritickými vjezdy.

5. Výpočet strukturálního cyklu  $C_{str}$ , který je nezávislý na intenzitách projíždějících vozidel. Strukturální cyklus se vypočítá jako součet minimálních dob zelených pro všechny fáze, která činí 5 sekund a délky rozhodujících mezičasů:

$$C_{str} = \sum_{i=1}^n (z_i + t_{mi}) \text{ [s]}$$

$i$ ... $i$ -tá fáze,  $n$ ... počet fází,  $z_i$ ...minimální přípustná doba zelené 5 s,  $t_{mi}$ ...nejdelší mezičas při přechodu do následující fáze.

Na základě výpočtu strukturálního cyklu je možné sestavit strukturální signální plán, který se sice pro řízení nepoužívá, ale je z něho možné odvozovat reálné signální plány a je vhodným podkladem pro návrh dynamického řízení křižovatky.

6. Výpočet minimální délky cyklu  $C_{min}$ . Minimální cyklus je závislý na intenzitách projíždějících vozidel, fázovém schématu, mezičasech a je nejkratší



možnou dobou projíždění vozidel pro požadovanou rezervu  $Rez$  kapacity kritických vjezdů v jednotlivých fázích.

$$C_{min} = \frac{L}{1 - Y * \frac{100}{100 - Rez}} [s]$$

Minimální cyklus se nevyužívá pro řízení křižovatky, ale slouží pro posouzení:

- zda dopravní řešení křižovatky kapacitně vyhoví počtu projíždějících vozidel
- při rozhodování o délce cyklu při návrhu koordinace řízení SZZ.

Pro kapacitní posouzení se do výpočtu  $C_{min}$  zadá požadovaná rezerva 0 %. Pokud  $C_{min}$  vyjde vyšší, než 120 sekund, je třeba hledat jiné dopravní řešení. V opačném případě dopravní řešení křižovatky vyhovuje.

7. Návrh optimálního a reálného cyklu izolované křižovatky. Optimální cyklus slouží pro výpočet reálného cyklu a je takovým cyklem, při kterém je zdržení náhodně přijíždějících vozidel minimální (za daných podmínek). Optimální cyklus je závislý na fázovém schématu, mezičasech a intenzitách provozu.

$$C_{opt} = \frac{1,5 * L + 5}{1 - Y} [s]$$

Pro stanovení reálného cyklu je možné optimální cyklus upravit (úprava se provádí např. z důvodu vyklizovacích časů chodců) a to následujícím přepočtem:

$$0,75 C_{opt} < C < 1,5 C_{opt} [s]$$

V rozmezí  $0,75 - 1,5 C_{opt}$  se reálný cyklus blíží cyklu optimálnímu, z čehož plyne, že časové ztráty přijíždějících vozidel se příliš nemění.

Délka skutečného cyklu by neměla být vyšší než 100 s. Tato hodnota je brána jako hraniční. V opodstatněných případech lze prodloužit délku cyklu na max. 120 sekund. Při délce cyklu nad 120 sekund neúměrně narůstá zdr-

žení jednotlivých účastníků provozu. Neúměrné zdržení může mít negativní dopad na chování účastníků silničního provozu.

8. Výpočet dob zelených pro izolovanou křižovatku se provede dle vzorce:

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

Délky zelených se počítají pro kritické (nejvýše zatížené) vjezdy v jednotlivých fázích. Tyto „nejdelší“ zelené pro každou fázi určují optimální dobu zelené v dané fázi.

K délkám zelených kritických vjezdů se dle tabulky mezičasů dopočítají délky zelených pro ostatní nekritické vjezdy. Tímto byly dokončeny veškeré výpočty pro automobilovou dopravu. Dále se doplní doby volna chodců, případně cyklistů nebo tramvajů.

9. Návrh minimálních zelených. Minimální zelená pro danou intenzitu jednotlivých vjezdů je nejkratší možná doba zelené pro automobilovou dopravu, která kapacitně vyhoví s požadovanou rezervou  $Rez \geq 0$  [%].

$$z_{min} = \frac{I * C}{S} * \frac{100}{100 - Rez} - 1 \text{ [s]}$$

Minimální délka zelené  $z_{min}$  se zaokrouhluje nahoru na celé sekundy.

V praxi se používá pro výpočet:

- dob zelených v minimálním cyklu,
- minimálních hodnot zelených při návrhu dynamického řízení,
- zelených pro SSZ v koordinaci,
- zelených u nepreferovaných vjezdů pokud je třeba zvýhodnit některé vjezdy na úkor jiných (např. preference MHD).

10. Posouzení kapacity jednotlivých vjezdů, které se provede srovnáním poptávaných intenzit dopravy s kapacitami jednotlivých vjezdů. Kapacita jednotlivých vjezdů se stanoví na základě saturovaného toku vjezdu, doby zelené a délky cyklu. Výpočet je proveden pro hodinový interval. Dopravní řešení

lze sledat jako vyhovující, pokud je kapacita všech vjezdů vyšší než intenzita dopravy, tzn. rezerva kapacity vjezdu je vyšší než 0.

### 2.4.2 Metoda spotřeby času

Metoda spotřeby času upravuje intenzity jednotlivých dopravních směrů vynásobením tzv. koeficientem faktoru, který zohledňuje povahu silniční komunikace pro určitý směr křižovatky. Výsledné tzv. výpočtové zatížení je zohledněno ve výpočtu délky cyklu a současně ve výpočtu délky zelených pro jednotlivé fáze.

Výchozím výpočtem je stanovení fiktivního tzv. výpočtového zatížení  $M$  pro jednotlivé vjezdy křižovatky.

$$M = \frac{I * k}{n} \text{ [jv/h]}$$

$I$  je intenzita posuzovaného dopravního směru [jv/h],  $k$  je výsledný koeficient faktoru posuzovaného směru a  $n$  je počet řadicích pruhů pro tento směr. Koeficient faktoru  $k$  se vypočítá jako součin níže uvedených faktorů, ale neměl by být vyšší než 1,43.

šířka řadicího pruhu:

2,75 m	1,15
3,0 – 3,5 m	1,0
3,75 m	0,85

odboč. a přímo jedoucí voz. v jednom řad. pruhu:

odbočujících 10 %	1,05
20 %	1,1
30 % a více	1,2

sklonové poměry:

+3,5 %	1,1
+5,0 %	1,15
-3,5 %	0,9
-5,0 %	0,85

počet řadicích pruhů pro tentýž směr a vjezd:

2 pruhy 3,5 m	1,05
2 pruhy 3,0 m	1,1
2 pruhy 3,0 m	1,15

poloměr odbočování:

10 m	1,15
15 m	1,1
30 m	1,05

vozidla odbočující současně s přecházejícími chodci, zatížení přechodu:

slabé	1
střední	1,1
silné	1,2

Délka výpočtového cyklu  $C_V$  se vypočte dle vzorce:

$$C_V = \frac{\sum tm}{1 - \frac{\sum M}{S}} \text{ [s]}$$

$\sum tm$  [s] je součet kritických (nejdelších) mezičasů mezi jednotlivými fázovými přechody,  $\sum M$  [jv/h] je součet rozhodujících výpočetních zatížení (nejvytíženějších vjezdů) pro každou fázi,  $S$  [jv/h] je saturovaný tok, který se volí jako konstantní hodnota 1400 – 1800 jv/h. Délku výpočtového cyklu lze dále navýšit o cca 5 – 10 %.

$$C = 1,05 \text{ až } 1,1 C_V \text{ [s]}$$

Doby zelených  $Z_i$  pro jednotlivé  $i$ -té fáze se vypočítají jako:

$$Z_i = \frac{C}{S} * M_i \text{ [s]},$$

kde  $M_i$  [jv/h] je rozhodující (nejvyšší) výpočtové zatížení  $i$ -té signální skupiny,  $C$  [s] je délka cyklu a  $S$  [jv/h] saturovaný tok.

Výpočet je zakončen posouzením kapacity  $K_i$  [jv/h] pro jednotlivé vjezdy dle vztahu:

$$K_i = \frac{S}{C} * Z_i \text{ [jv/h]}$$

Hodnoty  $C$  a  $S$  mají stejný význam jako v předchozím případě.

Sestavení signálního plánu probíhá obdobným způsobem jako v případě metody saturovaného toku.

Všechny vzorce použité v této podkapitole byly čerpány z [6].

## **2.5 Vyhodnocování parametrů SSZ**

### **Počet zastavení**

Minimalizací počtu zastavení lze mj. dosáhnout: zlepšení komfortu jízdy, snížení množství emisí a hluku, snížení spotřeby pohonných hmot.

### **Cestovní doba a doba zdržení**

Minimalizací cestovní doby a doby zdržení lze mj. docílit: plynulejšího provozu dopravních prostředků, úspory času účastníků dopravy, snížení emisí.

### **Délka kolon dopravní kongesce**

Minimalizací délky kolon dopravní kongesce lze mj. dosáhnout: snížení množství emisí a hluku, omezení stresových situací pro řidiče vozidel.

## **3 Modelování a simulace jako experimentální výzkumná metoda**

Tato kapitola vysvětluje základní pojmy a principy problematiky modelování a simulace, jakožto experimentální výzkumné metody, s cílem poskytnout teoretický základ pro simulační studii. Náplní simulační studie je tvorba modelu segmentu silniční sítě – konkrétně stykové světelně řízené křižovatky a jejího okolí. Zdrojem informací pro tuto kapitolu byly elektronické sylaby [6] a elektronická skripta [9].

### **3.1 Principy modelování a simulace**

Experimentální výzkumná metoda modelování a simulace se zabývá zkoumáním objektů skutečného světa. Takové objekty buď v reálném světě existují (např. segment silniční sítě) anebo by existovat mohly (např. plánovaný segment silniční sítě). Pro potřeby modelování a simulace jsou uvažovány pouze ty aspekty zkoumaného objektu, které jsou významné z pohledu řešeného problému. Tyto aspekty musí být vybírány takovým způsobem, aby byly pro daný technický obor zvládnutelné. Nedůležité aspekty zkoumaných objektů se zanedbávají – říká se, že se od nich abstrahuje. Abstrakce jsou v modelování a simulacích nazývány systémy. Lze tedy napsat, že na objektech zkoumání jsou vymežovány systémy. I přes abstrakci od některých aspektů je nutné uvažovat o jejich existenci v souvislosti se vztahy ke zkoumaným objektům – takové objekty jsou nazývány okolím systému.

Systém, ve kterém se zanedbává od významu času, je nazýván statickým systémem. V opačném případě, pokud nezanedbáváme význam času ve smyslu „newtonovské“ fyziky, je systém nazýván dynamickým. Simulace se zabývá pouze dynamickými systémy.

Systém se skládá z jednotlivých prvků. Tyto prvky mohou být buď permanentní, které jsou v systému po celou dobu jeho existence nebo temporární (dočasné), které po dobu existence systému vznikají a zanikají (nejčastěji do systému vstupují a následně systém opouští). Temporární entity se dále dělí na endogenní entity, které vznikají v systému samotném a exogenní entity, které vznikají v okolí systému. Každý prvek v systému má své specifické vlastnosti, kterým se říká atributy. Atributy mohou být různých typů (aritmetický, textový, booleovský, referenční) a jejich hodnoty se mohou v průběhu času měnit. Prvky, které do systému vstupují a následně jej opouštějí, se nazývají transakcemi.

Časová existence dynamického systému je množina okamžiků, ve kterých dynamický systém existuje. V každém okamžiku  $t$  existence dynamického systému je systém v určitém stavu, který je určen prvky, které jsou v čase  $t$  v systému přítomny a hodnotami jejich atributů v čase  $t$ . Stav je též ovlivněn relacemi mezi prvky.

Termín model označuje spojitost mezi dvěma systémy a to modelovaným a modelujícím. Vztah mezi oběma systémy určuje přiřazení každého prvku  $P_O$  původního (originálního) systému k prvku  $P_M$  systému modelujícího. Dále každému atributu  $a_O$  prvku  $P_O$  je přiřazen atribut  $a_M$  prvku  $P_M$ . Mezi hodnotami atributů  $a_O$  a  $a_M$  (originálního a modelujícího systému) je nějaká relace.

Pokud jsou oba systémy (modelovaný i modelující) statické, je model označován jako statický. Statické modely nemají v simulacích uplatnění. Tzv. simulační model musí splňovat následující požadavky [9]:

- Modelující i modelované systémy jsou dynamickými systémy.
- Existuje zobrazení  $\tau$  existence modelovaného systému (originálu) do existence modelujícího systému. Je-li  $t_1$  okamžik, v němž existuje modelovaný systém  $M_1$ , je mu přiřazen okamžik  $\tau(t_1) = t_2$ , v němž existuje modelující systém  $M_2$ , a tak je zobrazením  $\tau$  přiřazen i stavu  $S_1(t_1) = \sigma_1$  systému  $M_1$  stav  $S_2(t_2) = \sigma_2$  systému  $M_2$ .
- Mezi stavy  $\sigma_1$  a  $\sigma_2$  jsou splněny požadavky na vztahy mezi prvky a jejich atributy, jako kdyby každému stavu  $\sigma_1$  modelovaného systému odpovídal stav  $\sigma_2$  modelujícího systému tak, že oba stavy jsou ve vztahu statického modelu.
- Zobrazení  $\tau$  je neklesající. Pokud nastane stav  $s_O$  modelovaného systému před stavem  $s^*_O$  téhož systému, pak stav, který odpovídá v modelujícím systému stavu  $s$ , nastane před stavem, který odpovídá stavu  $s^*_M$ , nebo mohou nastat oba stavy současně. Nikdy nesmí být časové pořadí stavů v modelovaném a jim odpovídající pořadí v modelujícím systému obráceno.

Model je strukturou vázající dva systémy včetně jejich prvků a atributů. V případě simulačních modelů jsou vázány i existence obou systémů. Modelovaný systém bývá označován jako originál. Pro simulační modely se používá označení simulovaný a simulující systém (místo modelovaný a modelující).

Podstatou modelování dle [9] ve smyslu výzkumné techniky je náhrada zkoumaného systému jeho modelem (přesněji systémem, který jej modeluje) s cílem získat pomocí pokusů s modelem informace o původním zkoumaném systému.

Dle [9] je simulace výzkumná technika, jejíž podstatou je náhrada zkoumaného dynamického systému jeho simulátorem s tím, že se simulátorem se experimentuje s cílem získat informace o původním dynamickém zkoumaném systému.

Realizace experimentů pomocí simulátoru s cílem získat informace o původním systému může být výhodná např. z hlediska úspory času, úspory financí, možnosti predikce, možnosti sledování run-time animace atd.

Dynamické vlastnosti systému – plynutí času a změny systému v čase jsou realizovány pomocí aktivit a procesů. Základní akční jednotkou simulace je aktivita, která je obrazem určité činnosti v simulovaném systému (např. obslužení zákazníka v obchodě). Aktivita má dané časové trvání, může měnit stav systému. Běh simulačního nástroje je realizován vykonáváním jednotlivých aktivit a to v takovém pořadí, v jakém jsou tyto aktivity vykonávány v simulovaném systému. Z hlediska časové existence aktivit jsou rozeznávány dva druhy aktivit – spojité a diskrétní. Časová existence spojitě aktivity je charakterizována intervalem reálných čísel  $\langle t_1, t_2 \rangle$ , po tuto dobu se může měnit stav systému. Spojité aktivity se realizují, pokud je potřeba sledovat dynamiku entity v závislosti na jejích vlastnostech a okolních podmínkách. Diskrétní aktivita existuje pouze v okamžiku jejího ukončení, je charakterizována jednoprvkovou množinou reálných čísel. Ke změně stavu systému tedy může dojít pouze v okamžiku ukončení aktivity. Pokud dojde k ukončení diskrétní aktivity a následné změně stavu dynamického systému, je tento okamžik nazván událostí. Termínem proces je označována posloupnost přirozeně na sebe navazujících aktivit, které společně tvoří logický celek.



## Počítačová simulace

Před příchodem počítačové simulace byly simulátory realizovány na speciálních zařízeních, podle kterých dostala simulace svůj specifický název: mechanická, odporová, galvanická. V současné době se používá téměř výhradně počítačové simulace, která je označována jako číslicová (anglicky digital simulation), proto se označení číslicová příliš nepoužívá a mluví se jen o simulaci.

Počítačovou simulaci lze klasifikovat z hlediska charakteru simulovaného systému. Simulace je označována jako spojitá, pokud se hodnoty systému mění v čase pouze spojitě. Pokud v systému nenastávají spojitě změny v čase, je systém označován jako diskrétní. Třetím typem je systém kombinovaný s vlastnostmi typickými jak pro dynamické, tak i statické systémy.

Posloupnost simulačních pokusů mající stejný účel se nazývá simulační studie. Pokus se simulačním modelem je nazýván simulačním pokusem (simulačním experimentem). V rámci simulačního experimentu lze sestavit různé scénáře definující parametry simulačního experimentu (vstupní parametry, parametry výpočtu, ...). V průběhu simulačního pokusu je třeba evidovat čas tak, aby odpovídal výpočtu v simulovaném systému. Protože hodnota simulačního času musí být neklesající, bylo doporučeno použití názvu simulární čas. Místo tohoto doporučeného termínu se používá více rozšířený, ale ne zcela přesný termín simulovaný čas. Termín simulační krok se používá pro časový úsek výpočtu, během kterého se nemění hodnota simulovaného času. Pokud má simulační krok stále stejné přírůstky po celou dobu simulačního pokusu, pak se simulovaný čas označuje jako ekvidistantní, v opačném případě jako neekvidistantní.

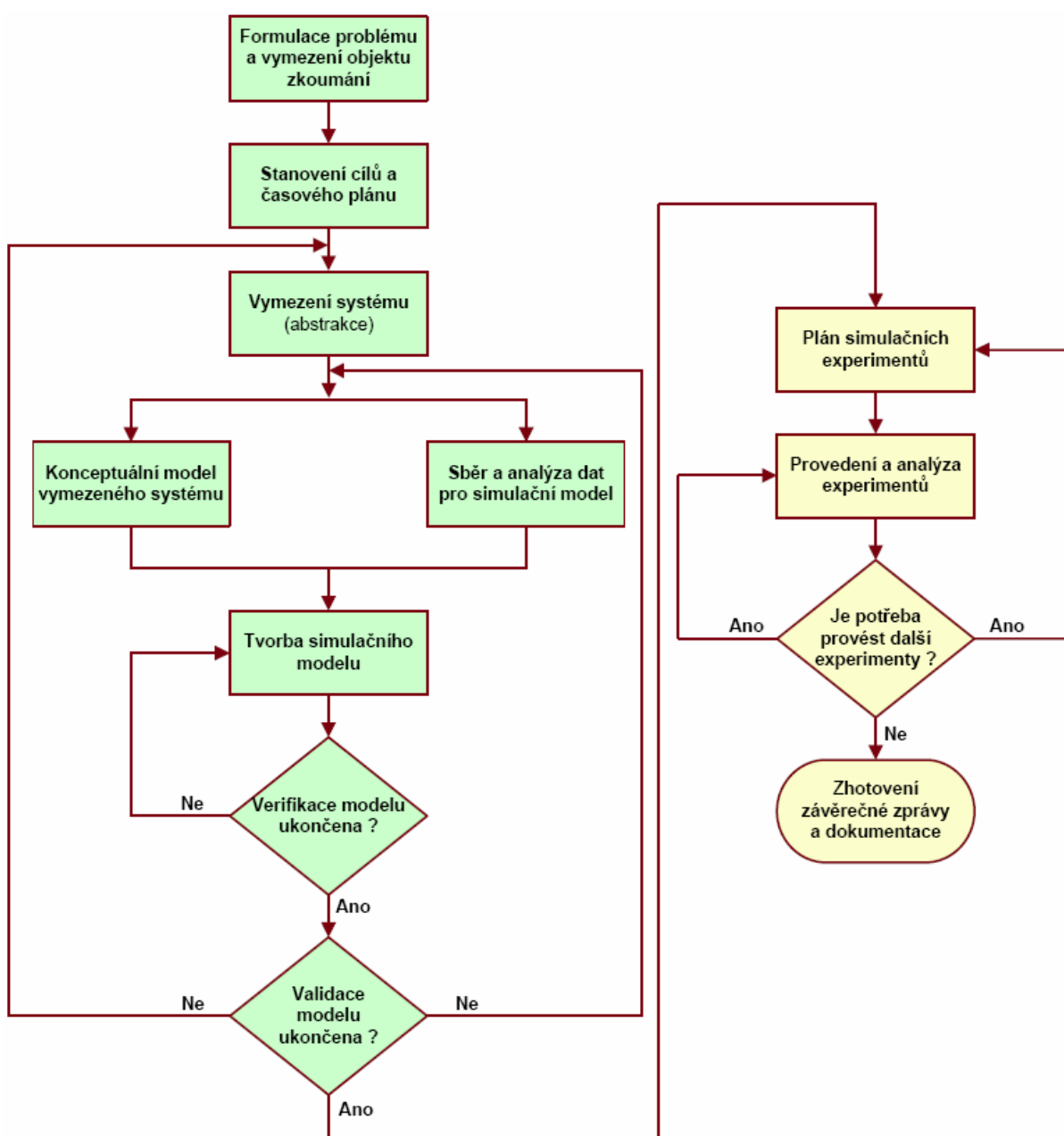
### 3.2 Životní cyklus simulační studie

Simulační studie je tvořena ze dvou etap, z nichž každá etapa se skládá z několika dílčích kroků. První etapa simulační studie je zaměřena na návrh a tvorbu simulačního modelu. V rámci druhé etapy jsou prováděny různé simulační experimenty s cílem získat odpovědi na otázky spojené s objektem zkoumání. Životní cyklus simulační studie je znázorněn na obrázku 1.

## První etapa

### Formulace základních problémů a vymezení objektu zkoumání

V počáteční fázi projektu jsou formulovány základní problémy, pro jejichž vyřešení by mohlo být vhodné nasazení výzkumné metody modelování a simulace. Formulované problémy je třeba důkladně zvážit pro získání odpovědi na otázku, zda je metoda modelování a simulace pro řešený typ problému vhodná a zda je možné metodu modelování a simulace úspěšně aplikovat. Pokud je možné metodu modelování a simulace aplikovat, je třeba, provést vymezení objektu zkoumání.



Obrázek 1: Životní cyklus simulační studie. Zdroj[6].

## **Stanovení cílů a časového plánu**

V této fázi je nezbytné stanovit jednoznačné cíle simulační studie. Cíle stanovují otázky, na které je třeba nalézt odpovědi. Po vymezení objektu zkoumání a stanovení cílů simulační studie následuje sestavení časového plánu projektu.

## **Vymezení systému (abstrakce)**

Dalším nezbytným krokem je vymezení zkoumaného systému. V tomto kroku je určeno, které prvky a vlastnosti objektu zkoumání budou do systému zahrnuty a naopak od kterých prvků či vlastností bude abstrahováno.

## **Konceptuální model vymezeného systému**

Po vymezení systému je třeba sestavit koncepci, podle které bude vytvořen simulační model. Tento krok zahrnuje volbu metodiky tvorby modelu, volbu architektury simulačního modelu (např. plánování událostí, interakce procesů, agentově orientovaná, ...) a volbu vývojového prostředí, simulačního jazyka nebo simulačního nástroje, ve kterém bude model realizován.

## **Sběr a analýza dat pro simulační model**

Před vlastní tvorbou simulačního modelu je třeba provést sběr a následnou analýzu dat. Tato činnost je nezbytná pro správnou funkci modelu. Provádí se např. sběr historických dat vstupů prvků z okolí do systému, sběr dat popisující vlastnosti prvků reálného světa. Tato data mohou mít deterministický nebo stochastický charakter. Na základě charakteru dat se s daty dále pracuje. Získaná data jsou statisticky vyhodnocena a použita pro správnou parametrizaci generátorů vstupů do modelu.

## **Tvorba simulačního modelu**

Činnost v této fázi se liší na základě zvoleného realizačního prostředku, kterým zpravidla může být:

- použití obecného simulačního nástroje,
- použití specializovaného simulačního nástroje,
- návrh a implementace simulačního nástroje ve vyšším programovacím jazyce.

Je nezbytné vhodně zvolit správný realizační prostředek na základě povahy řešeného problému. Pokud existuje pro řešený problém specializovaný simulační prostředek, pak je vhodné zvážit použití takového simulačního prostředku. V případě tvorby simulačního modelu v obecném nebo specializovaném simulačním nástroji je náplní této fáze vlastní stavba simulačního modelu pomocí prvků a funkčních prostředků, které obsahuje simulační nástroj. V případě tvorby simulačního modelu ve vyšším programovacím jazyce je tato fáze spojena především s návrhem a implementací datových struktur, řídicích struktur a výkonných komponent simulátoru.

### **Verifikace modelu**

Následuje ověření správnosti neboli verifikace simulačního modelu. Zjišťuje se, zda je model funkčně správný a zda je průběh simulačního výpočtu v souladu s konceptuálním modelem. Problémy zjištěné při verifikaci je třeba odstranit příslušnými implementačními zásahy.

### **Validace modelu**

Po úspěšném dokončení verifikace prochází model validací, během které se testuje očekávaná míra přesnosti modelu, která byla stanovena na počátku projektu. Validaci modelu lze provádět následujícími metodikami:

- porovnání chování modelu s realitou (s reálním objektem) pomocí statistických metod s využitím např. statisticky zpracovaných historických dat,
- porovnání chování modelu s jiným matematickým modelem,
- porovnání chování modelu empiricky, které je založené na studiu chování modelu odborníkem – expertem, který posoudí realističnosti chování modelu.

V případě zjištění nedostatků je nutné model modifikovat např. provedením různých kalibrací modelu. Neúspěšná validace modelu může vést až k přehodnocení původního konceptuálního modelu nebo k novému vymezení zkoumaného systému, po které je nutné opakovat verifikaci a validaci. Pozn.: Fáze ověření správnosti a pravdivosti (validace a verifikace) se často mezi sebou prolínají.

## **Druhá etapa**

Po vytvoření simulačního modelu a ověření jeho správnosti lze přistoupit k vlastním simulačním experimentům.

### **Plán simulačních experimentů**

V druhé etapě simulační studie je sestaven plán simulačních experimentů. Postupná realizace plánu experimentů vede k dosažení cílů projektu. V průběhu získávání výsledků jednotlivých experimentů může docházet ke korekcím plánu.

### **Provedení a analýza experimentů**

Sestavením plánu simulačních experimentů může začít proces vykonávání vlastních simulačních experimentů nad modelem a jejich statistické zpracování.

### **Provedení dalších experimentů**

V této fázi je třeba objektivně rozhodnout, zda bylo dosaženo výsledků stanovených původním plánem. V případě výskytu nových problémů je nezbytné sestavit další plán experimentů. Tuto fázi je třeba opakovat tak dlouho, dokud není nalezeno dobré řešení zkoumaných problémů (v ideálním případě optimální).

### **Zhotovení závěrečné zprávy a tvorba dokumentace**

Po ukončení experimentů následuje vypracování závěrečné zprávy a dokumentace, která obsahuje výsledky simulační studie, hodnotí projekt, hodnotí dosažení cílů a stanovuje závěry a doporučení na základě řešených problémů.

## **3.3 Vstupy a výstupy simulátoru**

### **Vstupy simulačních programů**

V případě potřeby modelování vstupů simulačního modelu se používá tzv. submodelu vstupů. Tento „podmodel“ lze realizovat dvěma různými způsoby – jako tzv. standardní model nebo tzv. metamodel. Standardní model vstupů je použit, pokud generování požadovaného typu vstupů představuje složitější proces, případně pokud je požadován vstup již existujících entit. V takovém případě entity opouštějí výchozí simulační model a vstupují do modelu druhého, kde tvoří požadované vstupy.

V případě metamodelu vstupů je použito generátorů pseudonáhodných čísel, které bývají zpravidla implementovány v simulátoru, ale lze je realizovat i externě. Generátory jsou buď deterministického, nebo stochastického charakteru, dle povahy vstupních dat. Pro implementaci stochastického metamodelu vstupů je nutné zjistit povahu reálných dat, která budou modelována. Pro tento účel je třeba ověřit, zda reálná data odpovídají některému z teoretických rozdělení pravděpodobnosti, případně zjistit parametry zjištěného rozdělení pravděpodobnosti.

Data je možné analyzovat pomocí některého ze statistických nástrojů, které umožňují provést test rozdělení pravděpodobnosti, případně určení parametru rozdělení pravděpodobnosti. Data lze také analyzovat „manuálně“ pomocí testování hypotéz o tvaru rozdělení (např. Kolmogorův-Smirnovův test,  $\chi^2$  chí-kvadrát test). Lze také použít testování hypotéz o odhadovaném parametru rozdělení pravděpodobnosti. Pro korektní funkci modelu je třeba pečlivě analyzovat charakter vstupních dat simulátoru.

### **Přesnost výstupních dat – určení počtu replikací**

Ze statistického hlediska je počet replikací (počet opakování simulačního experimentu) závislý především na přesnosti, která je požadována pro předpověď výsledku. Takovým výsledkem je zpravidla nějaká průměrná hodnota. Za předpokladu, že se zkoumaná průměrná hodnota řídí normálním rozdělením pravděpodobnosti, lze vyjádřit průměrnou hledanou hodnotu pomocí intervalu spolehlivosti  $\langle \bar{x} - \Delta; \bar{x} + \Delta \rangle$ . Přesnost výsledku je dána pološířkou intervalu spolehlivosti  $\Delta$ . Provedením  $N$  replikací simulačního experimentu je získáno  $\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_N$  průměrných veličin. Ze získaných průměrných hodnot je určena výsledná průměrná hodnota  $\bar{x}$  a její směrodatná odchylka

$$s_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}.$$

Vypočtená hodnota  $s_{\bar{x}}$  je odhadem směrodatné odchylky aritmetického průměru. Získáním výsledků z  $N$  replikací lze odhadnout šířku intervalu spolehlivosti průměru jako

$$\Delta = \frac{s_{\bar{x}}}{\sqrt{n}} t_{1-\alpha/2; N-1}.$$

Při stanovené přesnosti  $\Delta$  lze určit počet replikací pro dosažení stanovené přesnosti výsledku jako

$$N = \left( \frac{S_{\bar{x}} t_{1-\alpha/2; N-1}}{\Delta} \right)^2.$$

Při prvním odhadu  $N$ , kdy není známý počet replikací, je nutné nahradit hodnotu kvantilu Studentova rozdělení  $t_{1-\alpha/2; N-1}$  kvantilem normálního rozdělení  $z_{1-\alpha/2}$ . Pro 95% interval spolehlivosti ( $\alpha = 0,05$ ) je  $z_{0,975} = 1,96$ .

Určení minimálního počtu replikací je možné provést alternativním postupem – výpočtem kumulativního průměru a jeho intervalu spolehlivosti. Provedením  $N$  replikací simulačního experimentu je získáno  $N$  průměrných sledovaných hodnot  $\bar{x}_i$ . Průměrná hodnota  $\bar{x}$  z průměrných hodnot je vypočtena dle vztahu

$$\bar{x}_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{x}_i.$$

S každou další replikací je získána nová průměrná hodnota a ta je započtena k předchozímu průměru dle vzorce

$$\bar{x}_{N+1} = \frac{1}{N+1} \sum_{i=1}^{N+1} \bar{x}_i.$$

Takovým způsobem lze získat řadu tzv. kumulativních průměrů. Podobně lze nakládat i se směrodatnými odchylkami. Směrodatná odchylka průměru z  $N$  replikací je vypočtena běžným způsobem dle vzorce

$$s_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}.$$

Interval spolehlivosti kumulativního průměr z  $N$  replikací se stanoví jako

$$\left\langle \bar{x}_N - \frac{s_{\bar{x}}}{\sqrt{n}} t_{1-\alpha/2; N-1}; \bar{x}_N + \frac{s_{\bar{x}}}{\sqrt{n}} t_{1-\alpha/2; N-1} \right\rangle.$$

S přibývajícím počtem vykonaných replikací by měly hodnoty kumulativních průměrů vykazovat stále menší změny.

Všechny vzorce použité v této podkapitole byly čerpány z [6].

## **Doba náběhu simulátoru**

Dle povahy simulovaného problému je třeba rozhodnout o potřebě, případně o délce náběhu simulátoru. Toto rozhodnutí je třeba učinit na základě sledování přechodového a ustáleného chování stochastického systému [6]. Tento problém bude popsán na konkrétním příkladu: V případě začátku běhu simulace v období, kdy je reálná silniční síť již „naplněna“ vozidly (doba dopravní špičky) je třeba stanovit určitý náběhový čas, během kterého se „naplní“ silniční síť v simulovaném systému. Během této doby se ustálí sledované dopravně-inženýrské ukazatele (např. hustota vozidel na 1 km) a je možné zahájit sběr dat. Doba náběhu lze stanovit např. na základě sledování dopravně inženýrských ukazatelů.

## **Simulační experimenty**

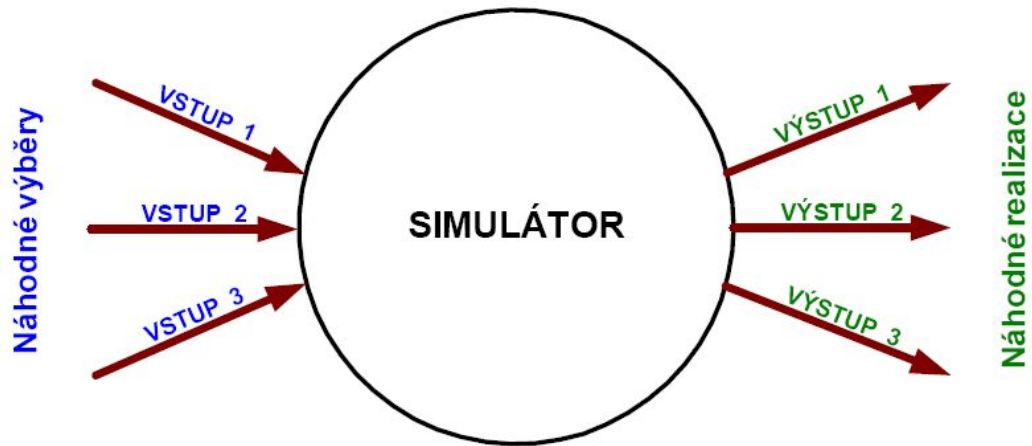
Výchozím požadavkem je, aby jednotlivé simulační experimenty byly nezávislé. Nezávislých výsledků simulačních experimentů lze dosáhnout pomocí odlišné (nezávislé) inicializace generátorů. Pro potřeby níže uvedené simulační studie lze zajistit nezávislost provedením série nezávislých simulačních experimentů – provedení série opakování simulačního experimentu s již zmíněnou odlišnou inicializací generátoru pseudonáhodných čísel. Po určení počtu replikací a případné době náběhu simulátoru je možné zahájit vlastní simulační experimenty.

Pozn.: Simulační nástroj Aimsun automaticky vygeneruje pseudonáhodná čísla (jako inicializaci generátoru) pro každou novou replikaci. Vygenerovanou hodnotu je možné u každé replikace změnit.

## **Statistické hodnocení simulačních experimentů – analýza výsledků**

Po provedení série replikací jednotlivých simulačních experimentů následuje komplexní analýza výsledků (všech replikací). Vstupem jednotlivých replikací simulačních experimentů byly nezávislé náhodné výběry a na základě náhodných výběrů byly získány náhodné realizace jednotlivých opakování experimentů. Výstupní hodnoty náhodných realizací lze v případě stochastického systému považovat za výstupní stochastické procesy.





Obrázek 2: Vstupy a výstupy stochastického systému. Zdroj [6].

$Y_1, Y_2, \dots, Y_n$  je vstupní stochastický proces z jednoho opakování (replikace) simulačního programu.

$m$ ... počet vzorků/pozorování v jedné replikaci

$n$ ... počet nezávislých replikací (se shodnými počátečními podmínkami a různými náhodnými výběry/pseudonáhodnými čísly).

Tabulka 1: Vstupy a výstupy systému. Zdroj [6]

Pseudonáhodná čísla/vstupy	Náhodné realizace/výstupy			
$u_{11}, u_{12}, \dots$	$y_{11}$	$y_{12}$	...	$y_{1m}$
...	...	...	...	...
$u_{n1}, u_{n2}, \dots$	$y_{n1}$	$y_{n2}$	...	$y_{nm}$

Úkolem výstupní analýzy je na základě pozorování  $y_{ji}$  odhadnout rozdělení a parametry náhodných proměnných  $Y_1, \dots, Y_m$ .

$E(Y_i)$  = odhad střední hodnoty proměnné  $Y_i$ .

$$\bar{y}_i(n) = \frac{\sum_{j=1}^n y_{iu}}{n} \quad [13]$$

Z hlediska výstupní analýzy se simulace dělí na:

- simulaci s ukončením,
- simulaci bez ukončení,
  - s ustálenými parametry,
  - s ustálenými cyklickými parametry,
  - s jinými parametry.

V případě simulace s ukončením existuje událost, která ohraničuje délku běhu simulačního programu. V opačném případě (simulace bez ukončení) neexistuje událost určující konec běhu simulačního programu.

## 4 Simulační nástroj Aimsun

Tato kapitola shrnuje základní vlastnosti simulačního nástroje Aimsun a dále popisuje možnosti tvorby signálních plánů v tomto nástroji. Popis metodiky tvorby simulačních modelů lze nalézt v [1] nebo [2]. Veškeré uvedené informace se vztahují k aplikaci Aimsun pro platformu Windows ve verzi 6.0.6.

Simulační nástroj Aimsun je specializovaným nástrojem pro simulaci silničního provozu, který má široké uplatnění při řešení problematiky silničních sítí. Lze např. posuzovat efektivnost stávajících řešení, efektivnost budoucích řešení včetně posouzení různých variant řešení dopravních sítí.

Součástí simulačního nástroje je:

- editor sítě umožňující 2D a 3D vizualizaci,
- nástroje pro import CAD souborů, GIS souborů, rastrových obrázků
- nástroje pro import dopravních dat,
- mikroskopický simulátor,
- mesoskopický simulátor,
- makroskopický modul umožňující zejména práci a manipulaci s O/D maticemi (nastavení, zpřesnění, vyvažování)
- možnost použití skriptů v programovacím jazyce Python,
- rozšíření prostředí simulátoru prostřednictvím externích modulů psaných v programovacích jazycích C++, Python nebo s využitím Aimsun Software Development Kit,
- rozhraní pro propojení s aplikacemi jiných výrobců.

Mikroskopický simulátor umožňuje modelování přesné geometrie silniční sítě na základě importovaných mapových podkladů. Importovat lze data vektorových formátů (např. data z geografických informačních systémů, výkresy Autocad) i rastrových formátů (fotografie existujícího segmentu sítě). V rámci vlastní simulace umožňuje detailně modelovat dynamiku jednotlivých vozidel. Je možné nastavit velikosti vozidel pro jednotlivé typy vozidel, jejich maximální rychlosti, akceleraci a deceleraci vozidel. Interakce vozidel je řešena pomocí algoritmů řešících vzájemné chování vozidel. Jedná se zejména o car-following model, lane changing model a gap-acceptance model. Car following model řeší

vzájemnou interakci vozidel jedoucích za sebou a lane changing model řeší přejíždění vozidel mezi jednotlivými pruhy, gap-acceptance model řeší možnosti zařazení vozidel do mezer mezi vozidly.

## 4.1 Tvorba simulačního modelu

Následující podkapitola shrnuje základní kroky tvorby simulačního modelu.

1. Vytvoření nového simulačního modelu na základě šablony (template), ve které jsou výrobcem předdefinovány veškeré základní parametry modelu – silnic, vozidel, chodců, atd.
2. Import podkladů pro tvorbu silniční sítě. Při importu rastrových souborů je nezbytné správně zadat měřítko a to zadáním velikost 1 pixelu souboru vzhledem ke skutečné velikosti.
3. Tvorba modelu vybraného silničního úseku. Nad importovaným souborem se vytvoří požadovaný model silniční sítě, který může zahrnovat silnice, křižovatky s nastavením předností, mimoúrovňová křižení, přechody pro chodce, světelná signalizační zařízení, veřejnou dopravu včetně kolejových vozidel.
4. V modelu je nutné definovat dopravní poptávku – osobní vozidla, nákladní vozidla, městskou hromadnou dopravu, chodce buď formou traffic state nebo formou O/D matice. Podle potřeby lze dále definovat signální plány, parametrizovat vozidla, chodce, parametrizovat simulační model.
5. V místech, kde je třeba sledovat dopravně-inženýrské ukazatele, případně dynamicky řídit dopravní situaci, je třeba umístit detektory sledující parametry sledovaného úseku silniční sítě.
6. Sestavení plánu dopravní poptávky – vybrat dílčí, předem definované, intenzity pro osobní vozidla, nákladní vozidla, veřejnou dopravu a chodce.
7. Vytvoření nového experimentu, v rámci kterého lze nadefinovat různé scénáře, podle kterých se má simulační model chovat – pro každý scénář je možné definovat odlišnou dopravní poptávku, plány řízení dopravy, parametry modelu a možnosti získávání výstupů modelu.
8. Pokud to simulovaný systém vyžaduje, následuje zjištění potřebné doby náběhu simulátoru, stanovení minimálního počtu opakování experimentu (minimální počet

replikací). Výpočet minimálního počtu replikací závisí na požadované přesnosti, výsledků simulačních experimentů.

9. Provedení série opakování experimentů, získání a vyhodnocení výsledků, ze kterých jsou vyvozeny závěry.

## 4.2 Formát vstupních dat

Aplikace Aimsun umožňuje definovat dopravní poptávku dvěma různými způsoby ve formě tzv. traffic state nebo tzv. O/D matice. Před zadáním vstupních dat je třeba rozhodnout, jakým způsobem bude definována dopravní poptávka. Dle zvoleného řešení je třeba zpracovat vstupní data.

Při zadávání dopravní poptávky pomocí traffic state je nutné zadat intenzity dopravy pro každý vstupní segment silniční sítě a následně určit procentuální rozpad dopravního proudu pro každé křížení, kde může vozidlo odbočit.

Při zadávání dat pomocí O/D matice je třeba sestavit matici, ve které jsou definovány intenzity dopravních proudů pro jednotlivé vstupní a výstupní úseky dopravní sítě (anglicky origin/destination).

Traffic state i O/D matice je třeba sestavit (definovat) pro každý typ modelovaných entit zvlášť (osobní vozidlo, nákladní vozidlo, autobus, chodec, atd.).

## 4.3 Možnosti modelování řízení dopravy

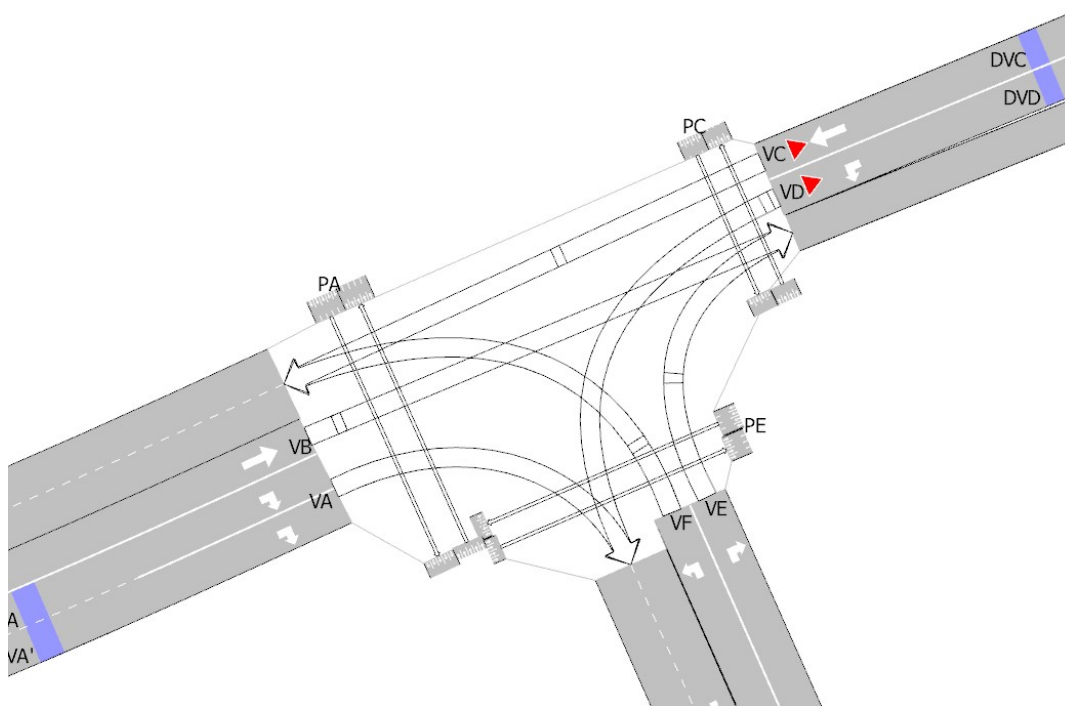
Nástroj Aimsun umožňuje řídit dopravu následujícími způsoby:

- dopravními značkami s předností v jízdě,
- proměnným značením,
- světelnými signály.

Pro potřeby diplomové práce bude detailněji popsáno řízení pomocí světelných signálů. Řízení dopravy světelnými signály může být realizováno jako pevné, dynamické nebo prostřednictvím externí aplikace s propojením pomocí Aimsun API (application programming interface).

### 4.3.1 Definování signálních skupin

Výchozím krokem pro definování signálních skupin a tvorbu signálního plánu je namodelovaná křižovatka včetně všech vnitřních pohybů v křižovatce. Příklad takové křižovatky je na obrázku 3. Pro lepší orientaci byly jednotlivé směry vozidel označeny VA – VF.



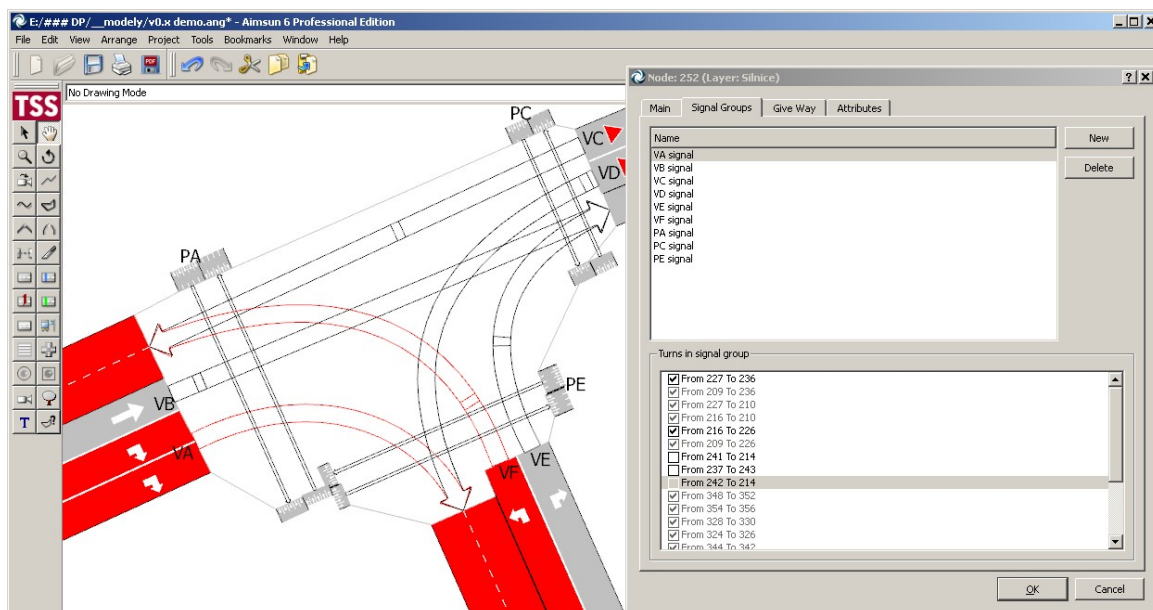
Obrázek 3: Křižovatka s definovanými pohyby

Dvojitým kliknutím na křižovatku se otevře nabídka nastavení křižovatky (Node), kde se v záložce signálních skupin (Signal Groups) nadefinují nové signální skupiny viz. obrázek 4. Vytvořené Signální skupiny byly pojmenovány stejně jako směry v křižovatce s doplněním slova signal pro odlišení signální skupiny od názvu směru.



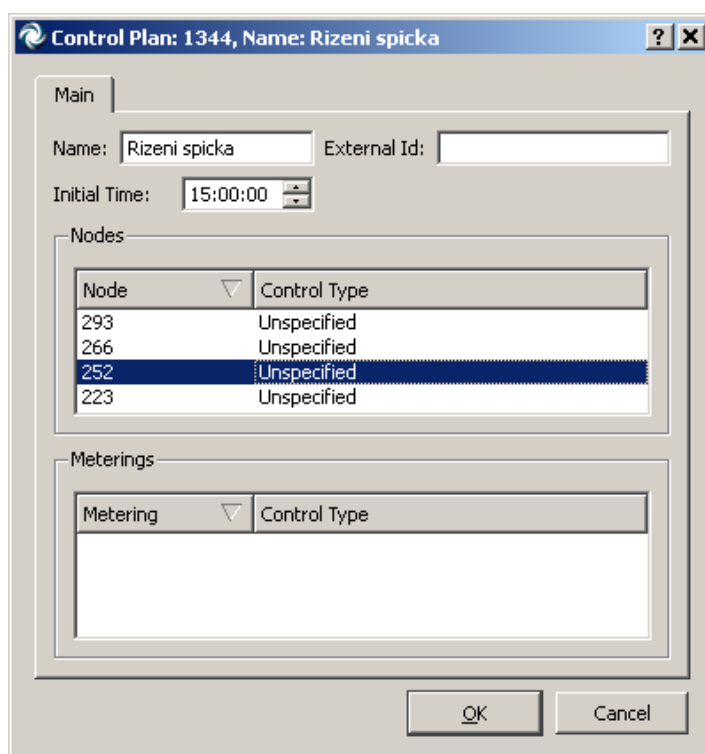
*Obrázek 4: Tvorba signálních skupin*

Po definování signálních skupin následuje přiřazení jednotlivých směrů (VA – VF) k požadovaným signálním skupinám, což znázorňuje obrázek 5. V horní části záložky signálních skupin (Signal Groups) se vybere požadovaná signální skupina a v dolní části okna se označí všechny směry v křižovatce, které patří do signální skupiny. Směry jsou označeny interními čísly jednotlivých úseků. Pokud jsou požadovány společné začátky i konce zelených pro více směrů, je možné přidat všechny směry do jedné signální skupiny. Na obrázku 5 je směrům označeným jako VA a VF přiřazena jedna (společná) signální skupina. V tomto případě svítí pro oba směry stejné světelné signály. Přeařazením směru VF do nové signální skupiny VF signal je možné časově posunout začátky a konce jednotlivých zelených v jedné fázi z důvodu maximálního využití kapacity křižovatky. Signály jsou posunuty s ohledem na doby nezbytné pro vyklizení kolizních směrů.



Obrázek 5: Přirazení signálních skupin jednotlivým vjezdům.

Po vytvoření signálních skupin následuje vytvoření řídicího plánu např. prostřednictvím nabídky Project – New – Control – Control Plan. Nový plán řízení se přidá do menu projektu – sekce Control . Na obrázku 6 je zobrazeno okno plánu řízení. V této nabídce je třeba nastavit výchozí čas spuštění plánu řízení (Initial Time) a vybrat uzel (Node), pro který bude nastavován signální plán. Pozn. vlastní signální plán se zobrazí dvojitým kliknutím na požadovaný uzel, nikoliv stiskem tlačítka OK.

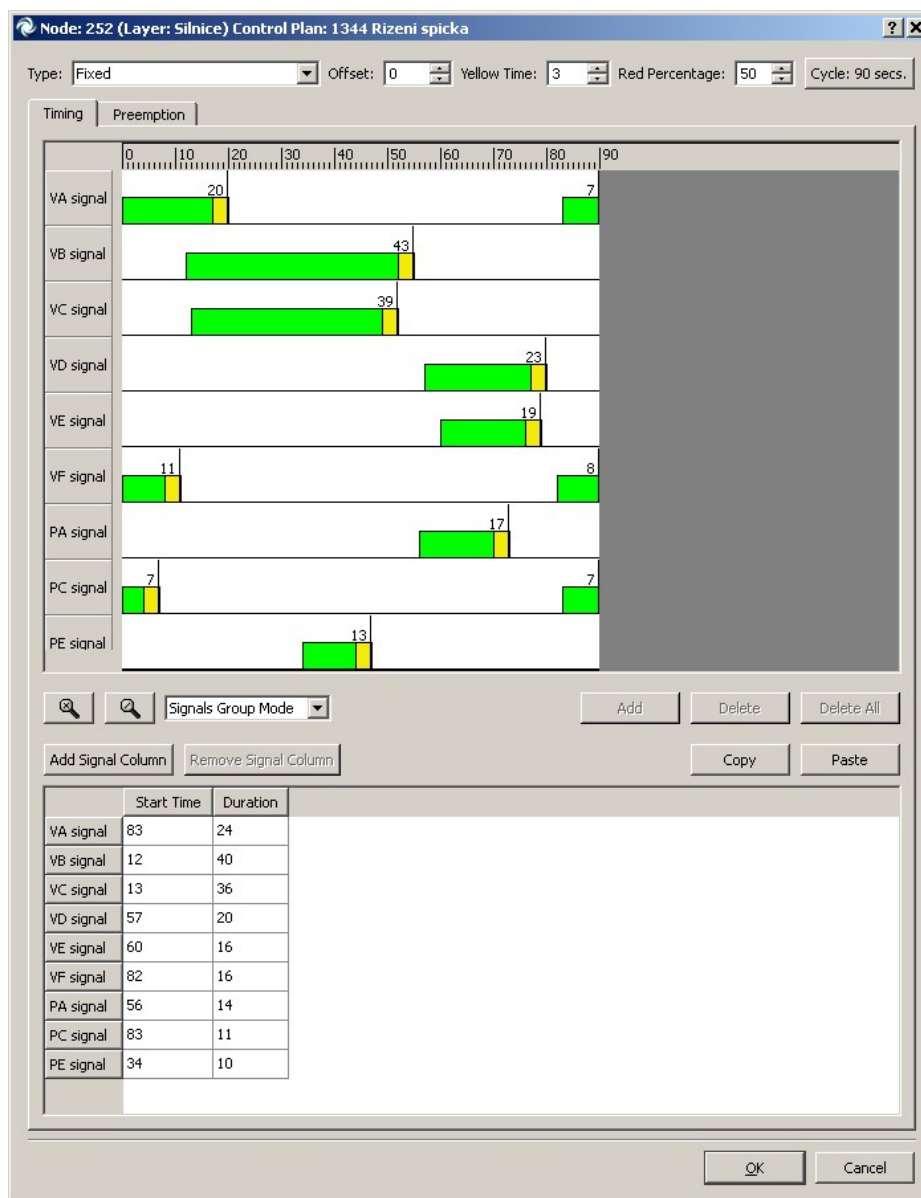


Obrázek 6: Plán řízení



## Pevný signální plán – Fixed

Vstupními daty pro tvorbu signálního plánu jsou délka cyklu, doba žluté, začátky dob volna (zelených) pro všechny signální skupiny a doby trvání zelených. Pro rychlé a bezchybné zadání signálního plánu je vhodné poznamenání začátků dob volna a délek těchto dob do tabulky pro každou signální skupinu.



Obrázek 7: Sestavení signálního plánu

Příklad tvorby signálního plánu je na obrázku 7. Je volen pevný signální plán (Fixed), doba žluté (Yellow Time) je dle technických podmínek 3 sekundy. Přepnutím z „Phase Mode“ na „Signals Group Mode“ je možné zahájit tvorbu vlastního signálního plánu. Nastavované hodnoty: délka cyklu (Cycle), pro každou signální skupinu začátek

(Start Time) a délka zelených (Duration). Vložené délky zelených se zobrazují graficky na časové ose v délce doby cyklu.

Modelování řízení křižovatky se provádí definováním fází. Cyklus se rozdělí do n-fází, kde je každé fázi přidělena příslušná signální skupina určující, která vozidla (případně chodci, ...) mohou vjíždět (vcházet) do křižovatky ve stejnou dobu. Jednotlivé časy se nastavují v sekundách. Doba jedné fáze určuje dobu zelené pro danou signální skupinu přiřazenou k fázi.

### **Dynamický signální plán – Actuated**

Tento typ signálního plánu se tvoří obdobným způsobem jako pevný signální plán. Pro možnost dynamického řízení se nastavují další parametry jako např. minimální doba zelené, maximální doba prodloužení zelené, maximální mezera mezi vozidly ukončující zelenou, atd.

Možnosti tvorby dynamického signálního plánu byly implementovány v souladu s pravidly pro signální řadiče podle standardů NEMA (National Electrical Manufacturers Association). Smyslem dynamického řízení provozu je nastavit světelné signály tak, aby co nejlépe (nejefektivněji) obsloužily aktuální dopravní zatížení na každé větvi takto řízené křižovatky. Nastavené doby zelených odpovídají aktuálním dopravním údajům získaným z reálného provozu této křižovatky pomocí detektorů. Aimsun umožňuje vytvořit následující způsoby dynamického řízení:

- **Polo-dynamický**

Hlavní dopravní proud je jediný, který má zelenou do doby požadavku z vedlejšího dopravního proudu.

- **Nekoordinovaný**

Zelená je poskytnuta hlavním dopravním proudům na základě parametrů „MinRecall“ nebo „MaxRecall“. Když je zjištěn požadavek od konfliktní fáze, je obsloužen ihned po gap-out (ukončení fáze na základě nastavené mezery mezi vozidly) nebo max-out čase (ukončení fáze na základě dosažení maximální možné doby trvání fáze) pro hlavní dopravní proud, pokud má zrovna zelenou. Pokud pro hlavní směr nejsou dostupné žádné detektory, je požadovaná konfliktní fáze zařazena ihned po čase min. green time hlavní fáze (minimální doba zelené).

- **Koordinovaný**

Hlavní tah je řešen pomocí synchronizace, která končí tzv. yield point, což je ukončovací bod. Zelená pro vedlejší tah je nastavena (pokud přijde požadavek) pouze po dosažení ukončovacího bodu hlavní fáze (yield point). Vedlejší zelené jsou ukončeny pomocí gap-out (mezera mezi vozidly) nebo při dosažení force-off bodu. Force-off je časová událost zajišťující koordinaci vedlejší fáze s fází hlavní.

- **Plně dynamický režim**

V plně dynamickém režimu řízení křižovatky jsou posuzovány všechny fáze, proto jsou potřebné detektory pro všechny pohyby v křižovatce. Zjištění hustoty dopravy je dalším parametrem pro zlepšení řízení dopravy. Jeden ze znaků zjišťovaných při výpočtu hustoty dopravy umožňuje určení proměnné doby zelené. Doba zelené je počítána na základě počtu vozidel, která projela přes detektory během signálu žluté a červené. Pro dobrou funkci tohoto způsobu řízení je nezbytné umístění detektorů dostatečně daleko od stopčáry. V plně dynamickém režimu je také možno použít funkce gap reduction, která omezuje délku zelené na základě mezery mezi vozidly.

Určitou nevýhodou při tvorbě dynamického signálního plánu je, že Aimsun přímo neumožňuje nahradit již definovanou fází alternativní fází. Tuto možnost lze implementovat pouze při externím řízení dopravy při naprogramování vlastní logiky řízení křižovatky s pomocí Aimsun API.

#### **4.4 Výstupy simulačního nástroje – animace, dopravně-inženýrské ukazatele**

Simulační nástroj Aimsun poskytuje dvě základní možnosti výstupů simulace. První možností je sledování 2D (případně 3D) interaktivní animace, ve které je mj. možné odhalit základní nedostatky v chování modelu silniční sítě. V průběhu animace je možné získávat různé globální nebo lokální ukazatele o stavu silniční sítě, získávat informace o konkrétních vozidlech, používat různé styly vykreslování objektů simulačního modelu na základě jejich atributů (zabarvení vozidel dle jejich cílových bodů, zabarvení vozidel dle jejich aktuální rychlosti, zabarvení úseků silniční sítě dle průměrné rychlosti, hustoty dopravy, doby zdržení, atd.).

Druhou možností je analýza různých statistických dat získaných na základě výsledků simulačních experimentů. Veškerá získaná data se ukládají do externí databáze. Pro analýzu dat prostřednictvím databáze je třeba použít příslušných databázových nástrojů. Mnoho ukazatelů je možné analyzovat přímo v simulačním nástroji Aimsun a to jak graficky, tak i číselně. Číselné výsledky se dělí na dvě hlavní skupiny:

- **skalární veličiny**, které jsou dostupné pro jednotlivé úseky (jako jediná hodnota za celý běh simulace) a vyjadřují aritmetické průměry atributů hustoty dopravy (SI Density) a virtuální fronty (SI Virtual Queue) pro vozidla, která nemohla vstoupit do systému z důvodu plné silniční sítě,
- **časové řady**, které umožňují sledovat vývoj níže uvedených dopravně-inženýrských ukazatelů v předem stanoveném časovém intervalu a to jak agregovaně, tak pro různé části silničních úseků nebo pro každý druh entit zvlášť.

Ve výsledcích lze nalézt tři druhy časových řad, označených pomocí prefixů SRC, SR, SA:

- SRC představuje časovou řadu s výsledky poslední simulované replikace,
- SR představuje časovou řadu s výsledky určité (vybrané) replikace,
- SA představuje průměrnou hodnotu všech simulovaných replikací sledovaného experimentu.

Kromě automaticky vyhodnocovaných dat je možné na libovolná místa silniční sítě umístit detektory vozidel, které umožňují sledovat parametry provozu pro požadovanou oblast.

Tabulka 2, na následující straně, shrnuje možnosti sledování dopravně-inženýrských ukazatelů v simulačním nástroji Aimsun. Statistika označovaná jako system zahrnuje data z celého simulovaného systému. Dále je možné vyhodnocovat naměřené údaje pro jednotlivé silniční úseky a odbočení (sections), dopravní proudy (streams stat), O/D matice a pro veřejnou dopravu.

Tabulka 2: Možnosti sledování statistických údajů v Aimsunu Zdroj: [1]

	označení v Aimsunu		system	sections	streams stat	O/D matrix	public transport
ukazatel		jednotka	celkový model	úseky	sledova- né trasy	O/D matice	veřejná doprava
tok	flow	[vozidlo]				✗	✗
průměrný tok	mean flow	[voz./h]	✗	✗	✗		
hustota	density	[voz./km]	✗	✗			
průměrná rychlost	mean speed	[km/h]	✗	✗	✗	✗	✗
harmonická prům. rychlost	harmonic mean speed	[km/h]		✗	✗	✗	✗
doba jízdy	travel time	[s]	✗	✗	✗	✗	✗
zdržení proti ideal. průjezdu	delay time	[s/km]	✗	✗	✗	✗	✗
doba zastavení	stop time	[s/km]	✗	✗	✗	✗	✗
počet zastavení	number of stops			✗	✗	✗	✗
průměrná délka fronty	mean queue length	[vozidlo]		✗			
maximální délka fronty	max queue length	[vozidlo]		✗			
celková ujetá vzdálenost	total travel	[km]	✗	✗	✗	✗	✗
celkový ujetý čas	total travel time	[h]	✗	✗	✗	✗	✗
ztracená vozidla	lost vehicles	[vozidlo]				✗	
spotřeba paliva	fuel consumed	[l]	✗	✗	✗	✗	✗
znečištění ovzduší	pollution emitted	[kg]	✗	✗	✗	✗	✗

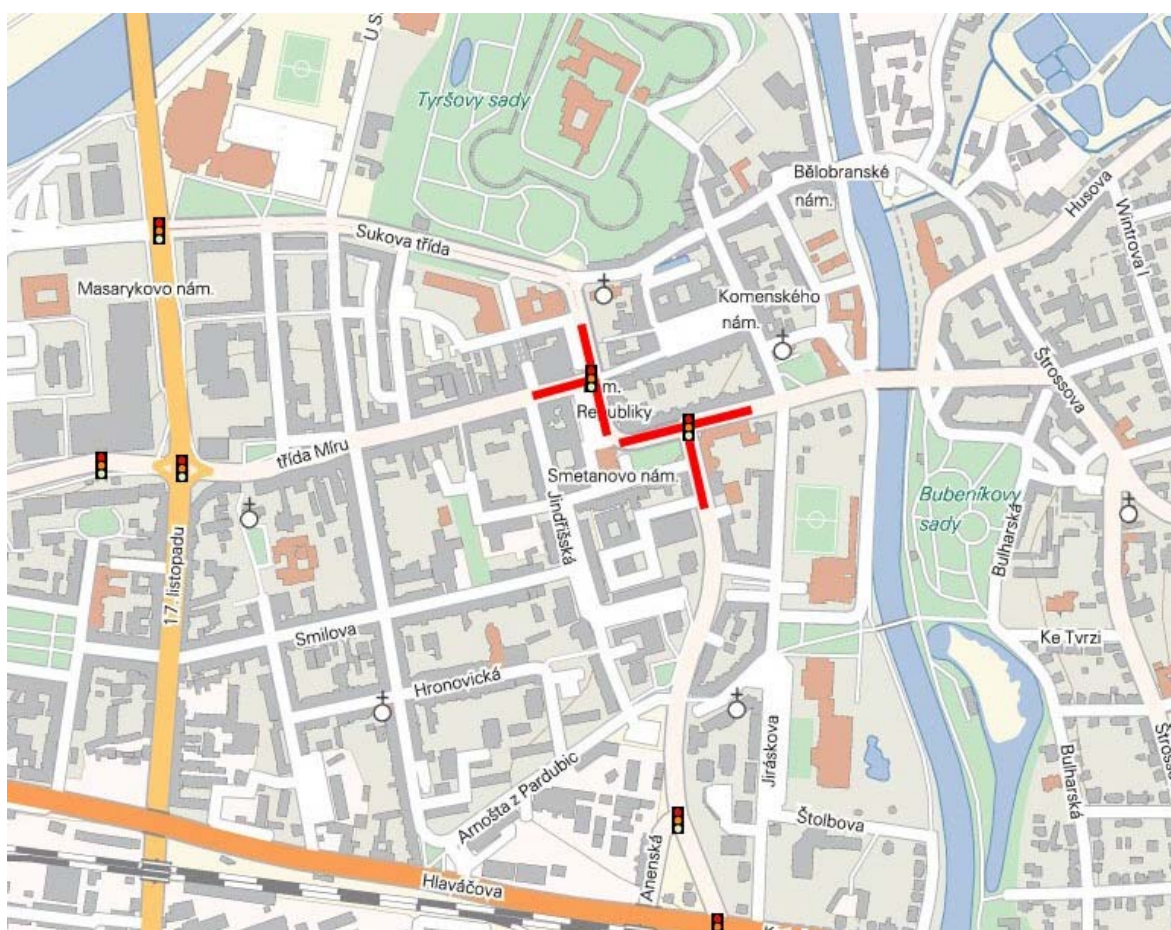
## 5 Analýza současného stavu řízení křižovatky

### Karla IV. – Jahnova

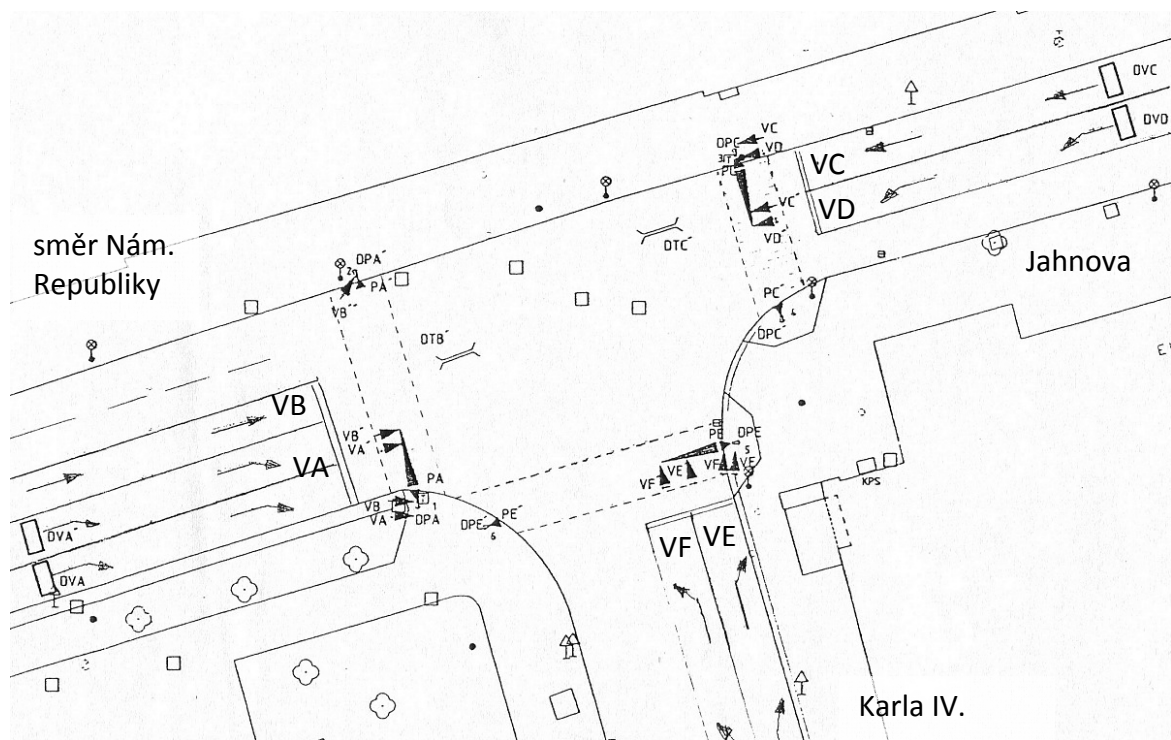
Tato kapitola poskytuje přehled současného stavu řízení křižovatky Karla IV. – Jahnova v Pardubicích.

#### 5.1 Popis křižovatky

Styková křižovatka Karla IV. – Jahnova leží v centru města. K této křižovatce patří i světelně řízený přechod pro chodce před Zelenou bránou na Náměstí Republiky, který je řízen společným radičem umístěným u budovy divadla. Křižovatka je z hlediska návaznosti na ostatní SSZ izolovaná. Poloha křižovatky v rámci městské silniční sítě je znázorněna na přehledové mapě – obrázek 8.



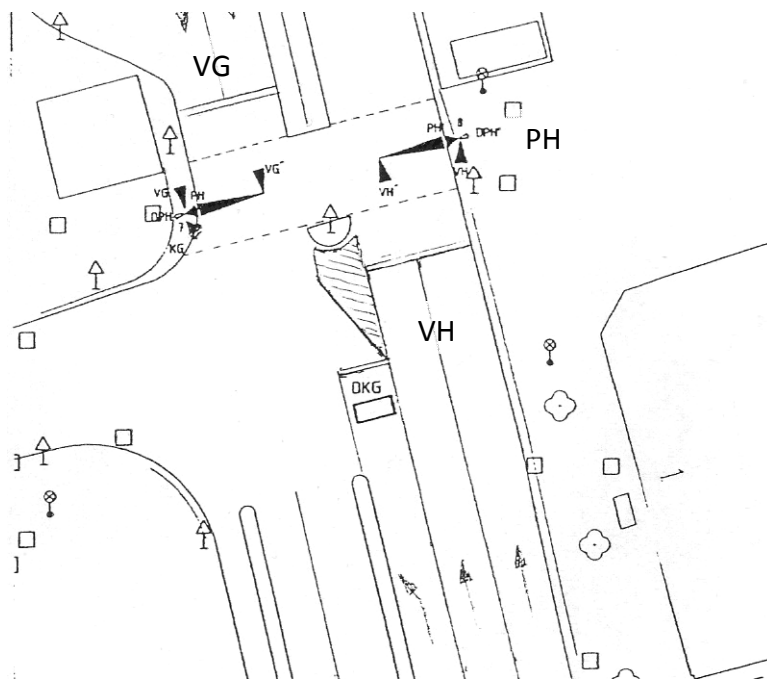
Obrázek 8: Přehledová mapa Zdroj: DPA s.r.o.



Obrázek 9: Detailní situace – křižovatka Zdroj: Technické služby

Obrázek 9 je detailním pohledem na křižovatku. Ulice Jahnova je dvoupruhová obousměrná komunikace, která je před vjezdem do křižovatky rozšířena na dva řadící pruhy. Pro každý směr jízdy je vyhrazen jeden jízdní pruh. Ulice Karla IV. je čtyřpruhová obousměrná komunikace. Na vjezdu do křižovatky je pro každý odbočovací pruh vyhrazen vlastní jízdní pruh. Ze směru od Náměstí Republiky je komunikace čtyřpruhová, která je před vjezdem do křižovatky rozšířena o jeden odbočovací pruh. Na vjezdu je tedy jeden jízdní pruh pro přímý směr a dva jízdní pruhy pro odbočení vpravo. Všechny směry jsou pokryty detektory, které jsou umístěny ve vozovce a jsou znázorněny na obrázku 9 jako DVA – DVF. Detektory DVE a DVF jsou ve stejné vzdálenosti jako DVC a DVD, avšak byly vynechány pro lepší přehlednost obrázku. Šířka jednotlivých pruhů je 3,5 m. Podélný sklon ramen křižovatky je zanedbatelný, rozhledové podmínky v křižovatce jsou částečně omezené budovou Střeni průmyslové školy elektrotechnické a živými ploty přilehlého parku. Stopčáry jsou umístěny co nejbližší středu křižovatky pro minimalizaci najížděcích a vyklizovacích dob od kterých se odvíjí zdržení účastníků silničního provozu. Na všech třech ramenech křižovatky se nachází přechody pro chodce opatřené tlačítky pro požadavky ze strany chodců. Křižovatka je opatřena trolejbusovými detektory pro preferenci

MHD. Ze strany ulice Jahnova byl přihlašovací detektor odpojen<sup>1</sup> při změně dopravního řešení – zkrácení odbočovacího pruhu z důvodu výstavby ostrůvku pro přilehlý přechod. Preference MHD (trolejbusů) ze směru od Náměstí Republiky by měla umožnit prodloužení signálu volno do doby, než trolejbus vjede do křižovatky. Při dopravním průzkumu bylo zjištěno, že přijíždějícím trolejbusům (při příjezdu v době končící zelené) nebyla prodloužena zelená.



Obrázek 10: Světelně řízený přechod Nám. Republiky

Zdroj: Technické služby

Světelně řízený přechod před Zelenou bránou (obrázek 10) je opatřen tlačítky pro výzvu ze strany chodců. Pro vozidla odbočující na Třidu Míru je ve vozovce instalován detektor.

## 5.2 Dopravní situace

Zejména v době odpolední dopravní špičky patří tato křižovatka k velice vytíženým. K nejvyššímu časovému zdržení vozidel dochází ve směru z Náměstí Republiky do ulice Jahnova. Tímto směrem projede největší množství vozidel v porovnání s ostatními směry. Kromě vlastní dopravní poptávky pro tento směr může mít na vysoké zatížení směru nega-

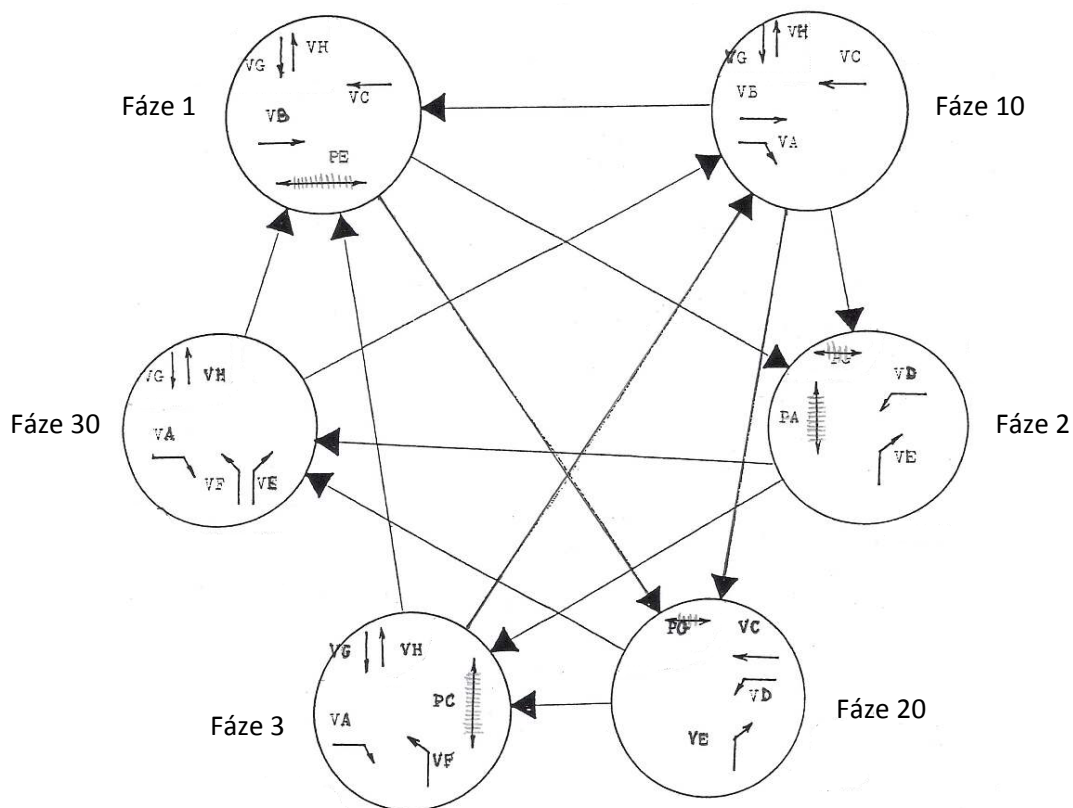
<sup>1</sup> Informace od Technických služeb města Pardubice.



tivní vliv i skutečnost, že se této trase nelze vyhnout bez navýšení časové ztráty (např. ve směru Polabiny severní část – Dubina). Druhá nejvyšší intenzita dopravy je směrem opačným, tedy z ulice Jahnova směrem na Náměstí Republiky. Tento směr není tolik vytížený, na což může mít vliv i možnosti volby alternativní trasy jednosměrnou ulicí Labská (např. při směru jízdy Dubina – Polabiny severní část) s možností vyhnutí se dvěma SSZ. Ostatní dopravní proudy jsou vytíženy méně. Přesné údaje o intenzitách vozidel jsou uvedeny v následující kapitole č. 6 Dopravní průzkum.

### 5.3 Řízení SSZ

Obrázek 11 popisuje fázové schéma křižovatky, ve kterém jsou zaznamenány možné přechody fází.



Obrázek 11: Fázové schéma

Pro křižovatku bylo sestaveno několik variant řízení provozu a to jak pevných, tak provozně závislých:

*Tabulka 3: Režimy řízení křižovatky*

*Zdroj: Technické služby*

SP č.	Délka cyklu (s)	Pozn.
1	90	dopravně závislé
2	max. 110	
3	90	
4	max. 90	
6	90	pevné
7	70	
8	80	

Signální programy SP1 – SP4 jsou dopravně závislé s pravidelným střídáním fází F10 – F20 – F30 s odpovídající pevnou nebo maximální délkou cyklu. Chodecké skupiny jsou zadávány „na výzvu“. V případě výzvy jsou zařazovány alternativní fáze F1 – F2 – F3.

V období odpolední dopravní špičky je aktivní signální program SP2, který může být přepínán do alternativních signálních plánů SP12 a SP13. Maximální délka cyklu je stanovena na 110 sekund. Při dopravním průzkumu bylo zjištěno, že typická délka cyklu v tomto období je 105 – 115 sekund (občasně přes 120 sekund). Je tedy zřejmé, že v řízení křižovatky byly provedeny programové změny, které nejsou zahrnuty v dokumentaci. Na většinu 15minutových období připadá 8 cyklů. Z celkové délky cyklu připadá cca 43 sekund nejvytíženějšímu směru VB společně se směrem VC (Fáze 1). Zbytek délky cyklu je rozdělen mezi zbývající dvě fáze.

V případě pevných signálních plánů se pravidelně střídají fáze F1 – F2 – F3. Tyto signální plány nejsou momentálně používány.

Celkový plánec křižovatky a světelně řízeného přechodu, signální plán SP2 společně s alternativními signálními plány SP12, SP13 a pevné signální plány SP6 – SP8 jsou umístěny na datovém nosiči v adresáři Přílohy.

## **6 Dopravní průzkum – intenzity provozu křižovatky**

### **Karla IV. – Jahnova**

Jedním z dílčích cílů diplomové práce bylo provedení dopravního průzkumu křižovatky Karla IV. – Jahnova pro zjištění směrodatných intenzit provozu. Výsledky dopravního průzkumu shrnuje tato kapitola.

Pro zjištění směrodatné intenzity vozidel bylo provedeno několik opakovaných měření sledovaných segmentů silniční sítě. Data byla zaznamenávána v 15 minutových intervalech. Měření intenzit vozidel probíhalo nejprve na nejvíce zatížené ulici Sukova ve směru ke křižovatce pouze v odpoledních hodinách. Následně proběhlo jedno měření pro ulici Jahnova. V druhé části dopravního průzkumu byla počítána vozidla pomocí videokamery Městské policie Pardubice, umístěné na budově Střední průmyslové školy elektrotechnické. Analýzou záznamů byl vyhodnocen celý jeden den (6.00 – 18.00). Následně bylo provedeno několik měření odpolední dopravní špičky. Vybraná data dopravního průzkumu jsou tabelárně a graficky zpracována v této kapitole. Kompletní výsledky dopravního průzkumu jsou uvedeny na datovém nosiči v adresáři Přílohy.

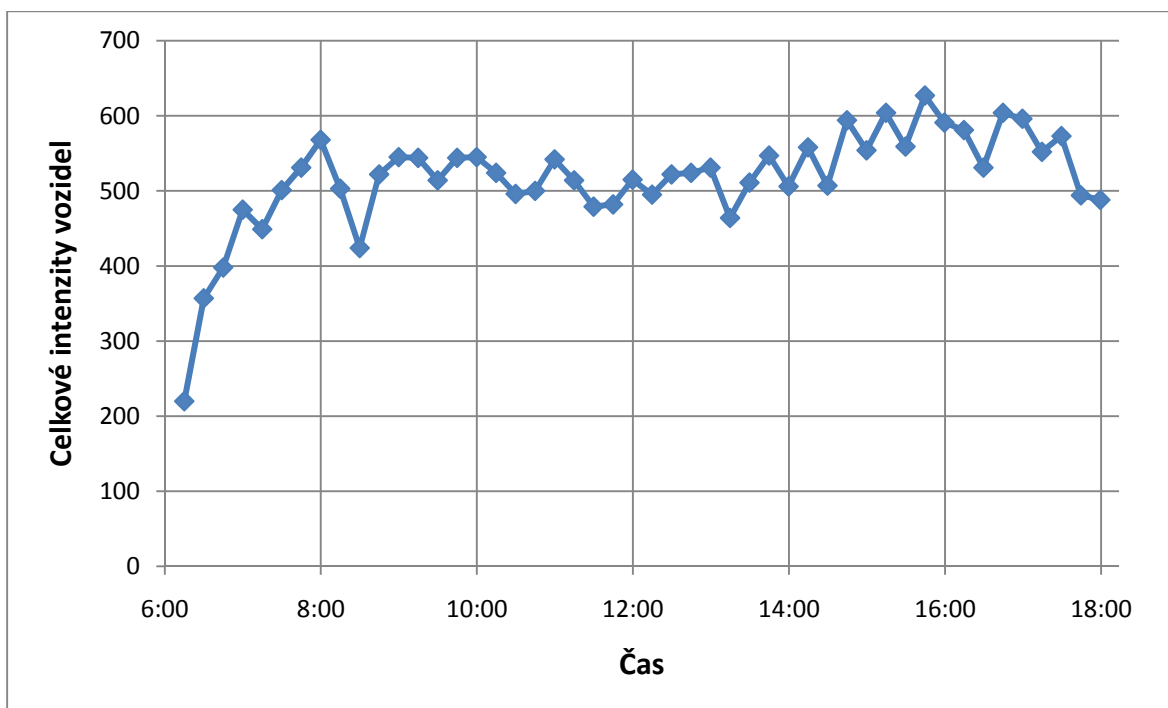
Na základě vyhodnocení 15minutových intervalů byla nejvyšší intenzita projíždějících vozidel v rozmezí 15.00 – 16.00. Vysoké intenzity vozidel trvaly v některé dny cca do 17.30. Během této doby byly zjištěny obdobné nebo nižší intenzity (pro 15min. intervaly) projíždějících vozidel v porovnání s nejvíce vytíženou hodinou.

Na následující straně se nachází tabulka 4, ve které jsou uvedeny intenzity vozidel měřené dne 21.4.2010 od 6.00 do 18.00. Graf 1 zobrazuje celkové intenzity vozidel ze dne 21.4.2010.

Tabulka 4: Celkové intenzity vozidel dne 21.4.2010 od 6.00 do 18.00

21.4.2010	VA	VB	VC	VD	VE	VF	Nám R. VA+VB	Jahnova VC+VD	Karla IV. VE+VF	Σ15 min.	Σ4x15 min.
6.00 – 6.15	14	63	63	29	34	17	77	92	51	220	
6.15 – 6.30	26	107	87	48	60	29	133	135	89	357	
6.30 – 6.45	24	109	90	64	82	29	133	154	111	398	
6.45 – 7.00	40	150	116	74	57	38	190	190	95	475	1450
7.00 – 7.15	42	146	69	72	86	34	188	141	120	449	1679
7.15 – 7.30	44	148	116	79	86	28	192	195	114	501	1823
7.30 – 7.45	65	138	125	72	75	56	203	197	131	531	1956
7.45 – 8.00	78	156	110	88	80	56	234	198	136	568	2049
8.00 – 8.15	58	157	111	66	64	47	215	177	111	503	2103
8.15 – 8.30	55	117	98	46	54	54	172	144	108	424	2026
8.30 – 8.45	67	129	121	77	67	61	196	198	128	522	2017
8.45 – 9.00	74	118	126	80	79	68	192	206	147	545	1994
9.00 – 9.15	73	119	115	71	80	86	192	186	166	544	2035
9.15 – 9.30	59	122	129	70	67	67	181	199	134	514	2125
9.30 – 9.45	83	146	109	59	71	76	229	168	147	544	2147
9.45 – 10.00	57	155	110	76	77	70	212	186	147	545	2147
10.00 – 10.15	70	128	107	81	67	71	198	188	138	524	2127
10.15 – 10.30	63	130	131	50	66	56	193	181	122	496	2109
10.30 – 10.45	59	127	118	73	60	63	186	191	123	500	2065
10.45 – 11.00	84	145	130	55	53	75	229	185	128	542	2062
11.00 – 11.15	73	138	100	71	58	74	211	171	132	514	2052
11.15 – 11.30	63	133	106	58	66	53	196	164	119	479	2035
11.30 – 11.45	65	120	101	62	63	71	185	163	134	482	2017
11.45 – 12.00	62	144	106	69	59	75	206	175	134	515	1990
12.00 – 12.15	69	136	105	65	63	57	205	170	120	495	1971
12.15 – 12.30	82	151	111	62	49	67	233	173	116	522	2014
12.30 – 12.45	68	137	120	68	59	72	205	188	131	524	2056
12.45 – 13.00	77	148	112	52	68	74	225	164	142	531	2072
13.00 – 13.15	68	153	83	63	49	48	221	146	97	464	2041
13.15 – 13.30	59	158	100	55	64	75	217	155	139	511	2030
13.30 – 13.45	80	164	116	67	55	65	244	183	120	547	2053
13.45 – 14.00	71	151	100	72	61	51	222	172	112	506	2028
14.00 – 14.15	80	157	131	68	56	66	237	199	122	558	2122
14.15 – 14.30	62	152	114	61	59	59	214	175	118	507	2118
14.30 – 14.45	84	167	121	79	63	80	251	200	143	594	2165
14.45 – 15.00	69	148	139	65	63	70	217	204	133	554	2213
15.00 – 15.15	89	163	116	84	78	74	252	200	152	604	2259
15.15 – 15.30	79	152	124	70	66	68	231	194	134	559	2311
15.30 – 15.45	108	175	130	76	53	85	283	206	138	627	2344
15.45 – 16.00	94	157	110	74	65	91	251	184	156	591	2381

<b>16.00 – 16.15</b>	82	151	115	91	73	69	233	206	142	581	2358
<b>16.15 – 16.30</b>	75	149	95	81	64	67	224	176	131	531	2330
<b>16.30 – 16.45</b>	104	166	109	49	92	84	270	158	176	604	2307
<b>16.45 – 17.00</b>	112	156	81	76	81	90	268	157	171	596	2312
<b>17.00 – 17.15</b>	76	153	99	69	75	80	229	168	155	552	2283
<b>17.15 – 17.30</b>	95	174	102	67	62	73	269	169	135	573	2325
<b>17.30 – 17.45</b>	82	170	87	50	51	54	252	137	105	494	2215
<b>17.45 – 18.00</b>	78	153	94	43	46	74	231	137	120	488	2107
<b>Σ směr za 12h</b>	3341	6886	5208	3197	3126	3047	10227	8405	6173		
<b>Σ křižov. 12h</b>										24805	
<b>Σ spič. hodina</b>	370	647	480	304	262	318	1017	784	580	2381	



Graf 1: Celkové intenzity vozidel dne 21.4.2010 od 6.00 do 18.00 v 15min. intervalech.

Tabulka 5: Intenzity vozidel ve špičkové hodině přepočtené na jednotková vozidla

	Intenzity pro jednotlivé vjezdy [jv]						Relativní odchylka od průměru [%]						Abs. odch. od průměru [jv]					
	VA	VB	VC	VD	VE	VF	VA	VB	VC	VD	VE	VF	VA	VB	VC	VD	VE	VF
25.3.			489	310					1,1	3,1					5	9		
20.4.	361	696	479	287	272	246	1,0	3,0	-1,0	-4,6	1,4	-11,2	4	20	-5	-14	4	-31
21.4.	374	666	499	305	265	325	4,7	-1,5	3,1	1,4	-1,2	17,3	17	-10	15	4	-3	48
22.4.	371	660	484	303	271	279	3,8	-2,4	0,0	0,7	1,0	0,7	14	-16	0	2	3	2
8.4.	323	682	468	299	265	258	-9,6	0,9	-3,3	-0,6	-1,2	-6,9	-34	6	-16	-2	-3	-19
Průměr	357	676	484	301	268	277												

	Intenzity pro jednotlivé ulice [jv]			Relativní odchylka od průměru [%]			Abs. odch. od průměru [jv]		
	Nám. Rep.	Jahnova	Karla IV.	Nám. Rep.	Jahnova	Karla IV.	Nám. Rep.	Jahnova	Karla IV.
25.3.		799			2,3			18	
20.4.	1057	766	518	2,3	-1,9	-5,0	24	-15	-27
21.4.	1040	804	590	0,7	2,9	8,2	7	23	45
22.4.	1031	787	550	-0,2	0,8	0,9	-2	6	5
8.4.	1005	767	523	-2,7	-1,8	-4,1	-28	-14	-22
Průměr	1033	781	545						

	Celkové intenzity [jv]	Relativní odchylka [%]	Absolutní odchylka [jv]
20.4.	2341	-0,8	-19
21.4.	2434	3,2	75
22.4.	2368	0,4	9
8.4.	2295	-2,7	-65
Průměr	2360		

Souhrnná tabulka 5 uvádí intenzity vozidel od 15.00 do 16.00 přepočtené na jednotková vozidla měřené ve čtyřech (pěti) dnech. V první části je statistika pro jednotlivé směry, v druhé části pro jednotlivé ulice a v třetí části jsou uvedeny sumy všech vozidel, která projela křižovatkou. Ke všem hodnotám je uvedena jejich průměrná hodnota a dále relativní [%] a absolutní [jv] odchylka od průměrné hodnoty.

Výsledné údaje nebylo možné porovnat s jinými měřeními, protože žádný z oslovených subjektů (oblastní Ředitelství silnic a dálnic Pardubice, dopravní inspektorát magistrátu města Pardubice, Technické služby města Pardubice, firma Jansa zajišťující správu SSZ) údaje nedisponuje. Jedinou zjištěnou informací bylo, že poslední měření za pomoci speciálního modulu pro řadiče Siemens probíhalo cca před sedmi lety, ale tato data již

nejsou dostupná a nové měření by vyžadovalo opětovné osazení řadiče speciálním modulem, které by bylo nákladné (řádově desetitisíce Kč).

Během jednotlivých měření nebyly zaznamenány žádné dopravní komplikace, které by mohly vést ke znehodnocení výsledků měření. Dle subjektivního hodnocení se jednalo o běžný provoz v této lokalitě.

Dopravním průzkumem se podařilo stanovit směrodatné intenzity vozidel. Nebylo možné učinit jasný závěr ohledně požadavků ze strany chodců. Přechody pro chodce u Zelené brány (PH) a SPŠE směrem k divadlu (PE) byly vytíženy po celou dobu dopravní špičky. Zbýlé dva přechody byly po sledované dny vytíženy nepravidelně. Na přechodu PA byly po některé dny zaznamenány stálé výzvy ze strany chodců, v jiné dny méně. Nejméně požadavků na zařazení chodecké skupiny bylo zaznamenáno pro přechod PC.

### ***Shrnutí dopravní průzkumu***

V průběhu dvanácti hodin jednoho pracovního dne projelo křižovatkou cca 24 800 vozidel. Celkový počet vozidel započtených do dopravního průzkumu činí 43 512.

Během všech částí dopravního průzkumu bylo vyhodnoceno 238 patnáctiminutových intervalů. Díky nalezení dvojic vjezdů do křižovatky, které nemohou mít volno současně, se podařilo křižovátku vyhodnotit třemi opakovanými sledováními záznamu. V opačném případě by sledování trvalo dvakrát více času. Za každých 15 minut sledování křižovatky proběhlo průměrně 8 cyklů. V každém cyklu se vystřídaly 3 fáze. Celkem bylo zaznamenáno a vyhodnoceno cca 1 560 cyklů.

## 7 Výpočet signálních plánů pro křižovatku

### Karla IV. – Jahnova

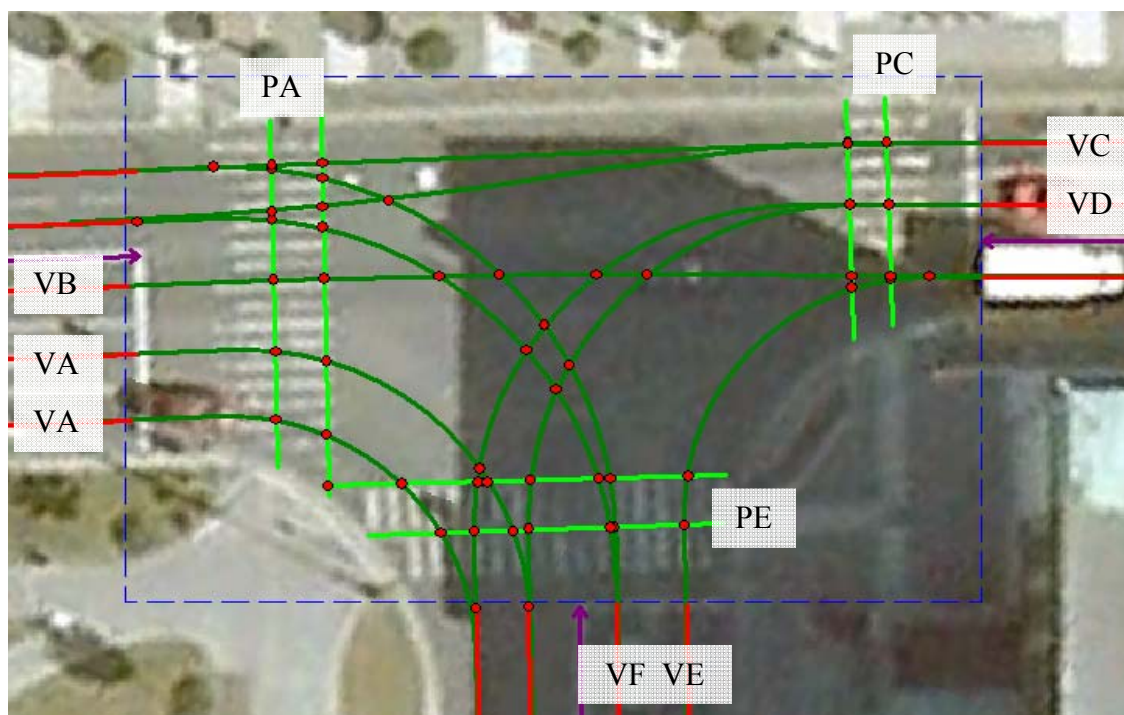
V této kapitole je proveden výpočet pevných signálních plánů pro stykovou izolovanou křižovatku v Pardubicích spojující ulice Karla IV. a Jahnova. Všechny výpočty jsou provedeny na základě kapitol 2.3 a 2.4. Signální plány budou použity pro simulační studii ověřující vhodnost a efektivnost různých variant řízení křižovatky.

#### 7.1 Podklady a průzkumy potřebné pro výpočet

Plánky s přehlednou a podrobnou situací křižovatky jsou uvedeny v kapitole 5. Intenzity provozu pro výpočet byly zjištěny na základě dopravního průzkumu, který je uveden v kapitole 6.

#### 7.2 Kolizní plochy v křižovatce

Obrázek 12 znázorňuje všechny kolizní plochy v křižovatce včetně rekapitulace označení jednotlivých vjezdů.



Obrázek 12: Kolizní plochy v křižovatce [L]



Na základě vyznačených kolizních ploch byla sestavena matice kolizí:

*Tabulka 6: Kolizní matice*

Naj/Vyk	VA	VB	VC	VD	VE	VF	PA	PC	PE
VA				x			x		x
VB				x	x	x	x	x	
VC						x	x	x	
VD	x	x				x		x	x
VE		x						x	x
VF		x	x	x			x		x
PA	x	x	x			x			
PC		x	x	x	x				
PE	x			x	x	x			

### 7.3 Tabulka mezičasů

*Tabulka 7: Vypočtená tabulka mezičasů [L]*

Naj/Vyk	VA	VB	VC	VD	VE	VF	PA	PC	PE
VA				5			6		8
VB				7	8	6	6	10	
VC						7	10	5	
VD	7	4				6		4	8
VE		3						6	4
VF		6	6	5			9		4
PA	15	15	10			10			
PC		7	10	10	8				
PE	13			12	15	15			

*Tabulka 8: Aktuálně používaná tabulka mezičasů.*

*Zdroj: Technické služby.*

Naj/Vyk	VA	VB	VC	VD	VE	VF	PA	PC	PE
VA				4			4		7
VB				4	5	4	4	7	
VC						4	7	4	
VD	6	4				5		4	8
VE		4						7	4
VF		4	5	4			9		4
PA	13	13	10			10			
PC		6	9	9	7				
PE	14			13	16	16			



Nalezeným maximálním fázovým skupinám odpovídá třífázové řízení křižovatky  $F1=S_6=\{VB,VC,PE\}$ ,  $F2=S_3=\{VD,VE,PA\}$ ,  $F3=S_5=\{VA,VF,PC\}$ . Dále byly nalezeny možné kombinace střídání fází (sledy):

- sled 1: F1 F2 F3 F1 F2 F3 ... ,
- sled 2: F1 F3 F2 F1 F3 F2 ... ,
- sled 3: F2 F1 F3 F2 F1 F3 ... = sled 2,
- sled 4: F2 F3 F1 F2 F3 F1 ... = sled 1,
- sled 5: F3 F1 F2 F3 F1 F2 ... = sled 1,
- sled 6: F3 F2 F1 F3 F2 F1 ... = sled 2.

Při cyklickém střídání fází jsou sledy 3 – 6 totožné se sledy 1 a 2.

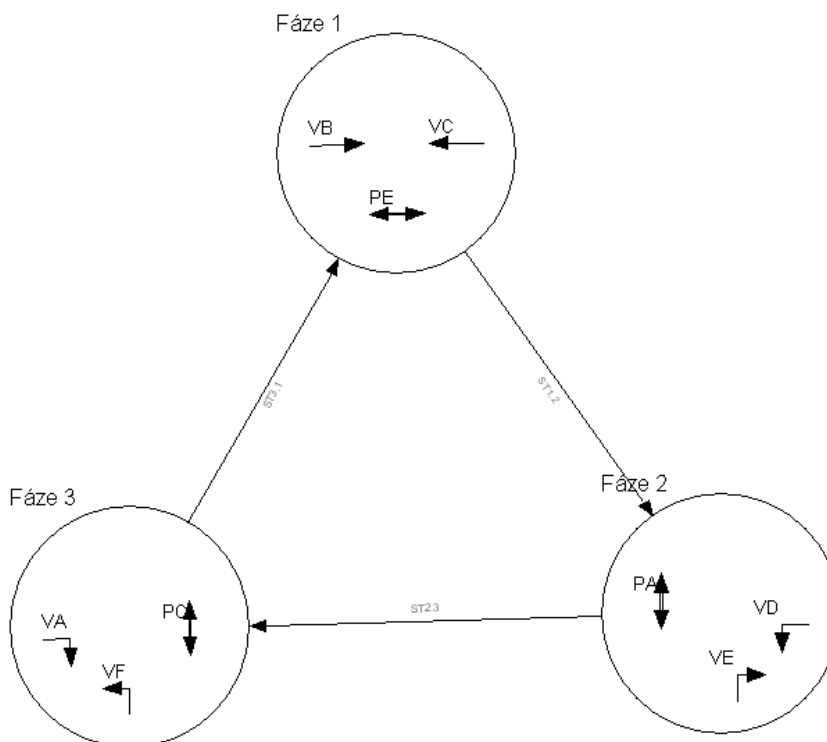
Tabulka 10: Posouzení sledu fází.

Varianta 1.				
Sled fází F1-F2-F3	Přechody fází			$\Sigma$ rozhod. mezičasů [s]
	F1-F2	F2-F3	F3-F1	
Vozidla				
Mezičasy [s]	5	6	5	
	4	5	4	
Rozhodující	5	6	5	16
Chodci				
Mezičasy [s]	9	13	16	
	7	10	13	
	4	7	7	
	6	4	4	
Rozhodující	9	13	16	38

Varianta 2.				
Sled fází F3-F2-F1	Přechody fází			$\Sigma$ rozhod. mezičasů [s]
	F3-F2	F2-F1	F1-F3	
Vozidla				
Mezičasy [s]	4	4	4	
	4	4	4	
Rozhodující	4	4	4	12
Chodci				
Mezičasy [s]	13	9	16	
	10	9	14	
	8	7	7	
	4	4	4	
Rozhodující	13	9	16	38

V tabulce 10 jsou uvedeny možnosti sledu fází, které se posuzují na základě rozhodujících mezičasů mezi fázovými přechody. Z hlediska neproduktivního času u krátkých cyklů, kdy mohou být rozhodující mezičasy mezi chodci a vozidly, není rozdíl mezi jednotlivými fázovými přechody. U dlouhých cyklů, kdy rozhodují mezičasy mezi vozidly, je výhodnější varianta 2 o čtyři sekundy. Vzhledem k současnému dopravnímu řešení křižovatky bude do výpočtů zahrnuta první varianta. Sestavené fázové schéma:



Obrázek 14: Fázové schéma [L]

## 7.5 Výpočet délky cyklu a délky jednotlivých zelených

Pro potřeby simulační studie bylo vypočteno a sestaveno několik signálních plánů s různou délkou cyklu (od 80 do 120 s). Doby zelených byly vypočteny metodou saturevaného toku a metodou spotřeby času. Pro ověření skutečnosti, že signální plány nad 120 s přestávají být efektivní (protože neúměrně narůstá zdržení vozidel v síti) byl sestaven experimentální signální plán s délkou cyklu 130 s. Výpočty dob zelených a sestavené signální plány jsou uvedeny na datovém nosiči v adresáři Přílohy.

Pozn.: Obrázky a tabulky označené [L] byly získány z programu pro výpočty SSZ Lisa+.

## 8 Simulační studie křižovatky Karla IV. – Jahnova

Náplní simulační studie je posouzení alternativních signálních plánů světelného signalizačního zařízení za pomoci experimentální výzkumné metody počítačové simulace, což je zároveň hlavním cílem diplomové práce. Posouzení bude provedeno pro světelně řízenou křižovatku v Pardubicích spojující ulice Karla IV. – Jahnova. Tato křižovatka byla vybrána na základě konzultace s vedoucím diplomové práce. Intenzity projíždějících vozidel byly zjištěny vlastním dopravním průzkumem. Na základě zjištěných intenzit dopravy byly vypočteny různé signální plány. Pro provedení série simulačních experimentů bude sestaven model křižovatky a jejího okolí v simulačním nástroji Aimsun. V rámci simulačních experimentů budou simulovány jednotlivé způsoby řízení křižovatky v době nejvyššího dopravního zatížení. Výsledný model bude sloužit pro ověření a porovnání různých variant řízení světelné křižovatky na základě stanovených dopravně-inženýrských ukazatelů.

Struktura simulační studie bude rámcově odpovídat jednotlivým fázím životního cyklu simulační studie. Pro co nejspolehlivější chování modelu bude provedena validace a verifikace modelu včetně porovnání počtu vozidel na vstupních a výstupních segmentech modelované silniční sítě s reálnými intenzitami provozu.

### 8.1 Vymezení objektu zkoumání

Objektem zkoumání simulační studie je souvislá podsít' silniční sítě města Pardubice – konkrétně izolovaná styková křižovatka Karla IV. – Jahnova a její okolí. Součástí této křižovatky je světelně řízený přechod před Zelenou bránou na Náměstí Republiky, který byl rovněž zahrnut do simulačního modelu.

Dílčí části modelu:

- A čtyřproudá komunikace vedoucí od křižovatky na Náměstí Republiky,
- B část dvouproudé komunikace v ulici Jahnova,
- C část čtyřproudé komunikace v ulici Karla IV.,
- D odbočení do ulice U Divadla,
- E část Třídy Míru,
- S1 izolovaná, světelně řízená, styková křižovatka Karla IV. – Jahnova,
- S2 světelně řízený přechod u Zelené brány na Náměstí Republiky.

## 8.2 Stanovení cílu simulační studie křižovatky

Hlavním cílem simulační studie je posouzení vlivu délky cyklu a signálních dob zelených na propustnost křižovatky Karla IV. – Jahnova v době nejvyššího dopravního zatížení. Posouzení bude provedeno na základě pevných signálních plánů vypočtených v rámci diplomové práce.

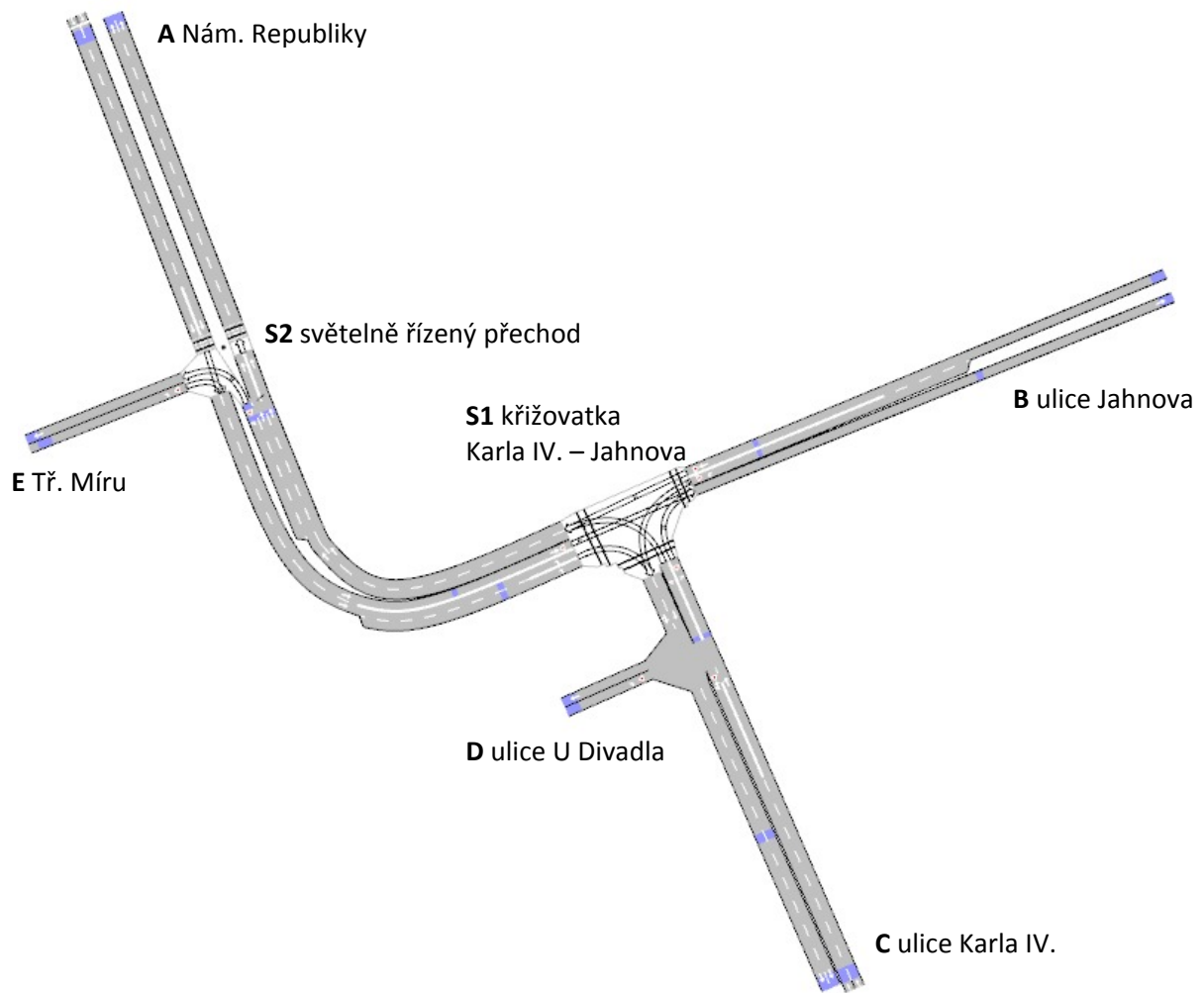
Získaná data simulačního modelu budou posouzena na základě stanovených dopravně-inženýrských ukazatelů.

## 8.3 Vymezení zkoumaného systému

Před zahájením tvorby simulačního modelu je nutné vymežit zkoumaný systém, který zahrnuje pouze významné aspekty zkoumaného objektu. Od ostatních aspektů zkoumaného objektu, které nejsou z pohledu konkrétního typu zkoumání důležité, bude abstrahováno (budou zanedbány).

Prvky, které vymezují zkoumaný systém:

- Stabilní permanentní prvky:
  - Úseky zkoumaného segmentu silniční sítě. Tyto úseky jsou znázorněny na obrázku 15 a jsou očíslovány dle vymezení objektu zkoumání.
  - Světelná signalizační zařízení. Názvy signálních skupin křižovatky Karla IV. – Jahnova jsou uvedeny v kapitole 7, obrázek 10. Signální skupiny pro přechod u Zelené brány jsou označeny VG a VH pro vozidla a PH pro chodce (viz. kapitola 5, obrázek 10).
- Mobilní temporární prvky – osobní automobily, autobusy. Řádově jednotky nákladních automobilů a motocyklů byly přepočteny na jednotková vozidla a připočteny k osobním automobilům.
- Při tvorbě signálních plánů je uvažováno se stálou přítomností chodců v systému. V každém cyklu jsou zařazovány zelené pro všechny chodecké skupiny. Tato situace odpovídá skutečnému stavu (po sledované období) pro přechody u Zelené brány (PH) a u Střední průmyslové školy elektrotechnické (PE).



Obrázek 15: Zkoumaný systém

## 8.4 Konceptuální model vymezeného systému

Pro simulaci silničních systémů existuje velké množství specializovaných simulačních nástrojů, které jsou výsledkem dlouhodobého vývoje a neustálého vylepšování vlastností a funkcí těchto nástrojů. Vývoj vlastního simulačního nástroje srovnatelné kvality by byl netriviální a dlouhodobou záležitostí. Takový vývoj by měl smysl pouze v případě dostatečného využití produktu v praxi. Z výše uvedených důvodů se přistupuje k použití již existujících simulačních nástrojů. Pro výstavbu modelu sledovaného segmentu silniční sítě byl zvolen mikroskopický simulační nástroj Aimsun. Tento produkt využívají i české firmy<sup>1</sup> specializující se na simulaci silničního provozu.

<sup>1</sup> Tato informace byla zjištěna na základě rešerše při vyhledávání informací o možnostech simulace v dopravě.

Protože metodika tvorby modelu je v tomto případě dána možnostmi simulačního nástroje Aimsun, není nezbytná tvorba konceptuálního modelu (pomocí neimplementačního formalismu). Lze tedy přistoupit k tvorbě vlastního modelu.

Pozn.: Popis a principy tvorby simulačního modelu jsou popsány v manuálech k programu Aimsun [1].

## 8.5 Získání a zpracování vstupních dat pro simulační studii

Intenzity vozidel byly získány provedením vlastního dopravního průzkumu. Data do modelu byla nejprve zadána prostřednictvím tzv. traffic state, která určuje intenzity vozidel na vstupních komunikacích a procentuální rozpad dopravní poptávky pro jednotlivá odbočení. Pro přesnější možnost směrování vozidel a pro lepší možnosti vizualizace ve 2D modelu byla data přepočtena na tzv. O/D matice. Nákladní vozidla (cca 1 – 2 na vjezd) a motocykly byly přepočteny na jednotková vozidla. Pro osobní vozidla a pro autobusy, které nejsou součástí MHD, byly sestaveny O/D matice. Zbylé autobusy byly definovány prostřednictvím městské hromadné dopravy (Public Transport) dle platných jízdních řádů pro sledované období. Vozidla přijíždějící od Náměstí Republiky (A) a z ulice Karla IV. (C) byla generována pro každý jízdní pruh zvlášť, čemuž odpovídají vstupní intenzity A a A.2, C a C.2. Toto opáření bylo zvoleno z důvodu, že většina vozidel v modelovaném systému (originálu) je v těchto úsecích již zařazena v pruzích dle požadovaného cíle. Před tímto opatřením byla vozidla náhodně generována do libovolného z jízdních pruhů. V případě tvorby kolony se vozidla v nesprávném pruhu nestačila nebo nemohla zařadit do požadovaného pruhu.

*Tabulka 11: OD matice osobní automobily*

	A	B	C	D	E	Celkem
A	0	607	0	0	0	607
A.2	0	0	318	16	0	334
B	424	0	286	14	0	724
C	259	0	0	27	0	286
C.2	0	264	0	0	0	264
D	0	0	0	0	0	0
E	0	11	7	0	0	18
Celkem	683	882	611	57	0	2233



Tabulka 12: OD matice autobusy ostatní

	A	B	C	D	E	Celkem
A	0	3	0	0	0	3
A.2	0	0	0	0	0	0
B	1	0	1	0	0	2
C	0	0	0	0	0	0
C.2	0	3	0	0	0	3
D	0	0	0	0	0	0
E	0	0	0	0	0	0
Celkem	1	6	1	0	0	8

## 8.6 Tvorba simulačního modelu

Tvorba simulačního modelu byla provedena dle metodiky výrobce aplikace. Následující text stručně shrnuje postup tvorby simulačního modelu:

1. Vytvoření nového simulačního modelu na základě šablony (template), ve které jsou výrobcem předdefinovány veškeré základní parametry modelu – silnic, vozidel, chodců, atd.
2. Získání mapových podkladů pro stavbu modelu sledovaného silničního segmentu. Jako podklad pro tvorbu modelu byly vybrány mapy z aplikace Google maps, protože na těchto podkladech byly nejlépe vidět detaily silnic (zejména podélné značení jednotlivých pruhů). Žádná z aplikací neumožnila export fotografie v dostatečné kvalitě celého modelovaného území. Pro získání velkého snímku v dostatečné kvalitě bylo nutné extrahovat jednotlivé získané snímky a následně je spojit v jeden velký s větším rozlišením (všechny musely být pořízeny ve stejném měřítku). Následoval výpočet rozlišení fotografie (počtu pixelů) vzhledem k fyzické velikosti fotografie (např. 1 pixel fotografie = x metrů skutečné velikosti). Složená fotografie společně s vypočteným měřítkem byla importována do simulačního nástroje.
3. Nad mapovým podkladem byl vytvořen model silniční sítě včetně křižovatek, světelných signalizačních zařízení, centroidů a jejich vzájemného propojení.
4. Na základě dopravního průzkumu byla stanovena dopravní poptávka pro jednotlivé typy entit. Tato data byla nejprve definována pomocí tzv. traffic state. Pro lepší možnosti směřování vozidel v simulačním modelu a pro přesnější vyhodnocení dat

byla dopravní poptávka transformována na tzv. O/D matice. Dále byly definovány signální plány a parametry nezbytné pro správnou funkci simulačního modelu.

5. V místech, kde jsou umístěny skutečné detektory vozidel a v místech, kde je třeba sledovat dopravně-inženýrské ukazatele, byly umístěny detektory sledující parametry daného silničního segmentu.
6. Na základě nastavených vstupních údajů byl sestaven plán dopravní poptávky.
7. Byly vytvořeny nové experimenty, v rámci kterých byly definovány různé dopravní scénáře s různými signálními plány.
8. Byla zjištěna doba nezbytná pro náběh simulátoru (tzv. warm-up time) a minimální počet replikací, které je nutné provést pro získání dostatečně<sup>1</sup> přesných výsledků.

## 8.7 Verifikace a validace simulačního modelu

Výchozí metodou pro verifikaci simulačního modelu bylo pozorování 2D simulace. Sledování modelu bylo zaměřeno na propustnost modelu silniční sítě a na chování vozidel v síti. První problém s generováním vozidel do požadovaných pruhů byl již popsán v kapitole 8.5. Druhým zjištěným problémem bylo časté přejíždění vozidel z jednoho pruhu do druhého od Náměstí Republiky po křižovatku. Vozidla se pak nestačila zařadit zpět do správného pruhu. Tento problém vyřešila korekce nastavení parametrů Distance Zone 1 a Distance Zone 2 pro všechny části silniční sítě sledovaného úseku.

Další částí verifikace bylo porovnání intenzit vozidel, která vstoupila do systému a nesledně jej opustila. Toto porovnání bylo provedeno z důvodu analýzy propustnosti sítě a z důvodu prověření vlivu volby simulačního kroku, který je vysvětlen níže.

### Vliv simulačního kroku na experimenty a posouzení propustnosti systému

Simulační krok nebo též simulační cyklus je časový interval, ve kterém jsou aktualizovány stavy (atributy) všech objektů (např. vozidel, světelné signalizace, ...) v simulačním modelu. Hodnota simulačního kroku může být volena v rozmezí od 0,1 do 1 sekundy. Při nižší volbě simulačního kroku (0,1 – 0,3) se zdatelně prodlužuje doba výpočtu jednotlivých replikací.

---

<sup>1</sup> Stanovení požadované míry přesnosti je vysvětleno v podkapitole 3.3.

V diplomové práci [2] byl popsán problém vlivu volby simulačního kroku na chování simulačního modelu pro Aimsun ve verzi 5.1.7. Z tohoto důvodu byla provedena série měření pro posouzení vlivu simulačního kroku na chování modelu z hlediska vstupů do systému, výstupů ze systému a průjezdů sledovanou křižovatkou. Pro přehlednost jsou v tabulce 13 uvedeny průměrné hodnoty ze všech detektorů pro vybraný simulační krok a v tabulce 14 průměrné hodnoty výstupních detektorů

*Tabulka 13: Vliv simulačního kroku:  
průměrné hodnoty ze všech detektorů*

Simulační krok	Očekávaná průměrná hodnota	Změřená průměrná hodnota	Absolutní odchylka	Relativní odchylka
	[vozidlo]	[vozidlo]	[vozidlo]	[%]
0,30	464,80	461,60	-3,20	-0,55
0,40	464,80	464,07	-0,73	0,14
0,50	464,80	465,67	0,87	0,38
0,60	464,80	466,20	1,40	0,21
0,75	464,80	464,33	-0,47	0,03
0,80	464,80	465,73	0,93	0,27
0,90	464,80	466,07	1,27	0,43
1,00	464,80	464,13	-0,67	0,13

*Tabulka 14: Vliv simulačního kroku:  
průměrné hodnoty výstupní detektory*

Simulační krok	Očekávaná průměrná hodnota	Změřená průměrná hodnota	Absolutní odchylka	Relativní odchylka
	[vozidlo]	[vozidlo]	[vozidlo]	[%]
0,30	466,60	463,60	-3,00	-0,79
0,40	466,60	466,40	-0,20	0,59
0,50	466,60	467,80	1,20	0,71
0,60	466,60	468,40	1,80	0,20
0,75	466,60	466,40	-0,20	-0,13
0,80	466,60	467,80	1,20	0,15
0,90	466,60	468,40	1,80	0,83
1,00	466,60	466,20	-0,40	0,21

Pro model silniční sítě Karla IV. – Jahnova, simulovaný ve verzi 6.0.6, byl zjištěn zanedbatelný vliv simulačního kroku. Při změnách simulačního kroku se počty vozidel, které projely simulačním modelem, lišily minimálně. Pro parametrizaci modelu byla zvolena hodnota simulačního kroku 0,75, který vyšel jako nejvhodnější při prvním měření a během kterého byla provedena kalibrace modelu. Propustnost modelu je uvedena v tabulkách 15, 16.

*Tabulka 15: Očekávané a změřené intenzity*

*vozidel na vstupech*

Detektor	Očekávaný počet vozidel	Změřený počet vozidel	Absolutní odchylka	Relativní odchylka
			[vozidlo]	[%]
Sukova	966	966	0	0,00
Jahnova	762	763	1	0,13
Karla IV.	564	564	0	0,00
Třída Míru	41	43	2	4,65
$\Sigma$	2333	2336	3	

*Tabulka 16: Očekávané a změřené intenzity*

*vozidel na výstupech*

Detektor	Očekávaný počet vozidel	Změřený počet vozidel	Absolutní odchylka	Relativní odchylka
			[vozidlo]	[%]
Sukova	708	707	-1	-0,14
Jahnova	922	932	10	1,07
Karla IV.	623	613	-10	-1,61
Třída Míru	23	23	0	0,00
U Divadla	57	57	0	0,00
$\Sigma$	2333	2332	-1	

## Kalibrace modelu

Sledováním animace simulačního modelu bylo subjektivně zjištěno, že vozidla projíždí silničním segmentem příliš krátkou dobu. Pro ověření této skutečnosti byl sestaven simulační pokus, ve kterém bylo pro jeden směr vygenerováno 100 vozidel (rovnoměrně po 1 hodinu) tak, aby se vzájemně neomezovala. Vypočtená průměrná hodnota doby jízdy v tomto směru byla porovnána s reálným „ideálním“ průjezdem segmentu silniční sítě (ve večerních hodinách) při dodržení pravidel silničního provozu a při bezpečném průjezdu silničním segmentem (např. zpomalení před křižovatkou, atd.). Tímto byl zjištěn nejkratší reálný čas, potřebný pro projetí daného segmentu.

Při prvním měření bylo použito jen stopek. Následující den bylo provedeno další měření s použitím GPS navigace, která zaznamenávala průjezdy jednotlivými směry dle modelu. Pro každý segment modelu byla získána doba průjezdu a průměrná rychlost. Na základě zjištěných hodnot byla provedena kalibrace modelu. Po této kalibraci se prodloužila „ideální“ doba průjezdu segmentem silniční sítě. Např. doba průjezdu sítí pro směr Náměstí Republiky > Jahnova se prodloužila z původních 32 na 39 sekund, což odpovídá reálnému průjezdu sítí.)

Po přečtení studie [5] srovnávající jednotlivé silniční simulační nástroje bylo zjištěno, že zásadním parametrem pro kalibraci modelu v simulačním nástroji Aimsun je parametr Reaction Time At Stop. Pomocí tohoto parametru se modeluje reakční doba řidiče (vozidla) při rozjezdu. Výchozí nastavení tohoto parametru je 1,35 sekundy.

Při srovnání projetých vozidel křižovatkou během signálu volno (zelené) byl zjištěn vyšší počet vozidel oproti reálné situaci. Navýšením parametru Reaction Time At Stop z 1,35 na 1,5 bylo dosaženo lepších výsledků. Např. směrem VA projelo při výchozím nastavení parametru cca 30 vozidel za 43 sekund. Navýšením reakční doby projelo cca 20 vozidel za 43 sekund, což je průměrná hodnota zjištěná na základě několikanásobného pozorování vozidel v tomto směru.

## 8.8 Plán simulačních experimentů

Cílem této simulační studie je prověřit alternativní signální plány pro křižovatku Karla IV. – Jahnova na základě sledovaných dopravně-inženýrských ukazatelů. Tabulka 17 popisuje signální plány, které byly porovnávány v rámci simulační studie. Tyto signální plány budou pro každý simulační experiment měněny. Následně budou provedené simulační experimenty vzájemně porovnány.

*Tabulka 17: Posuzované signální plány pro jednotlivé simulační experimenty*

Experiment	Signální plán	Délka cyklu [s]	Poznámka
1.	MST 80	80	
2.	MST 90	90	
3.	MST100	100	
4.	MST110	110	
5.	MST120	120	
6.	MSTu 110	110	upravené délky zelených
7.	MSTu 120.	120	upravené délky zelených
8.	STP11 110	110	vypočteno prostřednictvím Lisa+
9.	STP13 100	100	vypočteno prostřednictvím Lisa+
10.	HTB12 110	110	vypočteno prostřednictvím Lisa+

Signální plány pro experimenty 1 – 7 byly vypočteny metodou saturevaného toku. U signálních plánů 6, 7 byly upraveny délky zelených signálů na základě sledování dopravní situace v simulačním nástroji. Signální plány pro experimenty 8 – 10 byly vypočteny a upraveny pomocí programu Lisa+.

## 8.9 Sledované dopravně-inženýrské ukazatele

Před provedením vlastních simulačních experimentů je třeba stanovit, jaké dopravně-inženýrské ukazatele budou sledovány a v jakých intervalech mají být tyto ukazatele zaznamenávány. Základní získána data je možné zobrazit přímo po dokončení simulačních experimentů tabelárně nebo graficky. Pro rychlejší zpracování výsledků je možné získávat data přímo z databáze prostřednictvím SQL dotazů.

Nejdůležitějšími sledovanými údaji jsou doba zdržení (proti ideálnímu průjezdu), počet zastavení a doba zastavení. Důležitým údajem je tok silniční sítě, který může zaznamenat případné problémy s průjezdností sítě během simulačních výpočtů.

*Tabulka 18: Sledované dopravně-inženýrské ukazatele*

<b>Ukazatel</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Popis ukazatele</b>	<b>Označení Aimsun</b>
Průměrný tok v síti	vozidel/h	průměrný počet vozidel, která projela sítí za jednotku času	Mean flow
Hustota provozu	vozidel/km	průměrný počet vozidel v síti na 1 km	Density
Průměrná rychlost	km/hod	průměrná rychlost vozidel v síti	Mean speed
Průměrná doba jízdy	s/km	průměrná doba jízdy vozidla	Travel time
Průměrná doba zdržení	s/km	průměrný čas zdržení vozidla na 1 km délky sítě	Delay time
Průměrná doba stání	s/km	průměrná doba stání vozidla na 1 km sítě	Stop time
Celková doba jízdy	h	suma času všech vozidel, která projela sítí	Total travel time
Počet zastavení		průměrný počet zastavení vozidla na 1 km sítě	Number of stops
Spotřeba paliva	l	spotřeba paliva všech vozidel v síti	Fuel consumption

## 8.10 Délka simulačního výpočtu

Na základě provedeného dopravního průzkumu bylo zjištěno nejvyšší zatížení světelně řízené křižovatky v období od 15.00 do 16.00. Délka simulačního výpočtu byla stanovena na 1 hodinu simulačního času, který odpovídá jedné hodině reálného času.

## 8.11 Provedení simulačních experimentů

### 8.11.1 Stanovení doby náběhu simulátoru

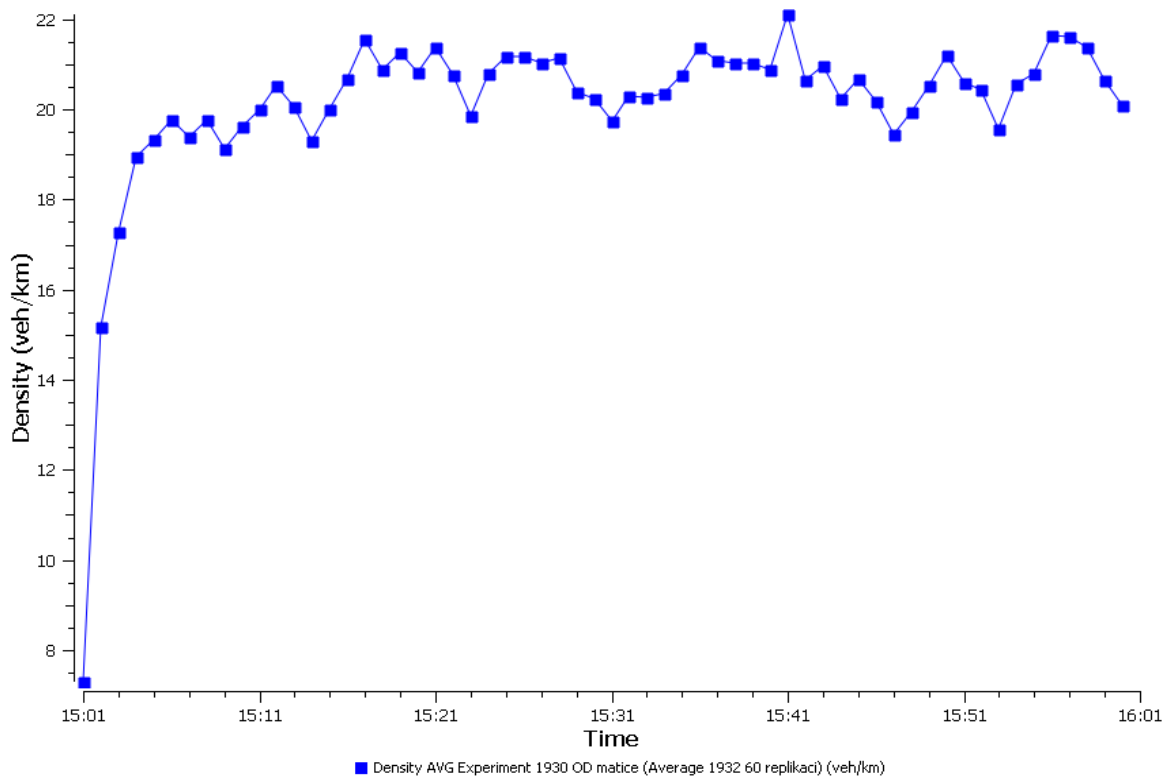
Protože v době sledovaného období je reálná silniční síť již naplněna vozidly, je třeba stanovit dobu náběhu simulátoru, během které dojde k „naplnění“ simulované silniční sítě. Dobu náběhu simulátoru je možné stanovit např. na základě sledování hustoty dopravy v modelovaném segmentu sítě. Tato hodnota má rostoucí tendenci společně s postupným přibýváním vozidel v síti. Čas, během kterého sledovaný ukazatel již nenarůstá (za předpokladu, že během této doby nedojde ke změně dopravní poptávky), lze stanovit jako dobu

potřebnou pro náběh simulárou (anglicky warm-up time). Alternativně lze sledovat i jiné ukazatele jako například tok sítí (flow) udávající průměrný počet vozidel, která projela segmentem sítě za jednotku času. Tento ukazatel měl obdobnou vypovídací hodnotu jako hustota dopravy (density).

*Tabulka 19: Vývoj hustoty dopravy  
pro prvních 30 min sim. výpočtu*

Čas	Hustota [voz/hm]	Čas	Hustota [voz/hm]
15:01:00	7,30	15:16:00	20,61
15:02:00	15,19	15:17:00	21,57
15:03:00	17,33	15:18:00	20,91
15:04:00	18,93	15:19:00	21,08
15:05:00	19,47	15:20:00	20,63
15:06:00	19,84	15:21:00	21,47
15:07:00	19,39	15:22:00	20,73
15:08:00	19,75	15:23:00	19,73
15:09:00	19,20	15:24:00	20,44
15:10:00	19,83	15:25:00	20,95
15:11:00	20,03	15:26:00	20,85
15:12:00	20,43	15:27:00	20,91
15:13:00	20,08	15:28:00	21,05
15:14:00	19,13	15:29:00	20,33
15:15:00	19,78	15:30:00	20,21





*Graf 2: Vývoj počtu vozidel na 1 km síť během simulovaného období*

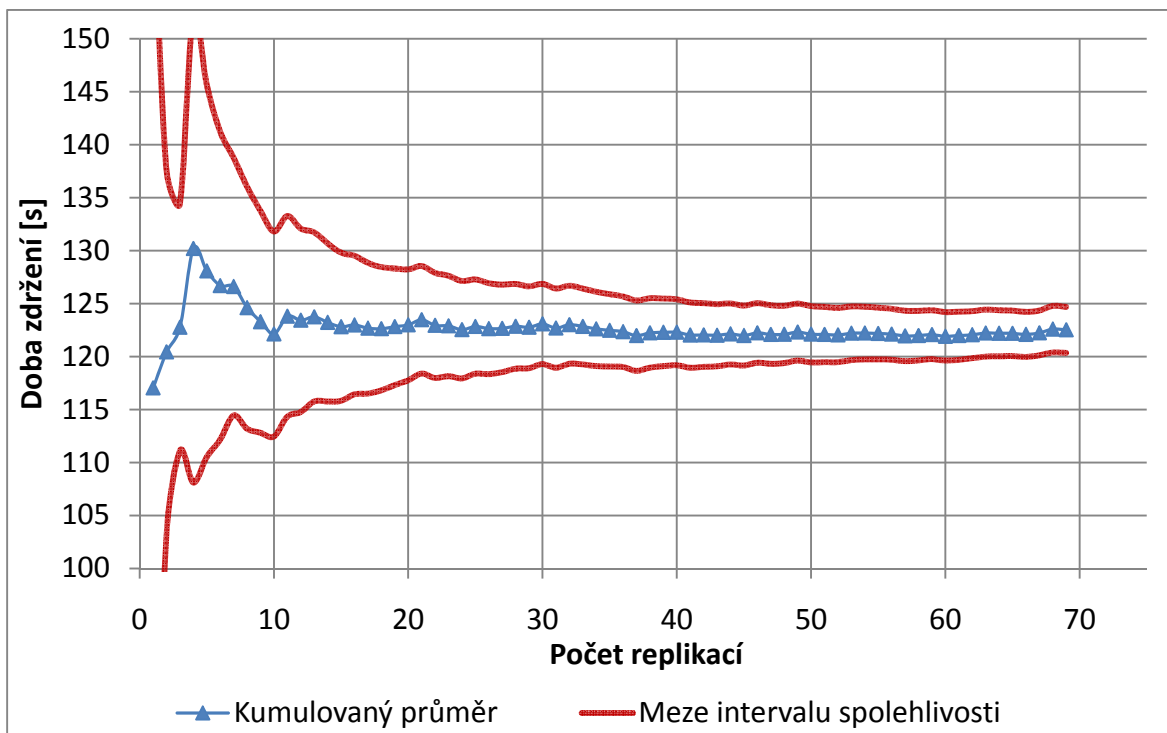
Dle sledování vývoje časové řady (obrázek 16, tabulka 19) dochází k prvnímu nárůstu hustoty provozu po šesti minutách simulačního výpočtu na cca 20 vozidel na km silniční síť. Po 16 minutách simulačního výpočtu tato hodnota vzroste na cca 21 vozidel. Časová řada dále kolísá, ale již neroste. Na základě vývoje počtu vozidel na 1 km byla stanovena doba náběhu simulátoru na 20 min.

### 8.11.2 Stanovení minimálního počtu replikací

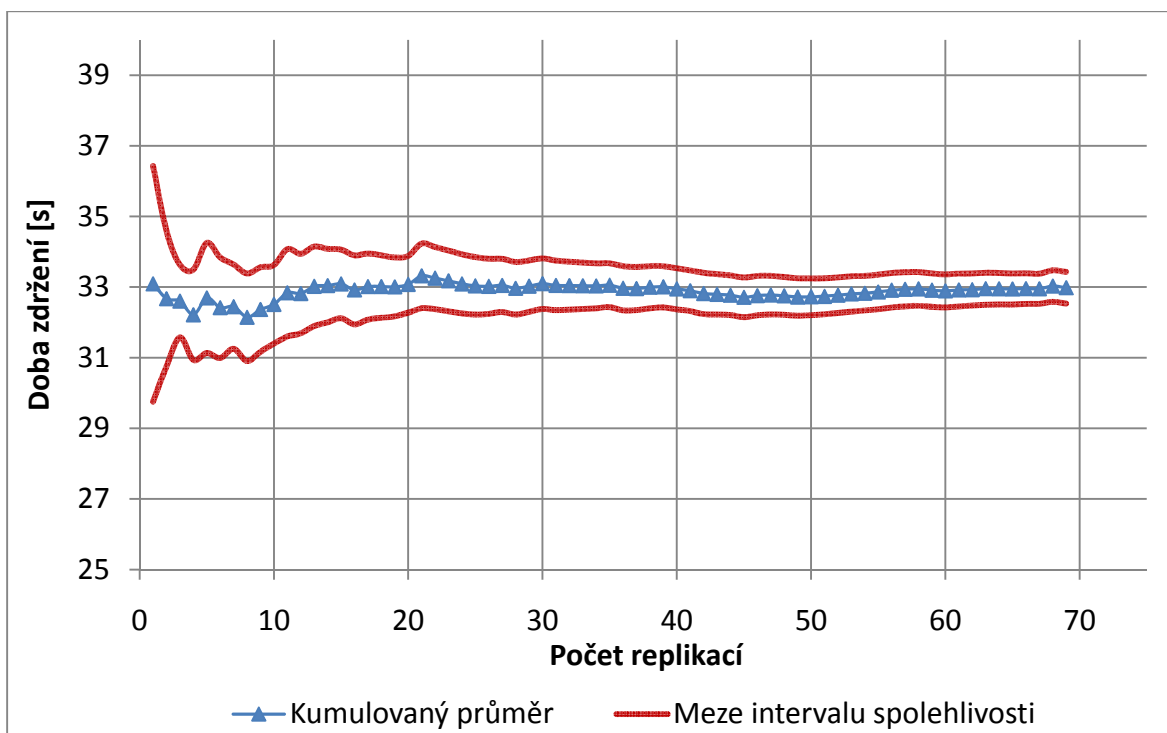
Pro dosažení požadované přesnosti sledovaných ukazatelů je nezbytné provést minimální počet replikací simulačních experimentů. Počet opakování simulačních experimentů bude stanoven na základě výpočtu pološířky 95% intervalu spolehlivosti pro odhad střední hodnoty. Hlavním sledovaným parametrem je doba zdržení vozidel proti ideálnímu průjezdu sítí – ukazatel Mean Delay Time. Požadovaná přesnost ukazatele je stanovena na 3 sekundy, čemuž odpovídá vykonání cca 40 replikací. Na základě porovnání přesnosti ukazatele pro jiné signální plány byl stanoven počet replikací na 70.

Tabulka 20: Vývoj kumulativního průměru doby zpoždění  
pro celý systém.

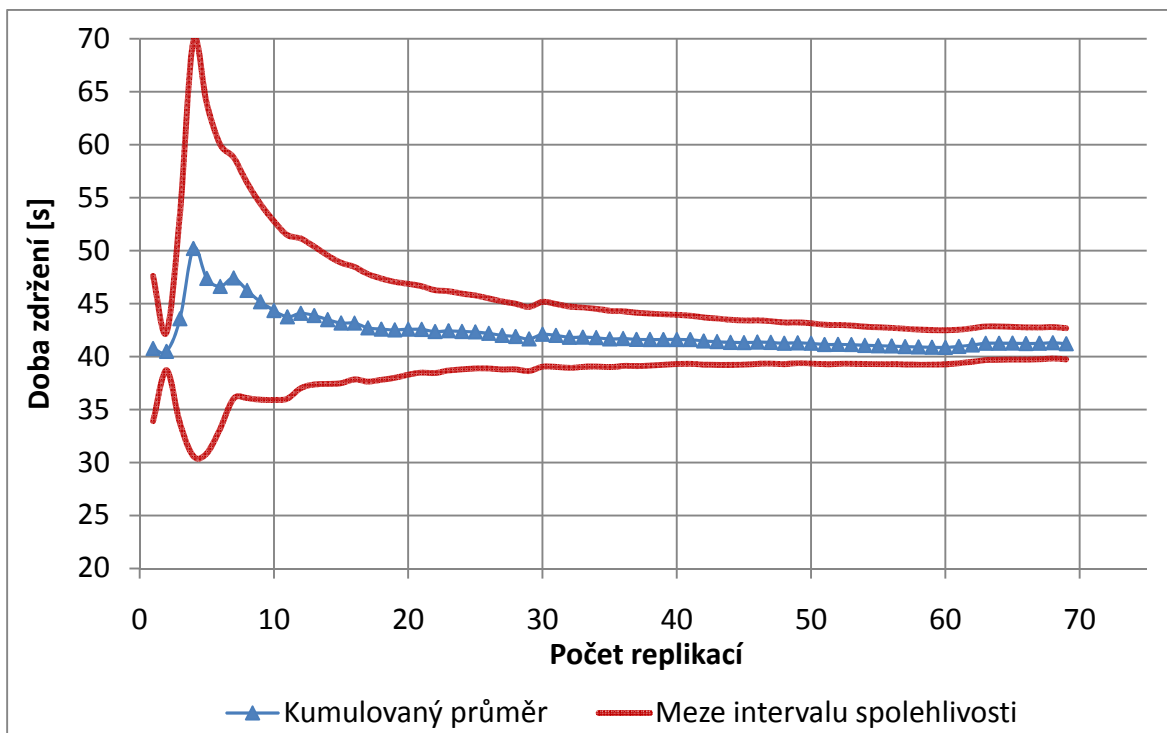
Replikace	Doba zpoždění [s]	Kumul. prům.	95% int. spol. kum. prům.		
			Pološířka	Dolní mez	Horní mez
1	123,61				
2	135,05	129,33	72,71	56,62	202,04
3	124,55	127,73	15,78	111,95	143,52
4	126,16	127,34	8,35	118,99	135,69
5	130,90	128,05	5,98	122,08	134,03
6	120,56	126,80	5,54	121,26	132,35
7	129,92	127,25	4,59	122,66	131,84
8	125,87	127,08	3,86	123,21	130,94
9	111,17	125,31	5,26	120,05	130,57
10	136,34	126,41	5,24	121,17	131,66
11	111,86	125,09	5,52	119,56	130,61
12	119,83	124,65	5,07	119,58	129,72
13	108,68	123,42	5,34	118,08	128,76
14	115,57	122,86	5,05	117,81	127,91
15	119,85	122,66	4,69	117,97	127,35
16	118,53	122,40	4,39	118,01	126,79
17	128,33	122,75	4,17	118,58	126,92
18	115,42	122,34	4,01	118,34	126,35
19	118,10	122,12	3,80	118,32	125,92
20	129,10	122,47	3,67	118,80	126,14
...	...	...	...	...	...
60	133,56	123,86	2,62	121,24	126,48
61	113,90	123,70	2,60	121,10	126,29
62	124,17	123,71	2,55	121,15	126,26
63	119,20	123,64	2,51	121,12	126,15
64	128,73	123,72	2,48	121,24	126,19
65	149,47	124,11	2,57	121,55	126,68
66	108,54	123,88	2,57	121,31	126,44
67	120,33	123,82	2,53	121,29	126,35
68	144,35	124,12	2,57	121,56	126,69
69	131,71	124,23	2,54	121,70	126,77
70	125,40	124,25	2,50	121,75	126,75



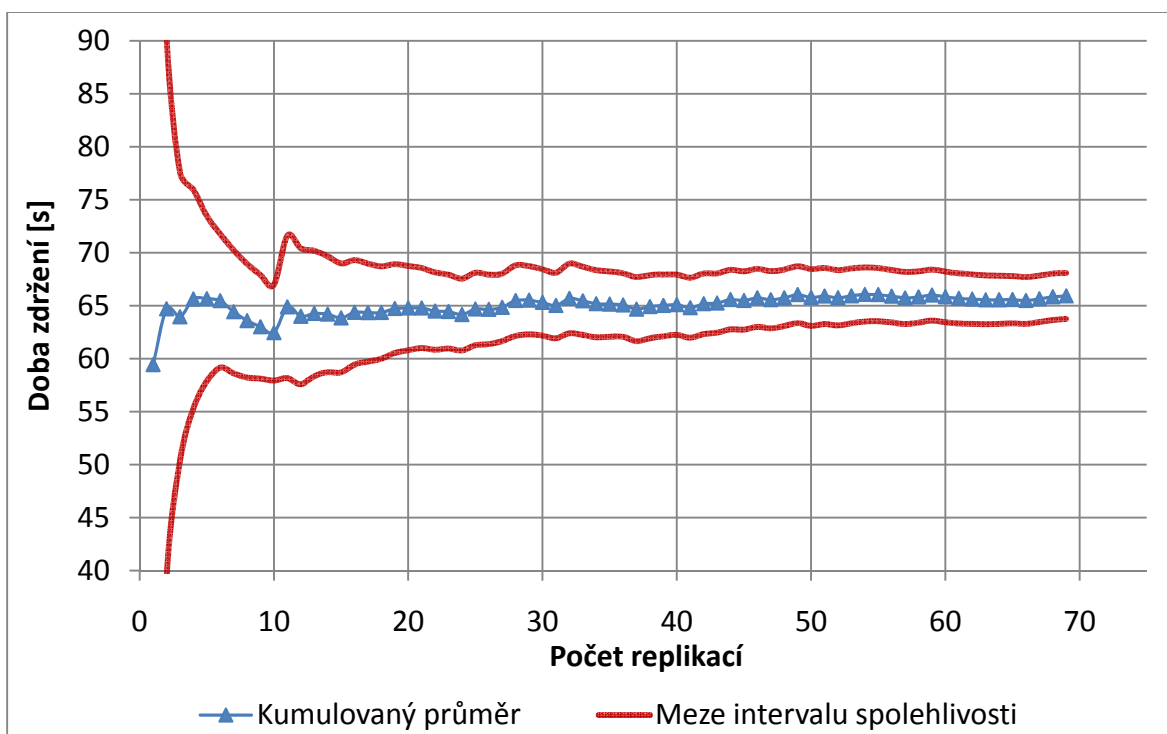
Graf 3: Vývoj kumulativního průměru doby zdržení v celém systému



Graf 4: Vývoj kumulativního průměru doby zdržení vjezd do křižovatky od Nám. Rep.



Graf 5: Vývoj kumulativního průměru doby zdržení vjezd do křižovatky ul. Jahnova



Graf 6: Vývoj kumulativního průměru doby zdržení vjezd do křižovatky Karla IV.

Na základě sledování vybraných charakteristik byl stanoven minimální počet replikací na 70. Tabulka 20 shrnuje přesnost dopravně-inženýrských ukazatelů na základě výpočtu pološířky 95% intervalu spolehlivosti při provedení 70 replikací. Údaje byly sledovány pro celý systém.

*Tabulka 21: Přesnost sledovaných ukazatelů pro celý systém*

Ukazatel	Pološířka int. spol.	Jednotka
Průměrný tok sítí	10,303	voz./h
Průměrná hustota provozu	0,241	voz./km
Průměrná rychlost	0,137	km/h
Průměrná doba jízdy	2,162	s/km
Doba zpoždění	2,165	s/km
Doba zastavení	2,012	s/km
Počet zastavení	0,034	
Spotřeba paliva	1,551	l

## 8.12 Vyhodnocení výstupních údajů

### Srovnání signálních plánů pro celý systém (souhrnně)

*Tabulka 22: Srovnání signálních plánů na základě vybraných dopravně-inženýrských ukazatelů pro celý systém (souhrnně)*

Signální plán	Prům. tok sítí	Prům. hustota vozidel	Prům. rychlost	Prům. doba jízdy	Prům. doba zdržení	Prům. doba stání	Poč. zastavení	Celk. doba jízdy	Spotřeba paliva
	voz./h	voz./km	km/hod	s/km	s/km	s/km		h	l
MST80	2340	21,98	20,01	234,49	153,54	133,92	3,60	60,3	150,22
MST90	2347	20,97	20,64	222,22	141,27	123,09	3,26	57,6	143,89
MST100	2342	19,30	21,58	201,78	120,82	104,63	2,86	53,1	132,22
MST110	2346	19,49	21,75	203,48	122,52	106,83	2,75	53,5	131,16
MST120	2352	19,69	21,89	205,16	124,25	108,87	2,63	54,1	130,52
MST130	2343	20,48	21,54	213,56	132,61	117,15	2,63	56,2	132,82
MST110u	2346	19,50	21,37	201,49	120,55	104,76	2,80	53,6	132,63
MST120u	2346	20,45	20,82	209,05	128,12	112,14	2,83	56,1	136,30
STP11 110	2341	19,75	22,19	200,02	119,10	103,36	2,87	54,2	134,71
STP13 100	2344	17,01	24,34	174,96	94,03	79,37	2,45	46,7	118,40
HTB12 110	2347	20,20	21,97	205,38	124,46	108,29	2,97	55,4	137,69

Na základě změřených dat je patrné, že optimální délka cyklu pro řízení křižovatky je mezi 100 – 120 s. Při volbě kratšího cyklu narůstá doba zdržení o 20 sekund a více.

Nejlepším signálním plánem je STP13 s průměrnou dobou zdržení 94,03 s, avšak signální programy navržené programem Lisa+ je nezbytné vyhodnocovat samostatně, protože tyto signální programy byly upraveny tak, aby se maximálně využily všechny mezičasy v křižovatce.

### Srovnání vybraných signálních plánů pro jednotlivé vjezdy

*Tabulka 23: Vjezd do křižovatky z Náměstí Republiky*

Signální plán	Prům. hustota vozidel	Prům. rychlost	Prům. doba jízdy	Prům. doba zdržení	Prům. doba stání	Poč. zastavení	Celk. doba jízdy	Spotřeba paliva
	voz./km	km/hod	s/km	s/km	s/km		h	l
MST100	1010	17,48	50,47	34,61	30,15	0,90	14,2	33,40
MST110	1014	18,40	48,86	32,98	28,86	0,83	13,8	31,83
MST120	1013	18,81	49,09	33,23	29,25	0,78	13,8	31,02
MST110u	1005	16,75	53,74	37,86	33,50	0,90	15,0	33,98
STP11 110	1007	16,77	57,91	42,02	37,60	0,92	16,2	35,86
STP13 100	1009	21,16	42,32	26,43	22,33	0,74	11,9	28,08
HTB12 110	1004	17,23	56,40	40,50	36,13	0,91	15,7	34,93

*Tabulka 24: Vjezd do křižovatky – ulice Jahnova*

Signální plán	Prům. hustota vozidel	Prům. rychlost	Prům. doba jízdy	Prům. doba zdržení	Prům. doba stání	Poč. zastavení	Celk. doba jízdy	Spotřeba paliva
	voz./km	km/hod	s/km	s/km	s/km		h	l
MST100	762	18,44	55,55	40,08	35,22	0,91	11,8	31,76
MST110	768	18,38	56,67	41,21	36,50	0,88	12,1	31,96
MST120	770	18,64	56,58	41,14	36,55	0,85	12,1	31,77
MST110u	773	17,55	56,89	41,42	36,63	0,90	12,2	32,58
STP11 110	769	19,15	51,14	35,68	31,28	0,82	10,9	29,76
STP13 100	765	21,54	44,51	29,05	24,96	0,75	9,5	26,81
HTB12 110	775	16,91	61,05	45,59	40,50	0,95	13,2	34,53

Tabulka 25: Vjezd do křižovatky – ulice Karla IV.

Signální plán	Prům. hustota vozidel	Prům. rychlost	Prům. doba jízdy	Prům. doba zdržení	Prům. doba stání	Poč. zastavení	Celk. doba jízdy	Spotřeba paliva
	voz./km	km/hod	s/km	s/km	s/km		h	l
MST100	542	11,09	74,54	61,14	55,73	1,15	11,2	27,89
MST110	538	10,63	79,31	65,92	60,37	1,16	11,9	28,73
MST120	543	10,58	83,59	70,19	64,56	1,15	12,6	29,89
MST110u	539	12,74	65,98	52,59	47,68	1,01	9,9	25,22
STP11 110	538	15,22	58,37	44,98	40,54	0,91	8,7	22,77
STP13 100	543	14,23	63,81	50,42	45,58	1,02	9,7	24,72
HTB12 110	539	16,57	52,28	38,90	34,77	0,84	7,8	21,09

### 8.13 Ukázky simulačního modelu



Obrázek 16: Celkový pohled na simulační model.





Obrázek 17: Křižovatka Karla IV. – Jahnova



Obrázek 18: Ulice Jahnova





*Obrázek 19: Pohled z Náměstí Republiky.*

## **8.14 Závěr simulační studie**

Cílem simulační studie bylo provést srovnání vypočtených signálních plánů pro světelně řízenou křižovatku Karla IV. – Jahnova na základě vybraných dopravně-inženýrských ukazatelů v době nejvyššího dopravního zatížení křižovatky.

Byly provedeny experimenty s různými signálními plány. Získaná data byla statisticky vyhodnocena. Na základě analýzy sledovaných dopravně-inženýrských ukazatelů byly nalezeny nejvhodnější signální plány pro řízení křižovatky s minimální dobou zdržení vozidel v síti. Vybraný pevný signální plán může být vhodným podkladem pro návrh dynamického řízení křižovatky. Při provedení obdobného průzkumu pro méně vytížená období (např. v době kolem 12.00 hod.) lze stanovit nejvhodnější délku cyklu i pro toto období. Na základě zjištěné nejvhodnější minimální a maximální délky cyklu lze přizpůsobit dynamický signální plán.

Poznámka k závěru simulační studie:

Simulační nástroj Aimsun by byl vhodný i pro posouzení plně dynamického řízení křižovatky včetně interakce ze strany chodců (tzn. vkládání alternativních fází na výzvu místo předem stanovených fází). Taková možnost ale není přímo implementována v simulačním nástroji. Pro vytvoření simulačního modelu uvažujícího s výše popsaným problémem je nezbytné vytvoření vlastní logiky řízení křižovatky v externím modulu a následné propojení prostřednictvím rozhraní simulačního nástroje (API). Autor diplomové práce zaslal žádost výrobcí nástroje Aimsun o zaslání příkladu externího řízení křižovatky, výrobce software však poskytuje takové informace pouze při uzavření smlouvy o podpoře produktu. Nicméně pro nasazení produktu Aimsun do „ostrého“ použití (pro komplexní hodnocení řízení křižovatek) má takové rozšíření smysl a je nezbytným.

## 9 Závěr

Hlavním cílem diplomové práce bylo posouzení alternativních signálních programů světelného signalizačního zařízení vybrané křižovatky v období nejvyššího dopravního zatížení za pomoci experimentální výzkumné metody počítačové simulace. Pro tyto účely byla vybrána světelně řízená křižovatka Karla IV. – Jahnova.

Výchozími předpoklady pro splnění cíle bylo nastudovat problematiku tvorby signálních plánů, dále nastudovat metodiku tvorby simulačních modelů v simulačním nástroji Aimsun. Získané informace jsou shrnuty v teoretické části práce.

Pro zjištění intenzit vozidel projíždějících křižovatkou byl proveden vlastní dopravní průzkum, během kterého byl vyhodnocen jeden den (od 6.00 do 18.00 hod.). Následně bylo provedeno několik měření odpolední dopravní špičky. Celkem bylo vyhodnoceno 238 patnáctiminutových intervalů, během kterých projelo 43 512 vozidel. Za jeden den projede křižovatkou cca 24 800 vozidel.

Na základě dopravního průzkumu bylo vypočteno a sestaveno několik alternativních signálních plánů. Signální plány byly sestaveny metodou saturovaného toku a pomocí profesionálního nástroje pro tvorbu signálních plánů Lisa<sup>1</sup>. Pro posouzení jednotlivých plánů byla vypracována simulační studie, která prošla všemi fázemi životního cyklu dle kapitoly 3. Simulační model křižovatky byl sestaven v aplikaci Aimsun, která umožňuje přesné namodelování sledovaného silničního segmentu. Model byl pečlivě verifikován a validován. Do simulačního modelu byly importovány sestavené signální plány sledované křižovatky.

Provedením simulačních experimentů byla získána řada dopravně-inženýrských ukazatelů, které byly statisticky zpracovány. Na základě analýzy výsledků simulační studie byl nalezen nejvhodnější signální plán pro řízení křižovatky s nejmenší dobou zdržení vozidel a minimálním počtem zastavení.

Závěrem lze říci, že nalezená optimální délka cyklu odpovídá délce cyklu současného řízení. Z hlediska dob volna (zelených) by bylo vhodné lépe přerozdělit doby ze-

---

<sup>1</sup> Autorovi práce byla zapůjčena demoverze programu se svolením pro použití vypočtených signálních programů v diplomové práci.

ných pro jednotlivé fáze. Směry VD a VE (Karla IV. – Jahnova, Jahnova – Karla IV.) mají delší doby volna, než je potřebné pro projetí všech vozidel v těchto směrech. Naopak zelená pro směr VF (Karla IV. – Nám. Republiky) je několikrát během sledované hodiny uzavřena již po 10 sekundách (projedou pouze cca 4 vozidla), přestože mezi vozidly nebyla mezera pro ukončení zelené<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Na základě měření mezer mezi vozidly může být ukončen signál volno (zelená) pro určitý směr.

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Vstupy a výstupy systému. Zdroj [6] .....	41
Tabulka 2: Možnosti sledování statistických údajů v Aimsunu Zdroj: [1] .....	53
Tabulka 3: Režimy řízení křižovatky .....	58
Tabulka 4: Celkové intenzity vozidel dne 21.4.2010 od 6.00 do 18.00 .....	60
Tabulka 5: Intenzity vozidel ve špičkové hodině přepočtené na jednotková vozidla .....	62
Tabulka 6: Kolizní matice .....	65
Tabulka 7: Vypočtená tabulka mezičasů [L] .....	65
Tabulka 8: Aktuálně používaná tabulka mezičasů. Zdroj: Technické služby. ....	65
Tabulka 9: Pokrývací tabulka .....	66
Tabulka 10: Posouzení sledu fází. ....	67
Tabulka 11: OD matice osobní automobily .....	72
Tabulka 12: OD matice autobusy ostatní .....	73
Tabulka 13: Vliv simulačního kroku: průměrné hodnoty ze všech detektorů .....	75
Tabulka 14: Vliv simulačního kroku: průměrné hodnoty výstupní detektory .....	75
Tabulka 15: Očekávané a změřené intenzity vozidel na vstupech .....	76
Tabulka 16: Očekávané a změřené intenzity vozidel na výstupech .....	76
Tabulka 17: Posuzované signální plány pro jednotlivé simulační experimenty .....	78
Tabulka 18: Sledované dopravně-inženýrské ukazatele .....	79
Tabulka 19: Vývoj hustoty dopravy pro prvních 30 min sim. výpočtu .....	80
Tabulka 20: Vývoj kumulativního průměru doby zpoždění pro celý systém. ....	82
Tabulka 21: Přesnost sledovaných ukazatelů pro celý systém .....	85
Tabulka 22: Srovnání signálních plánů na základě vybraných dopravně-inženýrských ukazatelů pro celý systém (souhrnně) .....	85
Tabulka 23: Vjezd do křižovatky z Náměstí Republiky .....	86
Tabulka 24: Vjezd do křižovatky – ulice Jahnova .....	86
Tabulka 25: Vjezd do křižovatky – ulice Karla IV. ....	87

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Životní cyklus simulační studie. Zdroj[6].....	34
Obrázek 2: Vstupy a výstupy stochastického systému. Zdroj [6]. .....	41
Obrázek 3: Křižovatka s definovanými pohyby .....	46
Obrázek 4: Tvorba signálních skupin.....	47
Obrázek 5: Přiřazení signálních skupin jednotlivým vjezdům.....	48
Obrázek 6: Plán řízení .....	48
Obrázek 7: Sestavení signálního plánu.....	49
Obrázek 8: Přehledová mapa Zdroj: DPA s.r.o.....	54
Obrázek 9: Detailní situace – křižovatka Zdroj: Technické služby.....	55
Obrázek 10: Světelně řízený přechod Nám. Republiky Zdroj: Technické služby .....	56
Obrázek 11: Fázové schéma .....	57
Obrázek 12: Kolizní plochy v křižovatce [L].....	64
Obrázek 13: Graf bezkoliznosti křižovatky.....	66
Obrázek 14: Fázové schéma [L].....	68
Obrázek 15: Zkoumaný systém .....	71
Obrázek 16: Celkový pohled na simulační model.....	87
Obrázek 17: Křižovatka Karla IV. – Jahnova.....	88
Obrázek 18: Ulice Jahnova.....	88
Obrázek 19: Pohled z Náměstí Republiky.....	89

## Seznam grafů

Graf 1: Celkové intenzity vozidel dne 21.4.2010 od 6.00 do 18.00 v 15min. intervalech..	61
Graf 2: Vývoj počtu vozidel na 1 km sítě během simulovaného období .....	81
Graf 3: Vývoj kumulativního průměru doby zdržení v celém systému .....	83
Graf 4: Vývoj kumulativního průměru doby zdržení vjezd do křižovatky od Nám. Rep. ..	83
Graf 5: Vývoj kumulativního průměru doby zdržení vjezd do křižovatky ul. Jahnova .....	84
Graf 6: Vývoj kumulativního průměru doby zdržení vjezd do křižovatky Karla IV. ....	84

## Použitá literatura

- [1] *Aimsun Users manual v6*. Barcelona: TSS-Transport Simulation Systems, červenec 2009.
- [2] BERAN, R. *Simulace silničního provozu v rámci průsečných křižovatek jako podpora dopravního inženýrství*. Diplomová práce. Pardubice : Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2008.
- [3] ČERNÁ, A., ČERNÝ, J. *Teorie řízení a rozhodování v dopravních systémech*. Praha : Institut Jana Pernera, 2004. 150 s. ISBN 80-86530-15-9.
- [4] ČSN 73 6102. *Projektování křižovatek na silničních komunikacích*. Praha : Český normalizační institut, 2007.
- [5] JONES S., SULLIVAN, A., CHEEKOTI N. *Traffic simulation software: comparison study*. [online]. Birmingham : The University of Alabama, 2004. 66 s. Dostupné z WWW: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.117.6974>>.
- [6] KAVIČKA, A. *Diskrétní simulace*. elektronické sylaby k předmětu, Pardubice, 2006.
- [7] KELTON, W. a kol. *Simulation with Arena*. New York : McGraw-Hill, 2004. 668 s. ISBN: 0-07-291981-7.
- [8] KŘIVDA, V. *Typy a způsoby dopravních průzkumů, metody provádění* [online]. elektronické sylaby k předmětu Dopravní inženýrství II. Dostupné z WWW: <<http://kds.vsb.cz/krivda/info/di2/03-typy-pruzkumu.pdf>>.
- [9] KŘIVÝ, I., KINDLER, E. *Simulace a modelování*. elektronická skripta Ostravské univerzity, 2001. 146 s.
- [10] *Lisa+ Manual*. Berlin: Schlothauer & Wauer, 2004.
- [11] MAHDALOVÁ, I. *Světelné signalizační zařízení - návrh izolované křižovatky*. Ostrava : Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební.
- [12] *Microsimulator and Mesosimulator in Aimsun 6*. Barcelona: TSS-Transport Simulation Systems, duben 2009.
- [13] *Navrhování světelných signalizačních zařízení pro řízení silničního provozu – technické podmínky*. Ministerstvo dopravy České republiky. První vydání. Brno : Centrum dopravního výzkumu, 1996. 109 s. ISBN 80-01-01226-3.
- [14] SVOZIL, D. *Simulace dopravního provozu v omezených segmentech silničních sítí*. Diplomová práce. Pardubice : Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2006.