

ŠKODA AUTO VYSOKÁ ŠKOLA, O.P.S.

Studijní program: B6208 Ekonomika a management

Studijní obor: 6208R088 Podniková ekonomika a řízení provozu, logistiky a kvality

ŘÍZENÍ DOPRAVNÍCH TOKŮ S VYUŽITÍM POČÍTAČOVÉ SIMULACE

ONDŘEJ KOPČAN

Vedoucí práce: doc. Ing. Jan Fábry, Ph.D.

Tento list vyjměte a nahrad'te zadáním bakalářské práce

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury pod odborným vedením vedoucího práce.

Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná a v práci jsem neporušil(a) autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

V Mladé Boleslavi dne 14.12.2018

.....

Ondřej Kopčan

Na tomto místě bych rád poděkoval doc. Ing. Janu Fábrymu, Ph.D. za vedení této práce, jeho trpělivost, poskytnuté materiály a především čas, který mi v rámci konzultací věnoval. Dále za sdílení jeho profesionálních znalostí a za všechny jeho kritické poznámky směrem k tématu, které tuto práci obohatily. Zároveň si zde dovoluji poděkovat mé rodině a přátelům za to, že mi byli podporou po dobu psaní této bakalářské práce i během celého studia.

Obsah

Úvod	8
1 Vymezení pojmu křižovatka	10
1.1 Definice	10
1.2 Dělení křižovatek	11
1.3 Funkce křižovatky	13
1.4 Projektování křižovatky	13
1.4.1 Zásady návrhu křižovatky	13
1.4.2 Jednoznačnost organizace dopravy	15
1.4.3 Dopravní značení	16
1.5 Řízení dopravního toku	18
1.5.1 Speciální metody řízení	19
1.5.2 Signální plán	20
1.5.3 Výpočet délky cyklu volno	22
1.6 Rozvoj okružních křižovatek v ČR	23
2 Dopravní síť	27
2.1 Dekompozice a agregace sítě	27
2.2 Teorie grafů	28
2.2.1 Pojem graf	29
2.2.2 Propustnost grafu	31
3 Software Plant Simulation	33
3.1 Počítačová simulace	33
3.1.1 Diskrétní a spojitá simulace	35
3.1.2 Objektově orientovaná simulace	36
3.1.3 Přínosy počítačové simulace	37
3.2 Prvky a metody využívané pro řízení dopravních toků	38
4 Tvorba počítačových modelů v Plant Simulation	41
4.1 Základ modelu	42
4.1.1 Generování a zánik MUs	43
4.1.2 Metoda Endsim	45
4.1.3 Tvorba komunikací a řízení simulace	46
4.2 Styková křižovatka	47
4.3 Okružní křižovatka	49

4.4	Světelně řízená křižovatka.....	51
4.4.1	Řídící metoda.....	51
4.4.2	Experimenty	53
4.4.3	Výsledky simulace	54
4.5	Porovnání použitých řešení	55
4.6	Vlastní návrhy na zlepšení.....	57
	Závěr	58
	Seznam literatury	59
	Seznam obrázků a tabulek	62
	Seznam příloh	63

Seznam použitých zkratek a symbolů

ČSN	Česká státní norma (dříve Československá státní norma)
CHKO	Chráněná krajinná oblast
LKW	Německá zkratka pro nákladní automobil (Lastkraftwagen)
MU, MUs	Mobile unit(s), pohybující se jednotky v prostředí Plant Simulation
NP	Národní park
OOP	Objektově orientované programování
PR	Přírodní rezervace
PS	Plant Simulation
SSZ	Světelné signalizační zařízení
ŠAVŠ	ŠKODA AUTO Vysoká škola
TG	Teorie grafů
TP	Technické podmínky

Úvod

„Všechny cesty vedou do Říma“ (Mille viae ducunt hominem per saecula Roman). Jeden z nejznámějších citátů vůbec, který je nejčastěji spojován s prvním císařem římské říše Augustem. Pokud by toto nadnesené tvrzení v dnešním světě skutečně platilo, obyvatelé hlavního města Itálie by jistě nebyli spokojeni. Řím dnešních dní, stejně tak jako další města po celém světě, trápí nadměrná intenzita silniční dopravy a s ní spojené problémy. Přes všechny výhody, které silniční doprava přináší, se na opačné straně spektra objevují negativní vlivy na život nejen ve městech, ale i na celé naší planetě Zemi. Dopravní kolony, které se tvoří v důsledku špatného řízení dopravních toků zapříčiňují zpoždění dodávek materiálu a zboží, zpoždění hromadné dopravy, ale také vysokou produkci emisí a hluku. Aby bylo možné tyto problémy minimalizovat, ne-li zcela eliminovat, je zapotřebí efektivních systémů řízení těchto dopravních toků.

Podle dat Evropského sdružení výrobců automobilů (ACEA) bylo v roce 2017 vyrobeno celkem 98,9 milionů motorových vozidel (19,6 milionů v EU). Právě vysoký nárůst především osobní dopravy by měl být hlavním podnětem k tomu, aby se řízení dopravních toků poskytoval dostatek prostředků a potřebná pozornost minimálně ve stejné výši, jako je tomu u vývoje nových dopravních prostředků. Pokud nebude plánování a řízení dopravních toků věnován dostatečný prostor, pod rostoucím nápoem postupně zkolabuje provoz na jednotlivých křižovatkách a poté také celá dopravní síť. Aby bylo možné tomuto scénáři předejít, je zapotřebí nástrojů, které umožní křižovatky a dopravní sítě efektivně plánovat.

Jedním z takových nástrojů je počítačová simulace. Díky svým širokým možnostem je simulace v dnešním moderním světě často používaným nástrojem. Nejenže umožňuje sledovat daný systém v násobcích reálného času, ale už samotná tvorba a sestavení simulačního modelu vede k lepšímu pochopení provázanosti sledovaných procesů. Navíc nutí tvůrce i uživatele ke komplexnímu pohledu na zkoumaný problém. Její hlavní výhodou je ovšem možnost implementace několika různých variant řešení bez nutnosti omezení současně používaného řešení. Tímto se simulace podílí na minimalizaci rizik a také značných finančních úsporách.

V této práci jsou popsány možnosti a způsoby, jak lze již ve fázích návrhu křižovatky předejít budoucím problémům a jaké existují nástroje pro podporu finálního

rozhodnutí. Základní členění křižovatek, jejich postupný vývoj a běžně používaná řešení v praxi jsou doplněna o problematiku strukturalizace dopravních sítí. Pro jejich správné pochopení jsou vysvětleny základní pojmy teorie grafů a termíny propustnost grafu a propustnost dopravní sítě. Tyto teoretické znalosti dále doplňuje stručné přiblížení simulačního softwaru PlantSimulation.

V praktické části práce jsou v softwaru PlantSimulation modelována možná řešení průjezdu imaginárním místem v dopravní síti. Tyto modely jsou poté detailně popsány s cílem předvést konkrétní metodické postupy a možnosti, jaké mohou být v praxi využity. Výsledky simulací jsou interpretovány a porovnány z pohledu řídících proměnných. V poslední kapitole jsou zmíněny vlastní náměty na zlepšení těchto modelů.

1 Vymezení pojmu křižovatka

Pokud bychom chtěli najít původ křižovatek, je nutné se podívat do daleké minulosti. Již v antických dobách ve starověkém Řecku a Římě bylo využíváno myšlenky budování významných obchodních a kulturních center, později i samotných měst, na křížení mezi obchodními stezkami. Tato křížení tehdy poskytovala vhodné místo pro odpočinek, pro vzájemnou směnu zboží a postupně získávala na významnosti. V samotných městech hrála stejně důležitou roli. Řeháčková (2014) ve své práci zmiňuje, že starověcí Římané navíc dbali také o estetický vzhled, a proto nejvýznamnější křížení ulic začali zvelebovat a vystavovat zde majestátné sochy panovníků, čímž tato místa získávala na důležitosti.

V dnešním moderním světě jsou křižovatky již nedílnou součástí každodenního života. Za to vděčí zejména prudkému nárustu důležitosti městské infrastruktury a rozvoji automobilismu. I z tohoto důvodu je velmi obtížné definovat tento důležitý a základní pojem, jak nicméně vyplývá z následující citace: *„Je známo, že čím známější, přirozenější, a základnější pojem je třeba objasnit a definovat, tím je situace složitější“* (Pastor a Tuzar, 2007, str. 11).

1.1 Definice

Křižovatku, nebo také křížení cest, průsečík komunikací či dopravní uzel je možné definovat hned několika způsoby. Například Zákon č.361/2000 Sb., o provozu na pozemních komunikacích a o změnách některých zákonů, účinný od 01.01.2001, definuje pojem křižovatka jako „místo, v němž se pozemní komunikace protínají nebo spojují; za křižovatku se nepovažuje vyústění polní nebo lesní cesty nebo jiné účelové pozemní komunikace na jinou pozemní komunikaci.“ V teorii grafů, které se věnuje druhá kapitola této práce, se setkáme například s definicí: *„Křižovatka je uzel dopravní sítě, který je incidentní alespoň se třemi úseky“* (Pastor a Tuzar, 2007, str. 217). Můžeme se také setkat s definicí, že křižovatka je *„místo, v němž se pozemní komunikace v půdorysném průmětu protínají nebo stýkají a alespoň dvě z nich jsou vzájemně propojeny“* (Krajčovič, 2005, str. 3).

1.2 Dělení křižovatek

Křižovatky, jak jsou definované výše, lze rozdělit hned několika způsoby. Podle Radimského (2007) můžeme křižovatky rozdělit trojím způsobem. Prvním způsobem může být rozdělení podle výškových úrovní křižovatky:

- úrovnňové, zde se komunikace protínají nebo spojují na stejné výškové úrovni,
- mimoúrovnňové, zde se komunikace protínají nebo spojují tzv. mimo úroveň, tj. alespoň ve dvou různých výškových úrovních.

Jako druhý způsob uvádí rozdělení podle stupně usměrnění dopravy:

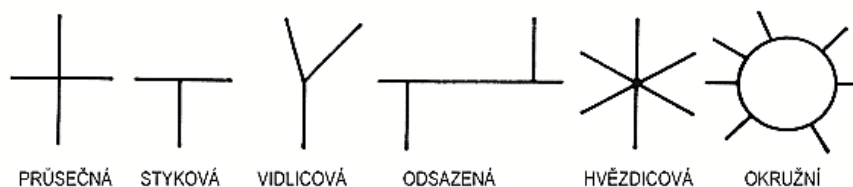
- neusměrněné, tzv. prosté, na těchto křižovatkách neexistuje vodorovné ani svislé dopravní značení stejně jako zde nejsou rozděleny jednotlivé dopravní směry (např. stavebními úpravami),
- částečně usměrněné, zde jsou **některé** dopravní směry rozděleny stavebními úpravami (dopravní ostrůvky, viditelné hojně například na křižovatkách v Holandsku z důvodu bezpečnosti cyklistů), vodorovným a svislým dopravním značením nebo kombinací obojího,
- usměrněné, kde jsou **všechny** dopravní směry vymezeny použitím vodorovného a svislého označení spolu se stavebními úpravami; zvláštním typem (plně) usměrněné křižovatky je okružní křižovatka.

Rozdělit křižovatky můžeme také třetím způsobem, podle možnosti řízení dopravy:

- neřízené křižovatky, využívané zejména na méně frekventovaných místech, jak z názvu vyplývá, nejsou řízeny žádnými signály a platí zde jen obecně platná pravidla silničního provozu stanovená zákonem (hlavní a vedlejší komunikace, přednost zprava, povinnosti řidičů k chodcům, ...),
- řízené křižovatky, využívané na nepřehledných úsecích komunikace, v místech vysokého výskytu dopravních nehod nebo na frekventovaných křižovatkách, jsou takové, kde jsou všechny dopravní a pěší proudy kompletně řízeny světelným signalizačním zařízením (SSZ).

Základní typy křižovatek

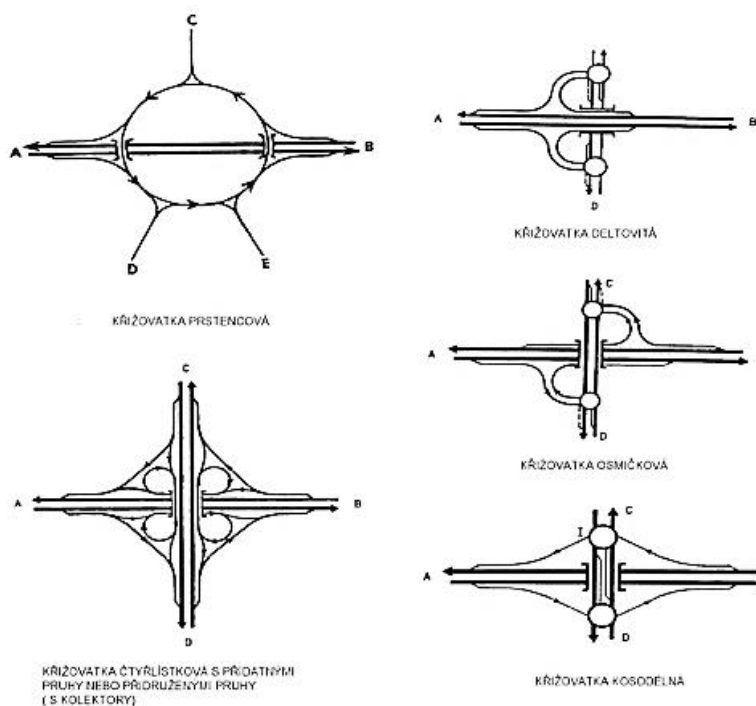
Existuje několik základních typů úrovnových a mimoúrovňových křižovatek, které jsou v praxi nejběžněji používány nebo jsou známé pro jejich typický tvar. Na obrázku níže (obr. 1.1) je zobrazeno 6 příkladů úrovnových křižovatek.



Zdroj: Křižovatky pozemních komunikací: příprava přednášek, Krajčovič, 2005, str. 6

Obr. 1.1 Základní typy úrovnových křižovatek

Jak bylo již zmíněno, vedle úrovnových křižovatek existují i tzv. mimoúrovňové. Lze je najít především na místech s velkou intenzitou provozu jako jsou dálnice, dálniční přivaděče nebo městské okruhy. Dále na místech s vysokou lokální důležitostí, kde jsou používány jako hlavní dopravní uzly pro městské části nebo celá města. Jedná se o velké a velmi nákladné stavby odpovídající jejich důležitosti a komplikovanosti. Některé ze známých typů jsou vyobrazeny níže (obr. 1.2).



Zdroj: Přednáška číslo 12 k předmětu Městské komunikace, Novák, 2011, str. 35

Obr. 1.2 Vybrané typy mimoúrovňových křižovatek

1.3 Funkce křižovatky

Primární účel křižovatky je velmi jednoduchý. Zajistit pěší či silniční dopravě možnost dostat se z bodu A na jedné straně křižovatky do bodu B na opačném konci. Jedná se o důležité místo v dopravní síti, kde se střetávají požadavky jednotlivých skupin uživatelů křižovatky (vozidla, MHD, cyklisté a chodci). Jde také o místo s vysokou pravděpodobností kolizí mezi těmito skupinami. Proto je tato jednoduchá a základní funkce doplňována nejrůznějšími požadavky, vycházejícími z vlastností a požadavků všech uživatelských skupin, například:

- bezpečnost dopravy a bezpečnost přechodu pro chodce,
- zlepšení průchodnosti daným místem (pěší, silniční, MHD, cyklisté),
- dosažení nižšího/vyššího stupně dopravy daným místem,
- snížení emisí výfukových plynů a hluku,
- úspora pohonných hmot.

1.4 Projektování křižovatky

Když je vymezen samotný pojem křižovatka, jsou známy některé jeho definice, jak se křižovatky rozdělují, jaké jsou základní typy a funkce, lze se přesunout na další část, a tou je samotné plánování křižovatek. V České republice je tato problematika zpracována do několika norem. Jedná se především o normu ČSN 73 6102 Projektování křižovatek na silničních komunikacích, s původní účinností od března roku 1995, která byla nahrazena pod stejným označením s názvem Projektování křižovatek na pozemních komunikacích v prosinci roku 2007 a je platná dodnes (2018). V některých případech ji doplňuje také norma ČSN 73 6101 Projektování silnic a dálnic, účinná od října 2018.

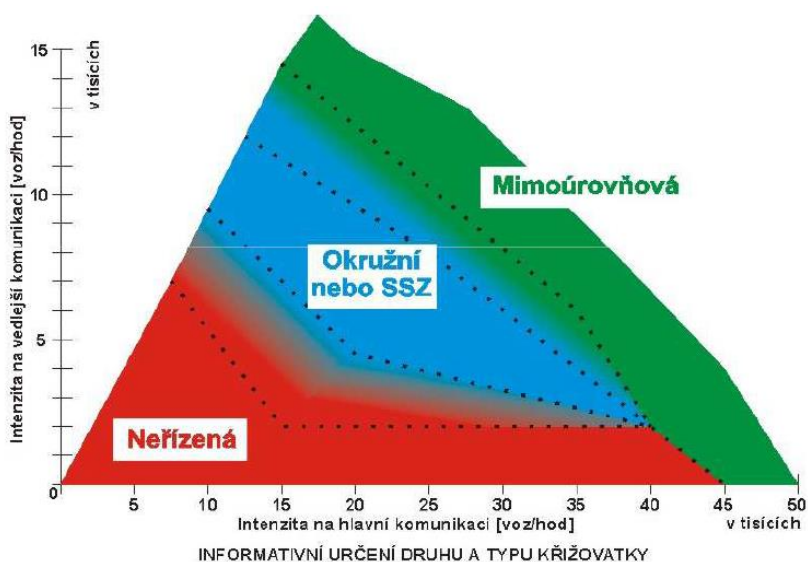
1.4.1 Zásady návrhu křižovatky

Radimský (2007) zmiňuje, že pokud příslušné orgány (státní správa, samospráva) nestanoví jinak, navrhuje se křižovatka na období 20 let od data uvedení do provozu. Jedna z hlavních otázek při návrhu křižovatky se soustředí na její typ z hlediska výškových úrovní (úrovňová, mimoúrovňová) a také z hlediska jejího umístění. V této souvislosti je vhodné zařadit dva vysvětlující pojmy, které jsou použity v dalších částech práce:

- **intravilán**, komunikace nebo křižovatka se nachází v zastavěném území (město, obec, průmyslová zóna, ...),
- **extravilán**, komunikace nebo křižovatka se nachází mimo zastavěné území.

Také dodává, že návrh křižovatky ovlivňují další faktory okolí stavby jako např. tvar území, profil krajiny, hustota okolní zástavby (intravilán) nebo rozvody inženýrských sítí. Při návrhu ve volné krajině (extravilán) se navíc zohledňují také vegetační úpravy okolí stavby a její vhodné začlenění do krajiny z estetického hlediska, které však nesmí zásadně bránit rozhledu v křižovatce a přispívat k tvorbě tzv. mrtvých úhlů. V některých případech je kladen zásadní důraz také na ochranu životního prostředí, zejména pokud se jedná o stavby v chráněné lokalitě PR, CHKO nebo NP. Zde jsou poté mimo výše zmíněné faktory také přísně stanovené a kontrolované podmínky ochrany území. Jako další otázky zmiňuje požadavky plynulosti dopravního toku v jednotlivých jízdních pruzích, požadavky bezpečnosti provozu v místě křižovatky nebo požadavky na ekonomickou účelnost řešení.

Norma ČSN 73 6102 Projektování křižovatek na pozemních komunikacích uvádí jako pomocný nástroj pro výběr vhodného typu křižovatky graf intenzity dopravy na hlavní a vedlejší komunikaci (voz/hod v tisících), který je zobrazen níže (obr. 1.3).



Zdroj: ČSN 73 6102 Projektování křižovatek na pozemních komunikacích v Úvod do dopravního inženýrství, Dorda, rok, str. 53

Obr. 1.3 Graf intenzity dopravy na hlavní a vedlejší komunikaci

1.4.2 Jednoznačnost organizace dopravy

Radimský (2007) dále uvádí zásadní prvek všech úrovnových křižovatek ve volné krajině, a to určení jedné z komunikací jako hlavní, mající řádově vyšší intenzitu provozu, důležitost v rámci silniční sítě jako celku a s tím také spojenou vyšší kategorii komunikace. Výběr hlavní komunikace je kritický, protože v mnoha případech ovlivňuje také předcházející a následující křižovatky a jejich funkce nebo přímo ovlivňuje souvislost dopravního toku v jednotném směru, umožňující správný sled dopravních úkonů (tzv. homogenita tahu).

Vedlejší komunikace jsou poté projektovány tak, aby zajišťovaly tzv. **psychologickou přednost v jízdě**. Jedná se o pojem, kdy se pomocí stavebních úprav a dopravně-technického uspořádání křižovatky a jejího okolí projektuje hlavní dopravní proud jako plynulejší a přímočařejší. Maximální bezpečnost křižovatky se poté zajišťuje kombinací právě psychologické přednosti v jízdě s tou skutečnou, zajišťovanou fyzickým dopravním značením svislým a vodorovným. Stavební prvky zajišťující psychologickou přednost v jízdě mohou být například:

- dopravní ostrůvky,
- zúžení jízdnic pruhů,
- zvlnění křižovatkových paprsků vedoucí ke snížení rychlosti.

Projektování a navrhování křižovatky se zabývá také způsobem, jakým se hlavní a vedlejší silnice vzájemně spojují a protínají. Dále upozorňuje, že výjezd na vedlejší komunikaci je nutno projektovat jako pohodlný, s dostatečně velkým poloměrem umožňujícím plynulé opuštění křižovatky z hlavního směru, bez vzniku ohrožení ostatních účastníků silničního provozu (např. prudkým bržděním). Naopak pro nájezd na hlavní komunikaci platí co možná největší potlačení poloměru oblouku s cílem dosáhnout žadoucího snížení rychlosti na vjezdu a zajištění bezpečných rozhledových úhlů. V případech, kdy jsou rozhledové poměry přeci jen sníženy, např. z důvodu okolní zástavby nebo krajiny, se navrhuje použití připojovacího pruhu, který umožňuje řidiči lepší rozhled skrze zpětná zrcátka. U mimoúrovňových křižovatek zároveň platí, že méně frekventovaný nebo méně významný dopravní proud odbočuje ze silnějšího proudu směrem vpravo a v opačném směru komunikace se do něho zprava napojuje.

Technické podmínky 81 (2015) zdůrazňují, že je důležité brát ohled také na kritérium úrovně řízení křižovatky při samotném procesu návrhu. Liší se proto stavební uspořádání křižovatky neřízené od uspořádání křižovatky řízené SSZ. Neřízené křižovatky se obecně projektují tak, aby umístily střetné kolizní body do nejdelší přípustné vzdálenosti a tím tak maximalizovaly bezpečnost v prostoru křižovatky a zároveň působily méně stísněným dojmem. Naproti tomu křižovatky plánované jako řízené s použitím SSZ se navrhují s ohledem na maximální možnou kapacitu křižovatky. V zásadě je postup přesně opačný než u neřízených křižovatek. Hlavním cílem je snažit se posunout tzv. **stopčáry** (lze si představit jako hranice prostoru křižovatky, vodorovná dopravní značka s označením V5 Příčná čára souvislá) co nejvíce ke středu křižovatky. Tím se minimalizují **mezičasy**, které lze definovat jako „časový interval od konce signálu volno signální skupiny po začátek signálu volno kolizní signální skupiny“ (TP 81, 2015, str. 27) a naopak se maximalizuje kapacita křižovatky.

1.4.3 Dopravní značení

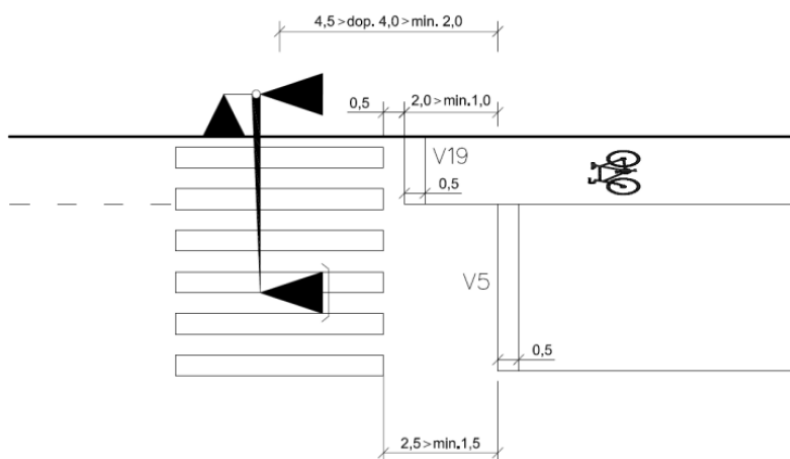
Podle stupně uspořádání křižovatky z hlediska úrovně řízení je důležité také plánování budoucího dopravního značení. Jak uvádí TP 81, takové značení musí vyhovovat veškerým ustanovením zákona č.361/2000 Sb., o provozu na pozemních komunikacích. Křižovatku je nutno vyznačit srozumitelně, jednoznačně a s cílem zamezit zbytečnému plýtvání značkami. Jako základní dopravní značení je využíváno svislé a vodorovné dopravní značení, na řízených křižovatkách také SSZ.

Svislé dopravní značení pro křižovatku řízenou SSZ začíná značkou č. A 10 Světelné signály, která se použije vždy, jedná-li se o křižovatku v extravilánu (mimo obec). V intravilánu (v rámci obce) se použije před první takovou křižovatkou při vjezdu do obce. Ve zvláštních případech, v nepřehledných úsecích či tam, kde SSZ není očekáváno, se doporučuje umístit tuto značku na retroreflexní fluorescentní materiál zelenožluté barvy. Pokud se světelně řízená křižovatka nachází na komunikaci, kde je nejvyšší povolená rychlost vyšší než 60 km/h (i přesto, že to TP nedoporučují), měla by být rychlost odstupňovaně snížena.

Příjezd ke křižovatce by měl být z důvodu řazení vozidel do řadicích a odbočovacích pruhů osazen značkou č. IP 19 Řadicí pruhy, případně č. C 2a až C 2f Příkladný směr jízdy. Samotná křižovatka se SSZ musí být osazena dopravními značkami

určujícími přednost. Jedná se o prvek zajišťující bezpečný průjezd křižovatkou v situacích, kdy je SSZ vypnuté (noční režim křižovatky, náhlý výpadek apod.). Používají se základní značky upravující přednost v jízdě, tj. značka č. P 2 Hlavní silnice, č. P 4 Dej přednost v jízdě a č. P 6 Stůj, dej přednost v jízdě. Tyto značky jsou nejčastěji osazeny u hlavního návěstidla.

Naopak **vodorovné dopravní značení** není používáno k upozornění na blížící se křižovatku, ale spíše upravuje a „ohraničuje“ vnitřní prostor křižovatky a tím napomáhá v její přehlednosti i bezpečné průjezdnosti. Hlavním prvkem vodorovného značení jsou dříve zmiňované stopčáry. Samotná stopčára má za úkol zastavit příjezdící vozidlo (pokud je v jeho směru signál červeného světla) tak, aby byla zajištěna přímá a zřetelná viditelnost SSZ a aby vozidlo neohrozilo účastníky ve vnitřním prostoru křižovatky. Minimální vzdálenost stopčáry od návěstidla je stanovena na 2 m, doporučenou vzdáleností jsou 4 m. Stopčára zároveň plní funkci ochrany chodců, jelikož TP stanovují také minimální vzdálenost čekajících vozidel a přechodu pro chodce na 1,5 m. Taková vzdálenost by měla zcela minimalizovat možná rizika pro pěší. Pokud křižovatka obsahuje také vyhrazený pruh pro cyklisty, měla by být tato stopčára nejméně 1 m před stopčárou motorových vozidel, aby řidiči vozidel cyklisty jasně viděli před sebou a počítali s jejich účastí na provozu v křižovatce. Správné umístění stopčar je uvedeno na obr 1.4.



Zdroj: Technické podmínky 81, 2015, str. 21

Obr. 1.4 Vyznačení stopčar

1.5 Řízení dopravního toku

V této kapitole můžeme znovu definovat řízenou křižovatku jako křižovatku, na které je k řízení provozu ve všech směrech použito SSZ. „Světelné signalizační zařízení je soustava vzájemně propojených návěstidel s řídicí nebo ovládací jednotkou, používaná k řízení provozu na pozemních komunikacích světelnými signály“ (TP 81, 2015, str. 78). Hlavním prvkem je řadič, řídicí zařízení křižovatky umístěné v blízkosti křižovatky. Dále z návěstidel, kabelového rozvodu a příslušenství (tlačítka pro chodce, detektory pohybu vozidel, ruční řízení apod.). Zákon č.361/2000 Sb., ve znění pozdějších předpisů upravuje pravidla chování účastníků silničního provozu a také význam světelné signalizace. Výčet signálů dále upravuje vyhláška č.30/2001 Sb., ve znění pozdějších předpisů. SSZ musí být s těmito právními předpisy v souladu. Ve zmíněných zákonech se dále upravuje nadřazenost světelné signalizace nad svislými dopravními značkami upravujícími přednost v jízdě. K řízení provozu světelnou signalizací se podle TP 81 (2015) v ČR využívá nejčastěji tříbarevná soustava se signály „Stůj!“, „Pozor!“ a „Volno“.

Signál „Stůj!“ vyjádřený červeným světlem značí **povinnost** řidiče zastavit vozidlo před stopčárou nebo, pokud tato není vyznačena, před SSZ.

Signál „Pozor!“ má ve tříbarevné soustavě tři možnosti zobrazení, každé s odlišným významem. Vždy se ovšem zobrazuje žlutým světlem. V kombinaci s červeným světlem (svítícím současně) značí povinnost řidiče připravit vozidlo k jízdě. Pokud žluté světlo svítí samostatně, značí povinnost řidiče zastavit vozidlo před stopčárou nebo před SSZ, pokud stopčára není vyznačena. Pokud je však řidič (resp. vozidlo) při tomto signálu tak blízko, že není možné bezpečně zastavit vozidlo, smí pokračovat v jízdě. Tato skutečnost je zohledněna v signálním plánu křižovatky jako součást tzv. vyklizovacího času. Třetí možností je přerušovaný signál, který značí, že SSZ není v provozu a nejedná se tedy o řízenou křižovatku (provoz je řízen svislým dopravním značením upravujícím přednost v jízdě).

Signál „Volno“ je zobrazen zeleným světlem, značí **možnost** pokračovat v jízdě a má dvě varianty. První možností je signál s plným kruhovým světlem značící možnost pokračovat v jízdě, a pokud není upraveno jinak, také možnost odbočovat vpravo a vlevo. Druhá možnost je zobrazení zelené směrové šipky označující možnost pokračovat v jízdě pouze v určujícím směru šipky. Například pokud svítí signál volno a směrová šipka vpravo, neplatí pro tento směr jízdy povinnost dát

přednost protijedoucím vozidlům. Tento jev se značí jako tzv. bezkolizní průjezd křižovatkou.

Způsob řízení křižovatky pomocí SSZ je popsán systémem řízení. Systém jako takový poté ovlivňuje a optimalizuje zpracování a následné vyhodnocování parametrů řízení. TP 81 (2015) uvádí dva hlavní principy – princip pevného a princip dynamického řízení.

Princip pevného řízení používá při návrhu pevný signální plán a pracuje „off-line“. Předpokládá neměnnou intenzitu provozu v daném časovém období a pouze dlouhodobé změny (krátkodobé změny intenzity provozu nelze zohlednit). Z pohledu financí se jedná o relativně dostupnou možnost. Měla by se ovšem využívat pouze v místech, kde by dynamické řízení neznamenal významný přínos (např. vyšší bezpečnost nebo lepší průjezdnost).

Princip dynamického řízení používá pružný signální plán a dochází zde ke kontinuálnímu zpracování dat. Aktuální data (naměřené hodnoty) jsou vyhodnocována podle předem stanovené logiky řízení. Tento princip dokáže díky „on-line“ zpracování dat reagovat i na krátkodobé výkyvy intenzity dopravy. Jedná se o nákladnější možnost právě z důvodu neustálého zpracování dat a úprav signálního plánu v reálném čase (sekundách). Prvky obou principů je možné kombinovat.

1.5.1 Speciální metody řízení

Kromě základních systémů pro řízení dopravního toku se lze setkat také se speciálními metodami, popsanými v TP 81 (2015). Ty kladou větší nároky na technické vybavení křižovatky vzhledem k požadavkům na detekci všech dopravních proudů. **Metoda řízení „celočervená fáze s okamžitou realizací signálu volno“** se používá pro nízké intenzity provozu nebo jako tzv. noční režim křižovatky. V klasickém režimu svítí červený signál na všech větvích křižovatky. Při detekci vozidla v jednom směru se prostřednictvím detektorů, které jsou nedílnou součástí takto řízené křižovatky, dostane informace k řadiči, který okamžitě zařadí fázi volno do příslušného směru a umožní plynulý průjezd křižovatkou. TP 81 uvádějí, že při rychlosti 50 km/h je pro plynulý průjezd nutné umístit detektor nejméně 90 m před stopčáru. Pokud se setkají dva požadavky z kolizních směrů, přednost má ten z hlavního směru. Toto řízení má za cíl minimalizovat čekací doby

a počty zastavení a tím eliminovat hluk a tvorbu emisí v místě křižovatky. Může sloužit také ke snížení rychlosti tím, že v kombinaci s radarem nebo kamerovým systémem snímá aktuální rychlost vozidla a zařadí signál volno pouze tehdy, pokud vozidlo zpomalí na požadovanou rychlost.

Metoda „trvalá zelená s výzvami“ upřednostňuje hlavní dopravní tok před vedlejším. Využití najde zejména v místech vysoké intenzity provozu v jednom směru. Ten je touto metodou jen ojediněle přerušován požadavky vozidel z vedlejšího směru. Negativem je, že vozidla v hlavním směru dosahují v důsledku trvalé zelené vysokých rychlostí. A jelikož se detektory ve vedlejšího směru při použití této metody umisťují přímo na stopčáru s cílem zabránit kolizi, dochází u řidičů z vedlejšího směru k nutnosti zpomalení až úplného zastavení vozidla, aniž by v hlavním směru bylo evidováno přijíždějící vozidlo.

Metoda „zelená vlna“ se v publikacích uvádí jako možný způsob koordinace dopravního toku. Hlavní myšlenkou je vzájemné propojení několika po sobě navazujících křižovatek a jejich signalizací. Pomocí tohoto sladění lze docílit právě tzv. zelené vlny – všechny křižovatky signalizují volno pro jeden hlavní dopravní směr a umožňují plynulé a rychlé projetí co největším počtem křižovatek bez nutnosti zastavení. Zelená vlna musí mimo hlavní dopravní směr zohledňovat i ostatní účastníky provozu a správně zařazovat konkrétní fáze do signálního programu. Předpokládá detailní znalost všech okolních dopravních toků a jejich intenzit v různých fázích dne nebo týdne. TP 81 upozorňují, že tento způsob řízení má smysl implementovat do maximální vzdálenosti další křižovatky 750 m, ve výjimečných případech do 1000 m. Při delších rozestupech mezi křižovatkami již zelená vlna postrádá smysl, protože se kolony vozidel sami rozvolňují. To, jakou metodou bude křižovatka řízena, je závislé na ovlivnitelnosti a proměnlivosti signálního plánu a jeho prvků.

1.5.2 Signální plán

Signální plán (někdy také signální program) je určujícím dokumentem, podle kterého se již naplánovaná křižovatka bude řídit. Obecně určuje délku signálů volno pro jednotlivé signální skupiny uživatelů křižovatky a jejich pořadí. Je zpracován graficky a zachycuje signální obrazy pro všechny účastníky provozu na všech

větvích křižovatky. Pro zpracování signálního plánu musí být v souladu s TP 81 (2015) k dispozici:

- přehledná situace na křižovatce, nejlépe v měřítku 1:2000-1:5000, situace na okolních křižovatkách a v širším pojetí komunikační sítě,
- detailní situace v podobném měřítku popisující veškeré rozhodující aspekty plánované křižovatky (komunikace, cesty pro chodce a cyklisty, zástavbu, větve křižovatky, dopravní značení, ...),
- údaj o intenzitě veškeré dopravy a o jejím složení, zatížení jednotlivých větví, dopravní špičky, denní a týdenní intenzity provozu,
- výsledek rozboru nehodovosti, statistiky za dlouhé období, kolizní diagramy.

Pro správné nastavení signálního plánu se na křižovatkách využívá několika způsobů, jakými se detekuje pohyb vozidel¹. Data z těchto detektorů (rozmístěných do detekčních zón) jsou poté použita pro úpravy systému řízení. Nejčastěji používaný způsob detekce v dnešní době jsou tlaková či optická čidla umístěna pod vozovkou, např. **indukční smyčka**. Ta se skládá z detektoru v radiči, vodiče a impedančního transformátoru. K zachycení polohy dochází přejetím vozidla (či jiného magnetického kovového předmětu) přes smyčku, kde je zaznamenána transformátorem, vyhodnocena a předána ke zpracování do radiče SSZ. Rozmístějí se do několika poloh vůči stopčáře. Například smyčky pro předběžné výzvy se umísťují tak, aby vozidlo přijíždějící ke křižovatce při celočervené fázi (na všech větvích křižovatky svítí červená) nemuselo zastavit a nedocházelo tedy ke zbytečným prostojeům v průjezdu křižovatkou. Naopak nejbližší smyčky se umísťují přímo na stopčáru, aby správně detekovaly čekající vozidlo a mohly tuto informaci poskytnout řídicímu systému křižovatky. Smyčky, ať už umístěné kdekoli vůči stopčáře, jsou nejčastěji využívány pro zachycení úrovně intenzity provozu v daném směru, obsazenosti jízdních pruhů nebo rychlosti vozidel. Jde o jedny z nejdůležitějších dopravních informací, které jsou nutné ke správnému řízení dopravního toku na křižovatce.

Mimo indukčních smyček se často využívají také laserové, infračervené či ultrazvukové detektory, mikrovlnné detektory nebo videodetekce. Právě

¹ Dopravní detektory; dostupné z: <https://www.azd.cz/admin/files/Dokumenty/pdf/Produkty/Silnicni/Dopravni-detektory.pdf>

videodetekce je často využívána jako náhrada indukčních smyček. Využívá přitom podobného principu detekce vozidel. Systém pracuje s digitální analýzou obrazu, pomocí které získává informace o přítomnosti a pohybu vozidel. Navíc vytváří tzv. virtuální detekční zónu (virtuální smyčku), takže nevyžaduje přímý zásah do vozovky. Kamerový systém je možné využít také pro detekci pohybu chodců nebo cyklistů, kteří logicky nemohou aktivovat smyčku pod komunikací. Informace se potom stejně jako u indukčních smyček předává k řadiči. Videodetekce se nasazuje na místech, na kterých je obtížné nebo nevhodné použití indukčních smyček, například pro nevhodný povrch vozovky v historických centrech měst, tramvajové koleje apod. Mikrovlnné a ostatní detekční systémy se využívají jako levnější varianta pro své nízké pořizovací a montážní náklady. Objevují se v kombinaci s indukčními smyčkami a videodetekčními systémy, ale mohou být nasazeny i samostatně.

Signální plán počítá také s několika dalšími faktory, které ovlivňují jeho sestavení, jak je uvedeno v TP 81 (2015). Jde například o reakční dobu řidičů, nastavení mezičasů, efektivní doby zelené (doba, která se rovná délce signálu volno minus ztrátový čas vzniklý rozjezdem vozidel), délky cyklů, délky signálů volno nebo tzv. vyklizovací čas (doba rezervovaná pro bezpečné opuštění křižovatky pro všechny uživatele, kteří ji aktuálně projíždějí či procházejí v signálu volno). Dále uvádí 5 základních principů při navrhování signálního plánu pro křižovatku řízenou SSZ:

- stísněná dispozice křižovatky,
- minimalizovat počet fází,
- optimalizovat pořadí fází,
- pokud možno vyrovnávat intenzity dopravy na všech větvích křižovatky,
- minimalizovat neproduktivní časy (ztrátový čas pro jednotlivé fáze – doba mezi koncem signálu volno a začátkem efektivní zelené).

1.5.3 Výpočet délky cyklu volno

TP 81 (2015) také uvádějí 3 metody, podle kterých můžeme určovat samotnou délku signálu volno. **Metoda saturovaného toku** definuje tzv. saturovaný tok jako nejvyšší možný počet vozidel, který může projet křižovatkou (stopčárou) za jednotku času. Uvažuje ideální dopravní podmínky a je vyjádřen v jednotkových vozidlech za

hodinu (j.v./hod). Samotná hodnota je poté ovlivňována součinem odbočujících vozidel, šířkou vjezdu, poloměrem oblouku a podélným sklonem vozovky. V závislosti na úrovni saturace se určuje délka cyklu a délky signálů volno pro jednotlivé fáze. Vzorec pro výpočet saturovaného toku je uveden níže (1). Základní saturovaný tok $S_{zákl}$ má maximální hodnotu 1800 j.v./h. Proměnné značí koeficient sklonu k_{skl} a koeficient oblouku k_{obl} .

$$S = S_{zákl} \times k_{skl} \times k_{obl} \quad [j.v./hod] \quad (1)$$

Metoda spotřeby času používá k úpravě intenzity dopravního toku tzv. faktor omezení. Ten zohledňuje vliv zpomalování a zrychlování vozidel při průjezdu křižovatkou a pro výpočet zavádí fiktivní (výpočtové) zatížení M (viz 2). Ve vzorci figuruje I jako intenzita dopravního toku (j.v./h), k jako výsledný faktor omezení (-) a n jako počet řadicích pruhů v daném směru (-).

$$M = \frac{I \times k}{n} \quad [j.v./hod] \quad (2)$$

Metoda postupného přibližování (iterace) porovnává vypočtené kapacity daných řadicích pruhů a směrodatné intenzity provozu. Jako první se určí délka cyklu z minimálních signálů volno a nejdelších mezičasů. Délka cyklu se poté postupně zvětšuje a průběžně se vypočítává kapacita, která se opět srovnává se směrodatnými intenzitami. To vše do doby, než je kapacita zhruba o 10 až 20 % vyšší. K porovnání využívá vstupní časy z tabulky níže (tab. 1.1), kde a značí směr jízdy rovně (vč. kombinované možnosti rovně a vpravo a rovně a vlevo), b jízdu v ostatních případech a m počet vozidel za cyklus.

Tab. 1.1 Tabulka vstupních časů

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	m > 10
a	3	6	8	10	12	14	16	18	20	22	2*m + 2
b	3	6	9	12	14	16	18	20	22	24	2*m + 4

Zdroj: Dopravní inženýrství: Řízené úroňové křižovatky část 2, Smělý, 2007, str. 23

1.6 Rozvoj okružních křižovatek v ČR

Česká republika postupně opět objevuje všechny benefity spojené s nahrazováním průsečných křižovatek těmi okružními, které, zejména v menších provedeníh, jsou

považovány za vůbec nejbezpečnější formu křižovatky. Bohužel, jak dodává Skládany (2009), nedostatečná stavební praxe a stále znatelný sklon k „socialistickým tradicím“ – monstrózním betonovým projektům, trápí jak státní rozpočet, tak bezpečnost a plynulost dopravy.

Nejčastější chyby podle něj vznikají již ve fázi návrhu řešení křižovatky, kdy se rozhoduje mezi malou a velkou okružní křižovatkou. Právě zmiňovaná malá zkušenost či možná nedůvěra v matematické a simulační výpočty vede k tomu, že se zcela zbytečně navrhují okružní křižovatky velkých rozměrů, se kterými se (v porovnání s malými) pojí provozní i dopravní problémy, nemluvě o větším zatížení bankovního účtu zadavatele, zhoršení vzhledu města a zástavby cenných ploch v centrech. Z dopravního pohledu se jedná například o problematiku nepřehlednosti takové křižovatky, vysoké nehodovosti nebo zbytečné složitosti řešení.

Malá okružní křižovatka je v evropských zemích nejčastěji vymezena tzv. vnějším průměrem okružní křižovatky v rozpětí 25-35 m v intravilánu. V extravilánu se toto rozpětí pohybuje mezi 40-45 m. A právě takto velký vnější průměr, který se často neopodstatněně vyskytuje v centrech měst, způsobuje dopravě spíše škodu než užitek. Větší vnější průměr umožňuje řidičům plynulejší nájezd na vnitřní okruh, tzv. okružní pás, díky velkému poloměru takového oblouku. Většina řidičů se následně snaží udržet si stejnou rychlost jako při nájezdu i po celou dobu pobytu na okružní křižovatce a znemožňují využití plné kapacity křižovatky snižováním mezičasů pro vjezd ostatních řidičů.

Skládany dále upozorňuje, že některé okružní křižovatky jsou dokonce (bohužel) projektovány tak, že přímo vybízejí k přímému průjezdu křižovatkou bez očekávaného zpomalení vozidla (tzv. tangenciální připojení nájezdové/výjezdové větve, viz obr. 1.5 vlevo). Důsledkem takového napojení je především špatná identifikovatelnost okružní křižovatky, se kterou řidič nemusí počítat a nepřizpůsobí tak svou jízdu. Tento problém se týká ve stejné míře chodců i řidičů vozidel. Při stavebním uspořádání se okružní křižovatka projektuje se všemi nájezdy silniční dopravy stejně jako s přechody pro chodce za (většinou) každým sjezdem. Standartní vzdálenost pro umístění přechodu od okružního pásu je doporučena na 5 m. Křižovatka, spolu s nájezdy, výjezdy a přechody pro chodce, by tak měla být ideálně vnímána ze strany řidičů jako celek. Tudíž, připojení tangenciálním způsobem je nežádoucí, protože řidič vozidla automaticky zrychluje do přímého

směru, který takové připojení vytváří. Zároveň by se přechod pro chodce neměl zbytečně oddalovat od okružního pásu (myšlenka uvolnění okružního pásu, pokud dává delší vozidlo přednost na přechodu), protože takový přechod už přestává být vnímán jako součást křižovatky a řidič s ním nemusí počítat, což vede k nepřijatelnému zvyšování rizik pro chodce. Již v projektu je proto zásadní navrhovat nejlépe kolmé (tzv. radiální) připojení nájezdových, ale také výjezdových větví (viz obr. 1.5 vpravo), aby bylo dosaženo kýženého efektu zpomalení, plynulého průjezdu křižovatkou a vysoké kapacity spolu se zachováním bezpečnosti pro řidiče i pěší.



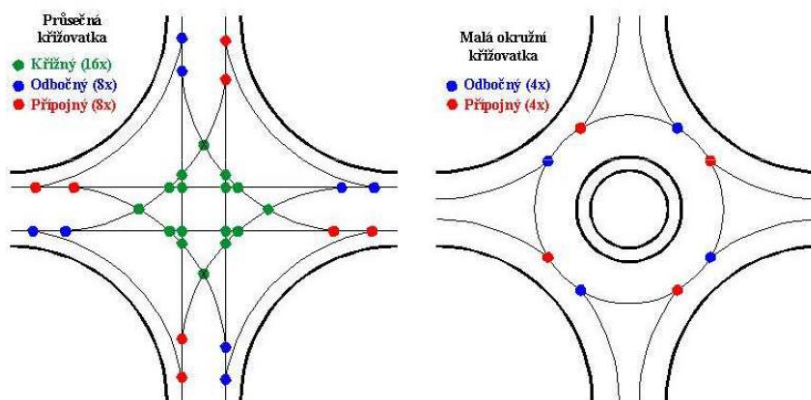
Zdroj: Okružní křižovatky v České republice – chyby a omyly, Skládaný, 2009, str. 3

Obr. 1.5 Tangenciální (vlevo) a radiální (vpravo) nájezd na okružní křižovatku

V této souvislosti se neméně důležitou součástí okružní křižovatky stává její středový prstenec. Právě prstenec by měl přimět řidiče k průjezdu křižovatkou tak, jak bylo plánováno, tedy okružním průjezdem namísto přímého průjezdu. Zároveň umožňuje průjezd delšími vozidly, např. MHD nebo vozidly nákladní dopravy. K tomuto účelu bývá prstenec uměle rozšířen na doporučovanou délku 2-3 m pomocí dlažby či jiného odlišení od komunikace. Doporučeným stavebním prvkem jsou také dělící ostrůvky, které vymezují nájezdové a výjezdové větve křižovatky. Mimo to slouží k zamezení kolize vyjíždějících vozidel s vozidly v protisměru, k ochraně chodců „rozdělením“ komunikace na dvě části a také k upozornění na blížící se křižovatku a zlepšení viditelnosti. Podle normy ČSN 73 6110 Projektování místních komunikací by měl být dělící ostrůvek na každé komunikaci, jejíž šířka je větší než 8,5 m a má zde být umístěn přechod pro chodce. Šířka takového ostrůvku by se měla pohybovat mezi 2,5-3 m, aby zajistila ochranu chodců převádějících jízdní kolo nebo kočárek. V zahraničí se tyto ostrůvky nejčastěji vysazují zelení, aby

byla podpořena také estetická funkce křižovatky. V tuzemsku se nejčastěji setkáme se zámkovou dlažbou nebo vodorovným značením na betonovém povrchu, čímž se dosahuje bezúdržbového řešení, ale nedochází ke zlepšení viditelnosti a kontrastu dělicího ostrůvku s vozovkou.

Obrázek níže (obr. 1.6) ukazuje konkrétní výhodu okružních křižovatek z hlediska bezpečnosti dopravy, konkrétně vysvětluje problematiku kolizních bodů na křižovatkách. V levé části obrázku je zobrazena průsečná křižovatka se čtyřmi obousměrnými dopravními proudy. Tato křižovatka má celkem 32 kolizních bodů (v každém směru je možnost odbočit vpravo, pokračovat v jízdě rovně nebo odbočit vlevo). Podle TP 81 (2015) je takto projektovaná a neřízená křižovatka vhodná pro nízkou intenzitu dopravy z vedlejších směrů, kdy počet odbočujících aut vlevo nepřesahuje 100 vozidel/hod. V opačném případě se zvyšuje čekací doba pro vozidla odbočující vlevo a pokud není na křižovatce zřízen samostatný odbočovací pruh pro jízdu vlevo, snižuje se také dopravní propustnost křižovatky jako celku. Pokud bychom průsečnou křižovatku nahradili plně usměrněnou okružní křižovatkou (na obr. 1.6 vpravo), sníží se počet kolizních bodů na 8. Okružní křižovatka zároveň zaručuje plynulejší a rovnoměrnější průjezd, kompletně odstraňuje odbočení vlevo v obousměrném provozu a také snižuje rychlost vozidel při průjezdu křižovatkou. V některých případech lze okružní křižovatky využít také pro zdůraznění přechodu z extravilánu do intravilánu, tj. upozornit na končící komunikaci, na které platí vyšší povolená rychlost než například v obci nebo zastavěné zóně, do které vozidlo vjíždí.



Zdroj: Úvod do dopravního inženýrství, Dorda, 2011, str. 57

Obr. 1.6 Porovnání počtu kolizních bodů na průsečné a okružní křižovatce

2 Dopravní síť

Dopravní síť, jako pojem z oblasti teorie grafů, můžeme definovat jako „[...] konečnou množinu uzlů a úseků, které představují pevnou část dopravního systému, kterou představuje infrastruktura dopravních cest sítě. Vyžadujeme, aby dopravní síť byla souvislá, tzn. aby pro každou dvojici uzlů existovala alespoň jedna cesta spojující oba tyto uzly [...]“ (Pastor a Tuzar, 2007, str. 56). K definici lze ještě doplnit, že dopravní síť je tvořena dopravní cestou a dopravními body. Dopravní cesta je nejvýznamnější část dopravní sítě. Spojuje vždy dva body a jako množina dopravních cest (úseků) poté tvoří samotnou dopravní síť. Dopravní bod je konkrétní místo v dopravní síti ležící na dopravní cestě a je určen činností, kterou vyjadřuje (nakládka nebo vykládka zboží, konsolidační místo, ...).

Pastor a Tuzar (2007) také zmiňují problematiku řešení optimalizačních úloh na komplexních systémech dopravních sítí a uvádí dvě základní techniky (agregace a dekompozice), jak omezit zbytečně složité a v praxi těžko řešitelné úlohy. K tomuto účelu využívá tzv. **hierarchické uspořádání struktury dopravních sítí**. To popisuje jistou provázanost a hierarchii jak v rámci dopravní sítě jako celku, tak i v podmnožinách a konkrétních proměnných. Některé z nich jsou vzájemně silně interaktivní a často proto existují množiny nebo proměnné, které mají svou hodnotou významný vliv na ostatní proměnné a síť jako celek. Naopak, v síti se objevují také proměnné, které mají jen velmi nevýznamný nebo dokonce žádný vliv na síť jako celek, a jsou spíše samy ovlivňovány.

Strukturu sítě lze dělit na tzv. roviny. Za prvky první roviny pokládáme ty proměnné (prvky), jejichž hodnota významně ovlivňuje mnoho dalších. Ve druhé skupině se budou nacházet proměnné, které jsou již ovlivňovány první rovinou, ale zároveň pro svou vlastní potřebu ovlivňují další (jiné) proměnné v síti, nikoliv však ve stejném rozsahu jako prvky první roviny. Takových skupin může existovat celá řada, u všech ale bude platit stále slabší stupeň ovlivnění dalších prvků sítě. Pro takové roviny uvádí pojem hierarchické úrovně.

2.1 Dekompozice a agregace sítě

K řešení takto složitých a komplexních sítí se využívá již zmiňovaná agregace a dekompozice. **Dekompozicí** (rozložením) dopravní sítě chceme obecně určit náš hlavní cíl (zájmové pole) a poté hlouběji zkoumat podřadné roviny, ve kterých se

nachází určitější a detailněji popsané proměnné. Hlavní prvky našeho zájmu se nachází vždy v nejvyšší rovině. Ta je vždy do značné míry neurčitá, protože se jedná o velmi komplexní prvky (významné komunikace, spoje, uzly, ...). Míra neurčitosti se snižuje tím, jak pokračujeme v dekompozici. Prvky druhé skupiny už bývají detailněji definovány s větší mírou určitosti. Další skupiny poté přebírají tento princip a dále se u nich snižuje míra neurčitosti a jsou přesněji a detailněji definované. Tímto způsobem je zkoumána a následně zpracována velmi podrobná síť. Konkrétně v problematice silničních komunikací by první rovinu tvořily dálnice. Druhá rovina bude zastoupena rychlostními silnicemi a silnicemi první třídy, třetí rovina poté silnicemi druhé třídy atd.

Naopak **agregací** (slučováním) dopravní sítě se snažíme dosáhnout snížení počtu proměnných s vědomím, že takové kroky povedou ke zvýšení míry nejistoty. Cílem agregace je zároveň úprava struktury sítě do řešitelné podoby. Také vypuštění některých nevýznamných nebo méně důležitých prvků lze označit jako agregaci sítě.

2.2 Teorie grafů

Pokud bychom se chtěli zabývat konkrétní sítí v detailu, potom se z odborného hlediska dostaneme do matematicko-teoretických disciplín, kde se zaměříme na teorii grafů (TG). Za jejího zakladatele je považován významný švýcarský matematik Leonhard Euler, který v roce 1736 publikoval řešení příkladu „Sedm mostů města Královce“ (Königsbergu)². Zde jako první dokazuje, že těchto 7 mostů nelze přejít způsobem, že na každý z nich vstoupíme právě jednou a vrátíme se do původního místa, a mosty tedy netvoří tzv. **eulerovský graf** (zjednodušeně graf, který můžeme nakreslit jedním tahem a ve kterém existuje způsob, jak každým bodem projít právě jednou – viz dále). Moderní vznik samostatné disciplíny teorie grafů se spojuje se jménem maďarského matematika Dénese Kóniga a s jeho publikací „Teorie konečných a nekonečných grafů“³. Ta dodnes představuje první ucelenou teorii a stala se první učebnicí rozvíjející se disciplíny. O její rozšíření na českém území přispěli také významní čeští matematici, především Otakar Borůvka, Vojtěch Jarník

² Matematický problém, který byl do té doby považován za nevyřešitelný. Je založen na reálném problému tehdy Pruského města Královec (nyní Kaliningrad v Rusku). Město leží na řece Pregole, která ho rozděluje na dva ostrovy, které jsou spojeny se zbytkem města 7 mosty.

³ V originále „Theorie der endlichen und unendlichen Graphen“.

nebo Jiří Sedláček. TG dnes nachází uplatnění ve většině moderních oborů jako je doprava, ekonomika, technika, fyzika a jiné. Díky jednoduchosti samotných modelů se teorie grafů stala velice populární jak mezi odborníky, tak i mezi laiky. Tomuto rozšíření pomohla také používaná terminologie (i přesto, že není dodnes pojmově ustálená mezinárodně). Využívá běžně používané termíny pro orientaci v grafu, např. uzel, hrana, cesta, vrchol, smyčka apod.

2.2.1 Pojem graf

Pastor a Tuzar (2007) uvádí možný dvojí pohled na základní pojem teorie grafů:

- graf jako pohled na průběh závislosti proměnných (zobrazení průběhu funkce v čase),
- graf jako matematický útvar, který je obrazem reálného systému (právě tento význam je v TG popsán jako graf).

V teorii grafů je zavedeno také několik základních pojmů, bez kterých se nelze v dalších částech práce obejít. Mezi tyto pojmy patří:

- stupeň uzlu – počet hran, které vedou do/z uzlu (s uzlem tzv. incidují),
- sled – posloupnost uzlů a hran mezi počátečním a koncovým uzlem,
- tah – sled, ve kterém se žádné hrany neopakují,
- cesta – tah, ve kterém se žádné uzly neopakují.

Až zde se můžeme vrátit k výše zmíněnému eulerovskému grafu. Eulerovským tahem nazveme takovou posloupnost uzlů a hran, která obsahuje všechny hrany grafu (každou právě jednou). Řekneme, že graf je eulerovský, pokud obsahuje eulerovský tah.

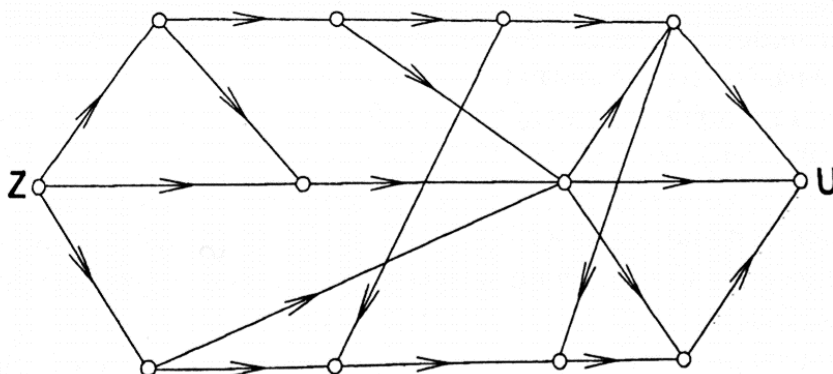
Graf jako matematická struktura reprezentuje souvislosti mezi dvěma množinami, množinou uzlů (vrcholů grafu) a množinou vazeb (hran grafu). Jako příklad možných rozlišení typů grafu lze uvést některé, které zmiňují také Pastor a Tuzar. Hlavní rozdělení uvádí podle orientace hran grafu a zavádí pojmy orientovaný a neorientovaný graf:

- **Orientovaný graf** je takový graf, ve kterém se lze pohybovat po hranách pouze ve směru orientované hrany. Takové hrany si lze představit třeba jako

jednosměrné komunikace. Orientace hrany je v grafu znázorněna šipkou vedoucí ke koncovému vrcholu.

- **Neorientovaný graf** umožňuje pohyb po hranách bez ohledu na směr, protože ten není omezujícím kritériem (např. dvouprúdová komunikace). Z uzlu A vede cesta do uzlu B a naopak. Takové hrany se označují jako neorientované hrany.

Graf, který obsahuje alespoň jednu z obou výše zmíněných hran se nazývá **smíšený graf**. Tento typ grafu nejlépe specifikuje dopravní síť. Ty jsou tvořeny jednosměrnými a obousměrnými komunikacemi stejně tak, jako je smíšený graf tvořen orientovanými a neorientovanými hranami. Abychom mohli dopravní síť modelovat kupříkladu pro zachycení vzdáleností mezi jednotlivými uzly (např. městy pro potřeby navigace či plánování tras), potřebujeme přiřadit jednotlivým hranám jejich délky. Do té doby, než toto přiřazení proběhne, pracujeme s **nehodnoceným grafem**. Jeho hrany nemají přiřazenou žádnou váhu ani nezobrazují žádnou hodnotu. Příklad takového grafu je zobrazen níže na obr. 2.1.



Zdroj: Teorie dopravních systémů, Pastor, Tuzar, 2007, str. 81

Obr. 2.1 Nehodnocený grafový model dopravní sítě

Poté, co jsou všechny hrany ohodnoceny podle požadavků sítě (přiřadíme jim třeba hodnotu vzdálenosti mezi dvěma body nebo času potřebného pro překonání takové vzdálenosti), můžeme mluvit o **ohodnoceném grafu**.

2.2.2 Propustnost grafu

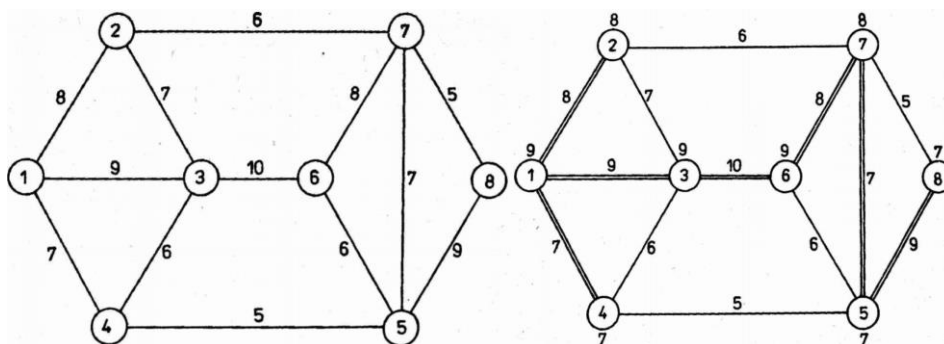
Při analýzách dopravních sítí se velmi často setkáme s pojmem **propustnost dopravního toku**, resp. propustnost grafu, pokud se na problematiku díváme z pohledu TG. Jak uvádí Pastor a Tuzar (2007), v takovém případě uvažujeme orientovaný, acyklický (neobsahující cyklus – cesta, která začíná a končí ve stejném uzlu) a hranově ohodnocený graf, kde jsou jednotlivé hrany ohodnoceny právě hodnotami propustnosti. Může jít o šířku komunikace, nejvyšší povolenou výšku či šířku vozidel, hmotnost vozidel, jejich rychlost, počet apod. V takovém grafu uvažujeme topologické uspořádání sítě a existenci jednoho uzlu, ze kterého hrany pouze vycházejí, označeného jako **zdroj sítě**, stejně jako existenci jednoho uzlu, ve kterém hrany pouze končí, označeného jako **ústí sítě**. Pokud objekty sítě dorazí do ústí, je jasně zobrazeno, že zde síť opouští.

Takto definované sítě zkoumáme z pohledu počtu objektů, které mohou touto sítí protéct za jednotku času od zdroje do ústí. Takovou veličinu nazýváme jako **tok sítě**. Z matematických vztahů, které nejsou obsahem této práce, vyvozují Pastor a Tuzar následující souvislosti:

- Celkový počet objektů, které do uzlu vstupují, je stejný jako počet objektů, které z uzlu vystupují. Tímto je zajištěno, že se objekty v uzlu neztrácejí, nehromadí ani nevznikají.
- Hodnota toku je napříč cestami ustálená, ovlivněna pouze jejich ohodnocením (propustností).
- Velikost toku na vstupu (zdroji) se rovná velikosti toku na výstupu (ústí).
- Tok je jednoznačně určen součtem toků cest vedoucích od zdroje do ústí.

Maximální propustnost sítě a její hodnota je určena součtem maximálních toků všech cest, které vedou od zdroje do ústí. Níže je uvedena dopravní síť (obr. 2.2) znázorňující například rozložení komunikací města. Jako zdroj (uzel 1) definujeme místo, kde vznikají požadavky na přepravu (nachází se zde např. průmyslová zóna) a jako ústí (uzel 8) místo, které reprezentuje cílovou oblast přepravy (např. obchodní zóna). Graf je neorientovaný, hranově ohodnocený propustnostmi jednotlivých úseků za jednotku času.

Hledáme maximální propustnost (například v době dopravní špičky) mezi uzly 1 a 8, abychom mohli optimalizovat zavážení obchodů produkty z průmyslové zóny. Konkrétní hodnoty propustnosti hran vycházejících ze zdroje jsou v tomto případě (8, 9, 7). Maximem této neuspořádané trojice je 9, pokračujeme tedy po této hraně do uzlu 3. Odtud se vydáme opět po hraně s nejvyšší propustností (vybíráme z trojic 6, 7, 10) a dostáváme se do uzlu 6. Tímto principem nacházíme kompletní řešení vyznačené v grafu dvojitou čarou, tj. **maximální propustnost dané sítě**.



Zdroj: Aplikace metod síťové analýzy v řízení a plánování, Walter, Vejmla, Fiala, 1989, str. 68

Obr. 2.2 Maximální propustnost dopravní sítě

3 Software Plant Simulation

Praktická část práce (kapitola 4) je věnována modelům vytvořeným v softwaru Plant Simulation. Tento software byl vyvíjen od poloviny 80.let 20.století pod původním názvem SIMPLE++ (Simulation in Produktion Logistik and Engineering). Po akvizici firmy Tecnomatix Ltd. firmou UGS Corporation v roce 2004 dochází k přejmenování softwaru na Tecnomatix Plant Simulation⁴. Poslední důležitá změna nastává v květnu 2007, kdy největší průmyslová výrobní firma v Evropě, Siemens AG, dokončuje akvizici dosavadního vývojáře UGS Corp. za 3,5 miliardy dolarů a zahrnuje ho do svého vlastního oddělení průmyslové automatizace (Siemens's Automation & Drives) jako Siemens PLM Software⁵.

Software Plant Simulation (PS) poskytuje jeho uživatelům nespočet možností a výhod oproti běžně používaným metodám a nástrojům. Některé přednosti softwaru PS zmiňuje např. Hloska (2016, str. 1): *„Plant Simulation od společnosti Siemens PLM Software je nástroj pro simulaci diskrétních událostí, který uživatelům pomáhá vytvářet digitální modely logistických systémů (např. výroby), aby mohli zkoumat charakteristiky systému a optimalizovat jeho výkonnost. Tyto digitální modely umožňují provádět pokusy a scénáře „what if“ bez narušení stávajících výrobních systémů nebo při použití v procesu plánování dlouho před instalací skutečných výrobních systémů.“*

3.1 Počítačová simulace

Jak uvádí ve své práci Jindrová (2015), simulace, jako disciplína i proces, se těší v moderní době velké přízni především díky rozvoji technicky zaměřených věd, novým poznatkům v oblasti výpočetní techniky a díky rozvoji mikroprocesorů. Stejně jako převážná většina ostatních disciplín, i simulace zažila svůj největší „boom“ ve válečném období, zejména v období 2. světové války s rozvojem prvních počítačů. Soubor těchto skutečností a dalších vlivů dal vzniknout specifickým požadavkům a situacím, kdy je třeba se jistou mírou abstrahovat od reality pro

⁴ Shaping digitalization, dostupné z URL: <https://www.siemens.com/press/pool/de/events/2016/corporate/2016-12-innovation/inno2016-shapingdigitalization-e.pdf>

⁵ Siemens closes UGS acquisition, dostupné z URL: <https://www.designnews.com/content/siemens-closes-ugs-acquisition/123039910128702>

získání přehledu o chování konkrétního procesu nebo celého systému. Právě v tomto ohledu je vhodné definovat dva základní pojmy, model a simulace:

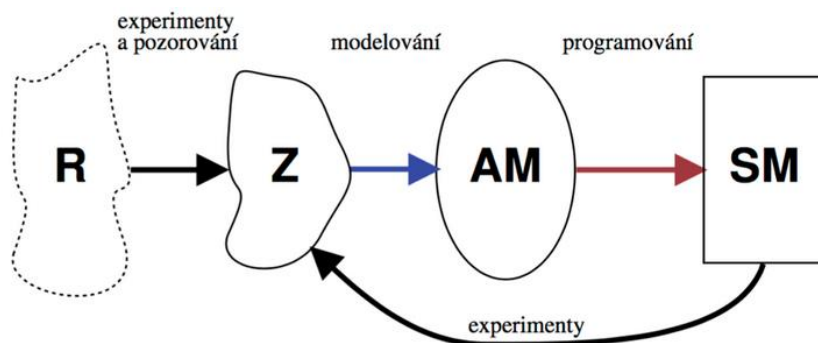
- Model lze definovat jako popis zkoumaného procesu, problému nebo reality pomocí matematických operací. Důležité je určit tzv. míru detailnosti modelu, tedy to, jak velkou mírou se bude model lišit od reality (např. zanedbáním některých procesů, jistým výběrem kritických částí procesu, ...).
- Simulace slouží k propojení jednotlivých částí modelu do jednoho celku. Zajišťuje také dílčí interakce procesů, správnou funkčnost modelu a také to, že zmíněné interakce a vazby se chovají přesně tak, jak byly vyznačeny a matematicky popsány.

Jinou definici modelu můžeme najít například u Synka (2001, str. 405) „*Snaží se popsat určitou reálnou situaci. Patří sem i simulační modely aplikované jako kopie chování reálného systému, jejichž výsledky mají na rozdíl od jiných matematických modelů odvozený a nikoli všeobecný charakter.*“ Také pro simulaci lze vyhledat odlišné definice, např. Shannon⁶ (1998) jí popisuje jako jeden z nejsilnějších nástrojů sloužící k rozhodování o návrhu a činnostech komplexních procesů a systémů. Umožňuje studovat, analyzovat a hodnotit situace, což by jinak nebylo možné. Dodává, že v konkurenčním světě se simulace stala nepostradatelným nástrojem, který využívají inženýři, designéři i manažeři pro řešení problémů.

Jindrová také upozorňuje, že vzhledem ke zmíněnému abstrahování od reality při tvorbě modelu se připravujeme o jistou správnost a celistvost modelu. Toto zjednodušení je ovšem zcela nezbytné pro samotné vytvoření modelu, neboť nelze dosáhnout takové míry detailnosti, abychom mohli popsat a vytvořit model zcela shodný s realitou. Takový model lze označit jako tzv. **konceptuální model** (v některé literatuře též abstraktní). Míra zjednodušení se poté odvíjí od plánovaného využití modelu. To se může pohybovat od učební pomůcky, prostředku pro zábavu nebo trénink až po detailní analýzu a optimalizaci komplexního systému. Simulace je často také jediný dostupný nástroj, pomocí kterého lze získat cenné informace nebo určit pravděpodobnost nastání určitého jevu bez vážnějších

⁶ V originálu: „Simulation is one of the most powerful tools available to decision-makers responsible for the design and operation of complex processes and systems. It makes possible the study, analysis and evaluation of situations that would not be otherwise possible. In an increasingly competitive world, simulation has become an indispensable problem solving methodology for engineers, designers and managers.“

následků (např. simulace nárazu vozidla) a bez zbytečně vysokých nákladů (např. zavedení nové technologie výroby do montážní haly). Pro stanovení vhodné míry abstrakce od reality lze využít například Paretova pravidla 80/20, kdy bude 80 % funkčnosti programu dosaženo 20 % příčin. Následným přenesením konceptuálního modelu do vývojového prostředí některého ze simulačních programů vzniká simulační model. Celé schéma vzniku simulačního modelu (R – realita, Z – znalosti, K – konceptuální model, SM – simulační model) je zachyceno na obr. 3.1.



Zdroj: Simulace a multiagentní modely v ekonomii, Knapovský, 2016

Obr. 3.1 Schéma vzniku simulačního modelu

3.1.1 Diskrétní a spojitá simulace

Jak uvádí Dlouhý a spol. (2007), diskrétní simulací se označuje taková simulace, která využívá techniku next-event (často také next-step). Ta řídí provázanou síť objektů (dynamických a statických) „skokovým“ způsobem, tedy že proměnné v modelu mění pouze, pokud nastane určitá událost. Průchod modelem je v diskrétní simulaci zachycen vykonáním určitých činností dynamických objektů (entit), které tyto objekty vyžadují. K realizaci těchto činností dochází ve statických objektech. Model tím pádem nesleduje časovou kontinuitu.

Také u spojité simulace je čas diskrétní. Hlavní rozdíl je ovšem v pojetí samotného výpočtu, resp. ve způsobu, jakým celá simulace probíhá. Zde se nepostupuje po jednotlivých krocích, nýbrž je stanovena horní a dolní hranice intervalu, ve kterém se simulátor posouvá v čase vždy o krok vpřed. Následuje propočtení všech proměnných v modelu. Tento postup se opakuje až do dosažení horního omezení intervalu.

3.1.2 Objektově orientovaná simulace

Čápka (2015) popisuje objektově orientované programování (OOP) jako cíleně vyvíjenou metodu programování a vývoje softwaru. Podle něj jde spíše o jakousi filosofii a nový pohled na celou disciplínu vývoje softwaru s hlavním důrazem na **znovupoužitelnost**. To, že řešení bude pravděpodobně používat také někdo jiný (nebo my sami v dalších projektech), vede tvůrce programů k psaní čistého, přehledného a „user-friendly“ kódu.

Samotný program je rozdělen na dílčí komponenty. Ty obsahují v praxi ověřené a používané postupy při řešení dané problematiky. Právě používání tzv. best practices znatelně eliminuje chybovost programu jako celku, protože jednotlivé komponenty, ze kterých se program skládá, jsou již optimalizovány a prověřeny. Zároveň přináší jednoduché, levnější a spolehlivější řešení. Pokud se i přesto někde v programu najde chyba, stačí ji opravit na jednom místě (v konkrétní komponentě). Základním prvkem OOP je **objekt**. Ten odpovídá reálnému objektu světa (např. vozidlo) a má své vlastnosti (atributy), které uchovává a které ho charakterizují (pro vozidlo např. výrobce, barva, země a rok výroby). Dále má také určité schopnosti (metody), které vykonává (např. zrychli, zpomal, zastav, zatrub). V OOP se objekty tvoří pomocí tříd. **Třída** v tomto případě slouží jako vzor, který definuje atributy a metody. Nereprezentuje konkrétní objekt, namísto toho spíše definuje, jaké vlastnosti a schopnosti budou takové objekty mít. Objekty vytvořené pomocí tříd se označují jako **instance**. Mají shodné rozhraní jako třída, ale liší se svými atributy. Zachovejme tedy předchozí příklad a mějme třídu *vozidlo*, od které vytvoříme instance *Octavia* a *Passat*. Mají ty samé atributy a metody, jako třída *vozidlo*, ale liší se vlastními hodnotami. Instance *Octavia* má atributy Škoda, bílá, ČR 2014. Instance *Passat* má atributy VW, černá, Německo 2017.

Kromě zjednodušeného psaní kódu pomocí objektů a tříd používá OOP také 3 základní pilíře pro lepší organizaci a práci s jednotlivými komponenty. Konkrétně se jedná o:

- **Zapouzdření**, umožňující skrýt atributy a metody v rámci jedné třídy (zevnitř). Z vnějšku se objekt projevuje svým rozhraním, ale vnitřní strukturu vidí pouze sám vlastník. K zapouzdřeným datům lze přistupovat pouze přes nějaké rozhraní (nejčastěji interface), nelze přímo.

- **Dědičnost**, která slouží k vytvoření nových programových struktur na základě starých. Definují se pojmy **rodič** (někdy také nadtřída nebo předchůdce) – základní třída, od které následně dědí další prvky, a **syn** (někdy také podtřída nebo následník) – odvozený prvek, který dědí atributy a metody z rodičovské třídy. Tvoří se tedy vztah **rodič-syn**, kde syn má všechny zděděné vlastnosti rodiče, ale zároveň své vlastní, nezděděné.
- **Polymorfismus**, redukuje duplicitu kódu používáním jednoho rozhraní pro interakci s různými objekty. Obecně chceme použít zděděnou metodu jiným způsobem, ale pouze v rámci konkrétní podtřídy. Použijeme tedy metodu nadtřídy a upravíme její kód tak, aby odpovídal požadavkům podtřídy (zachováme hlavičku metody, ale upravíme její tělo).

Principy OOP jsou využívány také v prostředí Plant Simulation, resp. v programovacím jazyku **SimTalk**, který PS využívá.

3.1.3 Přínosy počítačové simulace

Znalost základních principů OOP, možnosti práce s objekty a třídami a porozumění základním pilířům umožňuje vytvářet rozsáhlé, pokročilé a komplexní modely, které mají jasnou organizaci a hierarchii. Již před 20 lety zdůrazňovali Manlig a Keller (1998), že takové modely by nebyly pomocí starších deterministických metod (stejný výsledek, pokud se parametry modelu nemění) možné, protože tyto dříve používané metody s rostoucí obtížností úloh přinášejí stále komplikovanější řešení. Některé komplexní úlohy by tímto způsobem nemohly být řešeny vůbec. A právě zde podle nich nastupují hlavní výhody simulace. Některé jsou uvedeny níže, doplněny o pohled Ulrycha a Millera (2013):

- Pojetí simulačního modelu nutí k pohledu na problematiku „ze všech stran“. Je nutné zapojit všechny držitele procesů, kteří by mohli výsledek ovlivnit, ať už pozitivně, nebo negativně.
- Již v úvodních fázích tvorby modelu může přinést jiné pohledy na procesy díky zapojení jiných skupin uživatelů. Zaměřením na průběh procesu, nikoliv pouze na výsledek, vede k větší přehlednosti všech podnikových procesů.

- Podněcuje k tzv. **systemovému přístupu**. Uživatelé jsou nuceni posunout se od části k celku. Pro takový přístup je typické, že převažuje optimalizace celku nad optimalizací dílčích částí nebo procesů.
- Pomocí modelu lze určit, jak a čím jsou procesy ovlivňovány a jakou roli hrají na cílovém výsledku (zefektivnění výroby, dosažení vyšší kvality nebo produkce, náběh nového systému, implementace nové linky, zlepšení průchodnosti křižovatkou apod.).
- Umožňuje řešení složitých úloh v jakémkoliv čase (zpomaleném, zrychleném i reálném) a dokáže za několik minut odsimulovat průběh systému v řádu týdnů či měsíců.
- Při realizaci změn značně eliminuje rizika plynoucí z nejasnosti a čisté predikce. Čím detailnější a přesnější je model, tím lépe minimalizuje tyto nejasnosti. Také umožňuje upravovat vnitřní a vnější podmínky, porovnávat navrhované alternativy a sledovat časový průběh proměnných. Vše proto, abychom lépe dosáhli žádoucího stavu, který byl určen na začátku simulace.
- Při správné interpretaci výsledků zkušenými uživateli vede simulační model k optimalizaci dílčích procesů a tím i systému jako celku. Právě optimalizace vnitřních procesů podniku přináší zásadní výhody při správném plánování investic nebo projektů.

Šlajer (2010) dodává, že veškeré tyto výhody s sebou nesou i značné ekonomické úspory pro podnik. Tvorba simulačního modelu je z počátku poměrně nákladná (investice do softwaru, vysoké nároky na zkušenosti s modelováním, mzdové náklady). Pokud jsme ovšem zvolili pro model správnou míru abstrakce a obsáhli správné procesy, pomůže model správně posoudit možná rizika a objasnit souvislosti, a tím také přinést podniku žádoucí konkurenční výhodu.

3.2 Prvky a metody využívané pro řízení dopravních toků

Program Plant Simulation využívá jako základní pohybující se jednotky tzv. **mobile units (MUs)**. Podle Bangsowa (2010) reprezentují tok materiálu od objektu k objektu. Poté, co jsou MUs vytvořeny, postupně projdou modelem a zůstanou na jeho konci, dokud nezaniknou nebo dokud není simulace přerušena či resetována. Níže jsou popsány MUs, které využívá software PS k modelování:

- **Entita** – může reprezentovat jakýkoliv pohybující se předmět uvnitř modelu (v reálu např. vyrobený díl). Sama o sobě ale nemá vlastní rámec chování. Ten je determinován předchozím a následujícím stanovištěm a jejich metodami na vstupu a výstupu, procesem uvnitř stanoviště apod. Prvek je definován např. atributy délka (Length), šířka (Width) nebo cíl (Destination).
- **Kontejner** – stejně jako entita, nemá svůj vlastní rámec chování. A stejně jako entita se pohybuje od objektu k objektu pomocí konektorů a je ovlivněn metodami na vstupu/výstupu a uvnitř stanoviště. Na rozdíl od entity však může naložit a nést jiné MUs. V modelech slouží jako způsob, jak zobrazit tok palet nebo boxů. Kapacita kontejneru se určí pronásobením dvou hlavních atributů, které určují dimenze prvku (X-dimension, Y-dimension). Mezi další patří, stejně jako u Entity, délka, šířka nebo cíl.
- **Transporter** – jako jediná MU má své vlastní atributy, které následně determinují jeho chování. Tyto atributy jsou nastaveny uživatelem a jedná se především o rychlost (Speed), akceleraci (Acceleration), délku (Length) a směr pohybu (Forward, Backward). Může také nést prvky Kontejner. Transporter se pohybuje po komunikaci (Track) zadanou rychlostí. Jednotlivé části komunikace se chovají jako předchůdce a následovník a Transporter se mezi nimi přesouvá. Tyto MUs se ovšem nemohou předjíždět. Pokud tedy dojde k situaci, že rychlejší prvek dožene pomalejší, automaticky přebírá rychlost pomalejšího do té doby, než překážka nezmizí. Poté znovu akceleruje na svou rychlost, pokud to situace v modelu dovoluje.

Výše popsané MUs byly navrženy tak, aby umožnily modelovat standardní cestu materiálu skrze výrobní linku. Při správném použití vzniká řetězec **entita – kontejner – transporter**, který má svou paralelu v reálném výrobním prostředí (vyrobený díl – paleta – LKW).

Bangsow (2010) dále popisuje **generování MUs**, které se odehrává v rámci konkrétního Frame⁷. Ten musí obsahovat prvek EventController, který řídí diskrétní simulaci a synchronizuje jednotlivé události v modelu. Pokud chceme začít generovat MUs, vložíme do modelu prvek **Source**. Ten ve svém interface nabízí

⁷ Okno programu, ve kterém se vytváří model. Objekt Frame nemá vlastní vzorec chování a lze s ním pracovat jako s jakýmkoliv jiným objektem.

možnost zvolit konkrétní MUs, které bude generovat (konstantně, pomocí sekvence či cyklické sekvence nebo náhodně) a také okamžik vzniku (dle nastaveného intervalu, dle stanoveného počtu, dle tabulky nebo skrze prvek Trigger). Poté, co jsou uvnitř Source vytvořeny MUs, automaticky následuje snaha je posunout dál v modelu. Pokud není Source napojen pomocí konektoru nebo cesty na další objekty v modelu, prvek zablokuje další vytvoření MU, dokud není cesta vytvořena nebo dokud nezmizí překážka na následujícím objektu (stanovišti). Opačným způsobem pracuje prvek **Drain**. Jedná se o prvek, v němž zanikají MUs. Zpravidla se využívá v té části modelu, kde chceme znázornit, že prvek opouští proces. Jako poslední objekt modelu sbírá Drain užitečná data pro analýzu systému, např. počet zničených MUs, podíl neaktivních stanovišť na celku, celkovou průchodnost apod. Prvky Source a Drain jsou aktivní objekty modelu, oba mají kapacitu 1 a společně tvoří tzv. hranice modelu.

Tvorba komunikací probíhá pomocí pasivního prvku **Track**. Ten umožňuje navrhnout libovolnou strukturu silniční sítě pomocí přímek a oblouků, které v modelu znázorňují reálnou cestu (uvnitř i mimo hal) a po kterých se pohybuje Transporter. Čas, který MU stráví na jedné části cesty se vypočítá podle její délky a podle rychlosti MU. Samotný prvek má defaultně kapacitu (-1), tudíž maximální počet MUs je stanoven jako součin délky cesty a délky Transporteru. Tento atribut může být nastaven na libovolné číslo.

Důležité je také definovat místo, které bude fungovat jako tzv. **evidenční bod**. Pokud MU projede tímto místem, vyšle se podnět ke spuštění metody, která je na takové místo navěšena. V softwaru PS se může jednat o vstup nebo výstup do/z objektu, část pásového dopravníku nebo komunikace. Je také možné tyto evidenční body uměle vytvořit. Na každé části komunikaci lze určit absolutní nebo relativní vzdálenost senzoru od počátku/konce a později se v metodě neodkazovat na vstup, resp. výstup objektu, nýbrž na vytvořený senzor.

4 Tvorba počítačových modelů v Plant Simulation

Cílem praktické části práce je vytvoření modelových případů řešení průjezdu daným místem – křižovatkou. Na třech možných způsobech řešení jsou simulovány a popsány jednotlivé vztahy na křižovatce, metody řízení průjezdu a principy konkrétního řešení. Jako možné způsoby řešení byly pro tuto konkrétní práci vybrány následující 3 typy křižovatek:

- styková křižovatka (často také T-křižovatka),
- okružní křižovatka,
- křižovatka řízená SSZ.

Nejprve byl stanoven předběžný rozsah praktické části práce, byla určena jednotlivá řešení, která jsou v dalších částech této kapitoly analyzována, popsána a modelována. Následně je vytvořen samotný simulační model průjezdu křižovatkou, který je modelován a upraven tak, aby co nejvíce vystihoval běžně používaná řešení v praxi. Veškerá tvorba modelů probíhá v softwaru Tecnomatix PlantSimulation 11 (viz kapitola 3), jehož vývojářem a poskytovatelem je firma Siemens PLC. Pro zpracování jednotlivých modelů byla použita jeho verze 11.0.13 pod licencí Educational, drženou ŠKODA AUTO Vysokou školou.

Tato práce nemá za cíl popsat či optimalizovat konkrétní dopravní situaci na reálné křižovatce, a proto také modely vytvořené v simulačním prostředí nerepresentují žádné konkrétní křížení komunikací. Stejně tak veškeré jeho objekty, MUs apod. Výsledné (modelované) tvary křižovatky vychází z používaných typů a návrhů tak, jak bylo popsáno v teoretické části práce. Autor si je vědom, že výsledné modely postrádají několik významných faktorů, které byly popisovány v jiných částech této práce (např. řízení pohybu chodců) a které se větší či menší mírou podílejí na řízení křižovatky. Nicméně, z důvodu rozsahu práce a složitosti implementace do simulačního modelu je od těchto faktorů záměrně abstrahováno (viz dále).

V následujících podkapitolách se nachází detailní postup toho, jak byly jednotlivé typy křižovatky modelovány. Je také popsáno přesné nastavení veškerých objektů, tvorba MUs, jejich reprezentace v realitě a propojení objektů pomocí metod. Následně je věnován prostor představení vybraného způsobu řízení křižovatky, jeho implementace (včetně náhledu na zdrojový kód) a celkové zasazení do modelu. Po

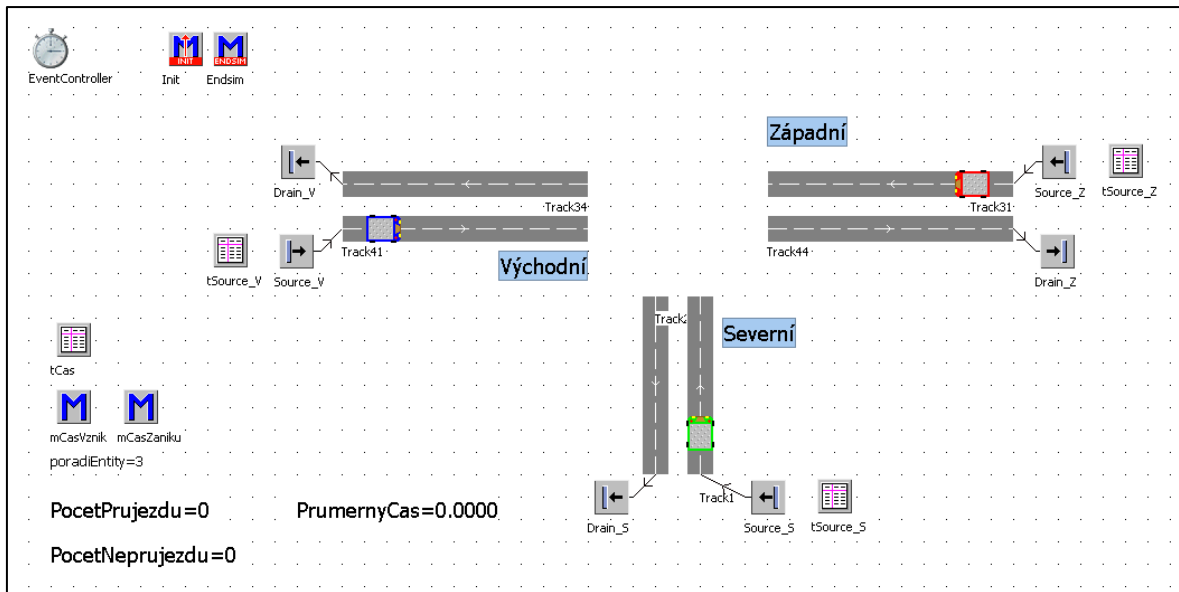
skončení simulace jsou u každého modelu interpretovány výsledky. Pro všechny názvy proměnných, metod a dalších objektů je použito pojmenování bez diakritiky, jelikož ji programovací jazyk SimTalk nepodporuje.

4.1 Základ modelu

Aby bylo možné získané výsledky správně a věcně interpretovat, byla ve fázi návrhu stanovena podoba základu modelu a jeho tzv. systémové hranice. Ty popisují, co vše je ještě součástí modelu, od kterých faktorů (procesů, prvků, ...) model abstrahuje, kde model začíná a kde končí. V této práci jsou systémové hranice modelů nastaveny následovně:

- modely reprezentují průjezd tříramennou křižovatkou, tvořenou hlavním směrem (větve Východní a Západní) a vedlejším směrem (větve Severní),
- samotné modely křižovatek představují uzel v imaginární dopravní síti, ve kterém dochází k řízení požadavků na jízdu vozidel,
- všechny 3 modely jsou modelovány jako izolované křižovatky, tj. bez návaznosti na další křižovatky v imaginární dopravní síti,
- generování MUs reprezentuje příjezd z jiného uzlu v imaginární dopravní síti, stejně jako výstup znázorňuje přesun do dalšího uzlu,
- v modelech se abstrahuje od simulace a vlivu chodců.

Základ modelu obsahuje celkem 5 objektů pro každý ze tří směrů na křižovatce a další 3 objekty, které se podílejí na samotném řízení křižovatky a času simulace. EventController, který řídí simulační čas, také nepřímo souvisí s dvěma metodami, jmenovitě Init a Endsim. Metody Init a Endsim jsou speciálními případy objektu typu Method. Init proběhne vždy při spuštění simulace a analogicky, metoda Endsim proběhne vždy po skončení simulace. Tyto speciální typy metod se nepojí s žádným jiným objektem. Pro lepší vizualizaci simulace byly dále vytvořeny 3 instance od třídy Transporter: carBlue, carRed, carGreen, reprezentující vozidla. Tyto instance mají shodné atributy napříč jednotlivými modely a liší se pouze barevným označením transporteru (modrá, červená, zelená), přičemž každému směru v křižovatce je určena právě jedna barva (viz obr. 4.1).



Obr. 4.1 Základ modelu

4.1.1 Generování a zánik MUs

Samotná tvorba MUs vzniká v objektech typu Source. Každému směru křižovatky náleží vlastní zdroj, který je vždy označen podle příslušného směru (zdroj pro větev Severní jako Source_S apod.). Generování MUs v prvku Source je nastaveno na způsob „**cyclic sequence**“ (opakovaná sekvence), která je řízena tabulkou. Tento způsob generování MUs vybírá následníka z definované řady v tabulce. Poté, co se vytvoří prvek na prvním řádku se automaticky posune o řádek níže, dokud nedojde až na konec. Po dosažení posledního nadefinovaného řádku v tabulce se přesouvá zpět na první řádek a celý proces se opakuje. Tímto je možné dosáhnout generování tzv. sekvence. V této konkrétní práci je pro každý směr použit pouze první řádek takové tabulky, tudíž se tvoří sekvence o velikosti 1 prvku. Všechny MUs se pohybují po komunikacích automaticky pomocí tzv. automatic routing.

Každý objekt typu Source má přiřazenou svou vlastní zdrojovou tabulku nazvanou dle příslušného směru (začáteční písmeno t jako tabulka a označení prvku Source, na který je navázaná, např. tSource_S). Stejně jako MUs, resp. jejich instance, mají také všechny 3 objekty typu Source stejné nastavení napříč modelovanými situacemi. Konkrétně se jedná o nastavení strategie na výstupu (blocking) a o interval vytvoření MUs. Blocking strategie je u všech zdrojů povolena. Pokud se tedy stane, že je další následník v modelu (v tomto případě část komunikace) plně obsazen a nemůže z důvodu maximální kapacity přijmout další prvek (vozidlo), zdroj

ho přesto vygeneruje a „drží“ ho v sobě. Prvek se předá následníkovi ihned poté, co se jeho kapacita uvolní. Toto řešení je v modelech zvoleno z důvodu realističnosti. Níže jsou uvedeny intervaly generování MUs pro jednotlivé směry:

- Západní, (0:05 – 0:15),
- Severní, (0:05 – 0:20),
- Východní, (0:05 – 0:12).

Analogicky jako vstup (Source) je vyřešen také výstup z modelu (Drain). Objekty tohoto typu jsou označeny stejným principem jako objekty typu Source (výstup pro větev Severní jako Drain_S apod.). Pokud MU dojde až do objektu typu Drain, znamená to, že prošla celým modelem a zanikne zde. Zdroj a výstup, resp. Source a Drain, tvoří systémové hranice modelu.

Hlavní sledované proměnné v jednotlivých modelech jsou *PocetPrujezdu* a *PrumernyCas*. Počítají počet entit, které modelem prošly a průměrný čas strávený v modelu u všech vygenerovaných MUs. Pokud by nebylo počítáno s vozidly, která se na křižovatku nedostanou nebo jí kompletně neprojedou (nedojedou do jednoho z objektů typu Drain), byly by výsledky zkresleny.

Z tohoto důvodu je v konkrétních modelech využito objektu Table (tabulka *tCas*) a vlastního identifikačního čísla (uživatelsky vytvořený atribut *cislo* ve všech 3 instancích entity Transporter, dále jen ID). Poté, co vygenerované MU opustí zdroj, je mu automaticky přiřazeno číslo, které se zároveň zapíše do tabulky *tCas* spolu s časem vytvoření. Tento zápis řídí metoda *mCasVznik*, která je navěšena na výstupu všech zdrojů. MU postupně projde modelem na základě metod řízení konkrétního modelu (viz dále) dokud se nedostane do jednoho z objektů typu Drain.

S každým vstupem do Drainu je spuštěna metoda *mCasZanik*. Ta obsahuje cyklus typu „for“, který projde jednotlivé řádky tabulky od $i=1$ až do $i=Y$ *dimenze tabulky*, přičemž vyhledává shodu mezi MU, které zrovna dorazilo do Drainu, resp. jeho ID, a zapsaným ID v tabulce. Pokud tuto shodu najde, provede příkaz *cutRow*, který vymaže tento konkrétní řádek. Tímto způsobem kontroluje každé MU, které dorazí do jednoho z objektů Drain. Jediná možnost, kdy nebude řádek vymazán je, pokud vozidlo neprojde celou křižovatkou. Tato situace může nastat, pokud:

- entitě není umožněno pokračovat v cestě (není předána dalšímu následníkovi),
- entita je vytvořena těsně před uplynutím simulačního času, a tudíž nestihne do objektu Drain dojet.

4.1.2 Metoda Endsim

Právě proto, aby bylo možné zaznamenat i takovéto entity, načítají se data při vzniku MU do tabulky *tCas*. Poté, co doběhne simulační čas a spustí se metoda *Endsim*, cyklus (pro $i=1$ až $i=Y$ dimenze tabulky) provede zapsání konečného simulačního času ke všem ID, které z tabulky nebyly vymazány. Do dalšího sloupce provede a zapíše rozdíl konečného simulačního času a času vytvoření jako čas strávený v modelu. Následně provede celkový součet tohoto sloupce, který zapíše do lokální proměnné *soucet1*. V dalších výpočtech je využito také některých užitečných atributů objektů typu Drain. Konkrétně se jedná o:

- *statAvgLifeSpan* – atribut, který vrací průměrnou dobu strávenou v modelu všech entit, které jím prošly,
- *statNumIn* – vrací počet entit, které do něho vstoupily.

Předchozí řešení s mazáním řádků pro všechny entity, které modelem projdou, je velmi efektivní z hlediska reálného času simulace. Pokud bychom tyto řádky nemazaly, na konci takové simulace by se tabulka o dimenzi desetitisíců prohledávala velmi dlouho. Je proto využito zmíněných atributů objektu typu Drain pro snížení reálného času průběhu simulace. Metoda *Endsim* proto dále provede součin (1) hodnot těchto atributů a zapíše ho do lokální proměnné *soucet_Drain_S* (pro Severní větev křižovatky):

$$soucet_Drain_S := Drain_S.statAvgLifeSpan \times Drain_S.statNumIn; \quad (1)$$

Pokud tento součin provedeme pro všechny objekty typu Drain a zároveň přičteme lokální proměnnou *soucet1*, kterou jsme získali z MUs, jenž neprošly do objektu Drain, získáme celkový strávený čas v modelu pro všechny vygenerované entity. Tento součet se zapíše do proměnné *soucet2*. Nyní již stačí *soucet2* vydělit počtem vygenerovaných aut. Ten je možné získat několika způsoby. Zde je použit zmiňovaný atribut objektů typu Drain *statNumIn* pro získání celkového počtu MUs, které prošly celým modelem. Jako druhý sčítanec použijeme Y dimenze tabulky

$tCas$, která vrátí počet MUs, které modelem neprotekly (zbytek byl z tabulky vymazán). Tento součet se zapíše do proměnné *celkemVygenerovano*. Finálně, provedeme-li podíl $soucet2 / celkemVygenerovano$, dostaneme požadovanou proměnnou *PrumernyCas*, tedy **průměrný čas strávený v křižovatce pro všechny vygenerované entity**.

```

is
  i : integer;
  soucet_Drain_V : time;
  soucet_Drain_S : time;
  soucet_Drain_Z : time;
  soucet1 : time;
  soucet2 : time;
  celkemVygenerovano : integer;
do
  PocetPrujezdu := PocetPrujezdu_V + PocetPrujezdu_S + PocetPrujezdu_Z; -- celkovy pocet vozidel, která dojele do Drainu
  PocetNeprujezdu := tCas.YDim; -- Y dimenze tabulky urcujici pocet MUs, ktere modelem neprotekly

  -- FOR cyklus pro zapis aktualniho casu simulace do tabulky pro vozidla co nedojela do Drainu
  for i:=1 to tCas.YDim loop
    tCas [3, i] := EventController.SimTime;
    tCas [4, i] := tCas [3, i] - tCas [2, i];
  next;

  soucet1 := tCas.sum({4,1}..{4,tCas.YDim}); -- soucet casu neprojetych aut z tabulky
  -- celkovy cas v modelu vseh Drainu
  soucet_Drain_V := Drain_V.statAvgLifeSpan * Drain_V.statNumIn;
  soucet_Drain_S := Drain_S.statAvgLifeSpan * Drain_S.statNumIn;
  soucet_Drain_Z := Drain_Z.statAvgLifeSpan * Drain_Z.statNumIn;

  soucet2 := soucet1 + Soucet_Drain_V + soucet_Drain_S + soucet_Drain_Z; -- celkovy cas vseh projetych aut
  celkemVygenerovano := PocetPrujezdu + PocetNeprujezdu; -- celkovy pocet vygenerovanych MUs
  PrumernyCas := soucet2 / celkemVygenerovano; -- vypocet prumerneho casu straveného v krizovatce pro vsechny MUs
end;

```

Obr. 4.2 Metoda *Endsim (SimTalk)*

4.1.3 Tvorba komunikací a řízení simulace

Neméně důležitou součástí modelů jsou samotné komunikace. V základu modelu je naznačeno, že se bude v každém směru jednat o jednu komunikaci pro příjezd ke křižovatce a jednu komunikaci pro opuštění křižovatky. V rámci samotného vnitřního prostoru křižovatky jsou komunikace řešeny dle popisovaného způsobu řízení. Napojení objektů na komunikaci zajišťuje objekt typu Connector (spojovač). Zde konkrétně je využit pro napojení zdrojů a výstupů v jednotlivých směrech na příslušné komunikace.

Řízení simulačního času probíhá pomocí objektu EventController. Ten počítá veškeré simulační události v rámci daného Frame. Lze v něm nastavit čas spuštění simulace a čas ukončení simulace. Rozdílem je **doba trvání simulace**, která je ve všech modelech nastavena na **1 den**. Stejně tak se za tento čas vyhodnocují výsledné proměnné a veškeré experimenty (viz dále).

Od výše popsaného základu modelu následně pomocí principu dědičnosti získáme 3 shodná rozhraní. Ty slouží u každého typu křižovatky jako výchozí stav pro úpravy do jedné z finálních podob křižovatek.

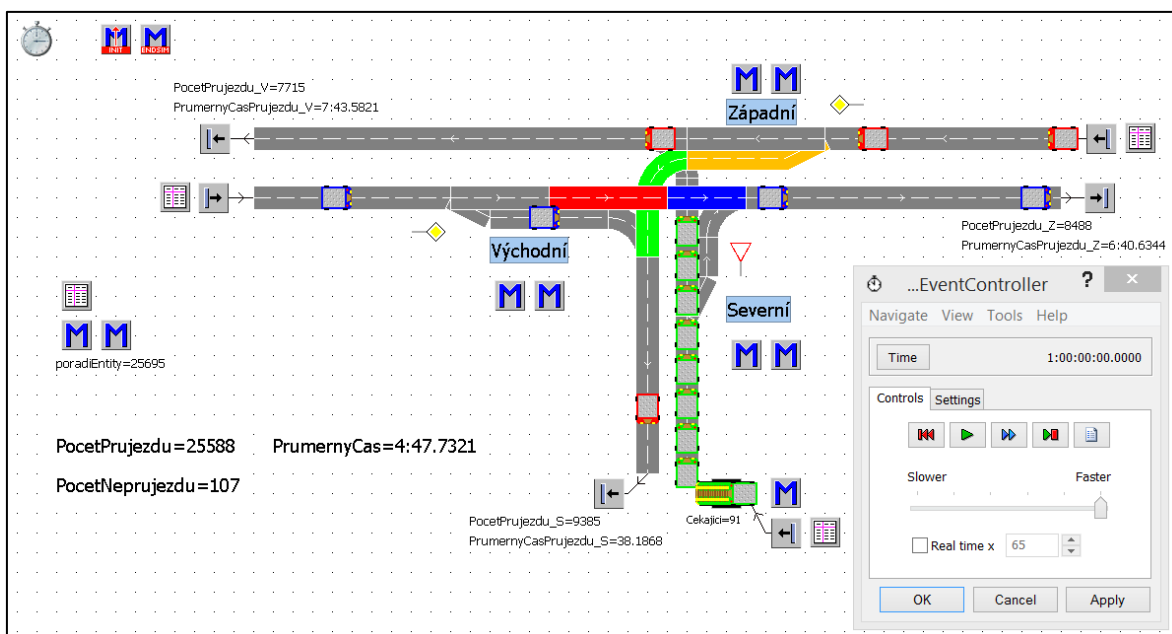
4.2 Styková křižovatka

Prvním konkrétním typem, na kterém je modelován průjezd, je styková křižovatka (běžně označována také jako T-křižovatka). Ve většině případů v reálném světě se tento typ křižovatky vyskytuje v místech střetu hlavní (více frekventované) komunikace s komunikací připojovací (vedlejší). Tato situace je znázorněna pomocí grafické úpravy ikon (značky Hlavní silnice a Stůj, dej přednost v jízdě), pro lepší přehlednost modelu.

Pro příjezd z větve Východní je zřízen odbočovací pruh vpravo, který umožňuje bezpečně sjet z hlavní silnice. Napojení na větev Severní je řízeno metodou. Ta je navěšena na část komunikace *Track23* (na obr. 4.3 vyznačena zeleně), resp. na jejím vstupu a exitu. Metoda na vstupu *mVstup_N3* se spustí pokaždé, kdy entita na tuto část komunikace vjede. Využívá se atribut objektu typu *Track empty*. Ten je typu boolean (pravda, nepravda) a jeho hodnota znamená, zda se na objektu nachází nějaká entita nebo ne. V metodě se testuje, zda je tento atribut pravda či ne. Pokud ano, zabrání vjezdu vozidel z větve Východní uzavřením vjezdu na další část komunikace pro zde čekající vozidla. Tento způsob je zaveden proto, aby se předešlo zablokování odbočujících vozidel ze směru Západní ve vnitřním prostoru křižovatky. Na výstupu této části komunikace je navěšena metoda *mExit_N3*. Ta je spuštěna vždy, když vozidlo tuto část opustí. V této metodě se zkoumá, zda už je nyní část komunikace volná nebo zda následuje další MU. Pokud je volná, otevře nájezd na další komunikaci pro čekající vozidla.

V opačném směru z větve Západní je rovněž zřízen odbočovací pruh, zde pro odbočení vlevo. Vozidla, která chtějí odbočit, musí dát přednost vozidlům jedoucím rovně z větve Východní. Pokud se na komunikaci *Track42* (na obr. 4.3 vyznačena červeně) nenacházejí žádné MUs bránící v odbočení, je těmto čekajícím vozidlům umožněno pokračovat v jízdě. Toto odbočení řídí metody navěšené na vstupu (*mVstup_N2*) a výstupu (*mExit_N2*) pro tuto část komunikace stejným způsobem, jak bylo popsáno výše.

Entitám z vedlejší větve Severní je umožněno odbočit do obou směrů. Pro odbočení na větev Západní je zřízen odbočovací pruh vpravo. Jelikož se jedná o vedlejší směr, musí tato vozidla dávat přednost. Tuto přednost řídí metody *mVstup_N1*, resp. *mExit_N1*, které jsou navěšené na objektu *Track43* (na obr. 4.3 označen modře). Poslední možné odbočení je z vedlejší komunikace ve směru na Východní. Zde musí vozidla dávat dvojitou přednost vozidlům na hlavní, která pokračují rovně ze směru Východní a vozidlům odbočujícím ze směru Západní na vedlejší komunikaci. I toto odbočení řídí metody na vstupu a výstupu, které jsou navěšeny na dvou objektech (nutno dát přednost dvěma směrům). V metodách navěšených na objektech *Track42* a *Track43* (na obr. 4.3 označeny červeně a modře) je přidáno další testování. Princip zůstává stále stejný, jen se zde kontroluje obsazenost 3 objektů typu *Track* (*Track42*, *Track43* a zároveň *Track311* označen oranžově). Musí platit, že pro umožnění odbočení vlevo jsou všechny 3 části komunikace prázdné, a tudíž odbočující MUs nejsou ohroženy kolizí.



Obr. 4.3 Styková křižovatka (model)

Po uplynutí simulačního času a proběhnutí simulace se výše zmiňovanou metodou *Endsim* naplní hlavní sledované proměnné *PocetPrujezdu* a *PrumernyCas*. Tímto modelem za stanovený čas jednoho dne (při zachování stejných intervalů generování MUs) projede celkem **25 588 vozidel**. Počet vozidel, které nedosáhly ani jednoho z objektů *Drain* je **107**. Všechny vygenerované entity v modelu stráví průměrně **4 minuty a 47 vteřin**. Tento velmi vysoký čas je způsoben tím, že toto

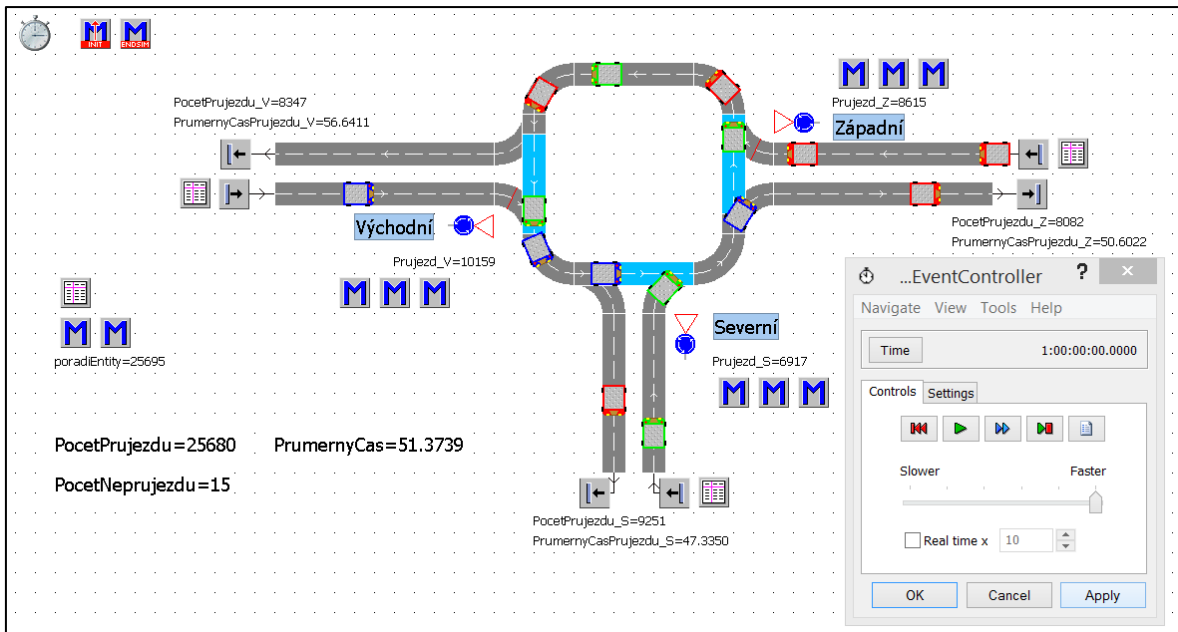
řešení křižovatky nezvládne pojmout stanovenou intenzitu dopravy ze směru Severní. Ve zdroji pro tuto větev se neustále generují nové MUs (přijíždějí stále nová vozidla) a tvoří se kolona. Pro určení počtu čekajících MUs je zde využito nekonečného zásobníku (objekt typu Buffer). Na konci simulace zde čeká 91 entit (hodnota Bufferu). Tím, že je počítán průměrný čas všech vygenerovaných entit, čekající auta ze směru Severní tento průměr zvyšují až na takto vysokou hodnotu.

4.3 Okružní křižovatka

Druhý model reprezentuje okružní křižovatku. V teoretické části práce byly zmíněny její hlavní přednosti, mezi které patří především plynulost dopravy a bezpečný průjezd. I proto je tento typ modelován hned ve dvou podobách, a to jako malá okružní křižovatka a jako velká okružní křižovatka. Tímto lze ukázat, jak velikost okružního pásu ovlivňuje průjezd okružní křižovatkou. Pro oba modely platí stejné vstupní parametry intervalu generování MUs, stejné možnosti cílových destinací i stejný způsob řízení průjezdu.

Pro modelování průjezdu okružní křižovatkou je využito metod, které jsou navěšeny na nájezdech na jednoproudý okružní pás. Ke každému nájezdu jsou přiřazeny 3 metody. První metoda detekuje každé auto, které projede přes senzor a zvýší hodnotu proměnné *Prujezd_S* (pro Severní větev křižovatky) o 1. Další dvě metody jsou zaměřeny na řízení přednosti při nájezdu. Řídí se opět pomocí atributu *empty* na vstupu a exitu určité části komunikace (na obr. 4.4 jsou tyto části vyznačeny tyrkysově). Pokud je část komunikace volná (*empty* = pravda), povolí se nájezd na okružní pás. V metodě navěšené na výstupu se opět kontroluje, zda je už část komunikace volná nebo zda pokračuje další MU a nájezd musí být stále uzavřen.

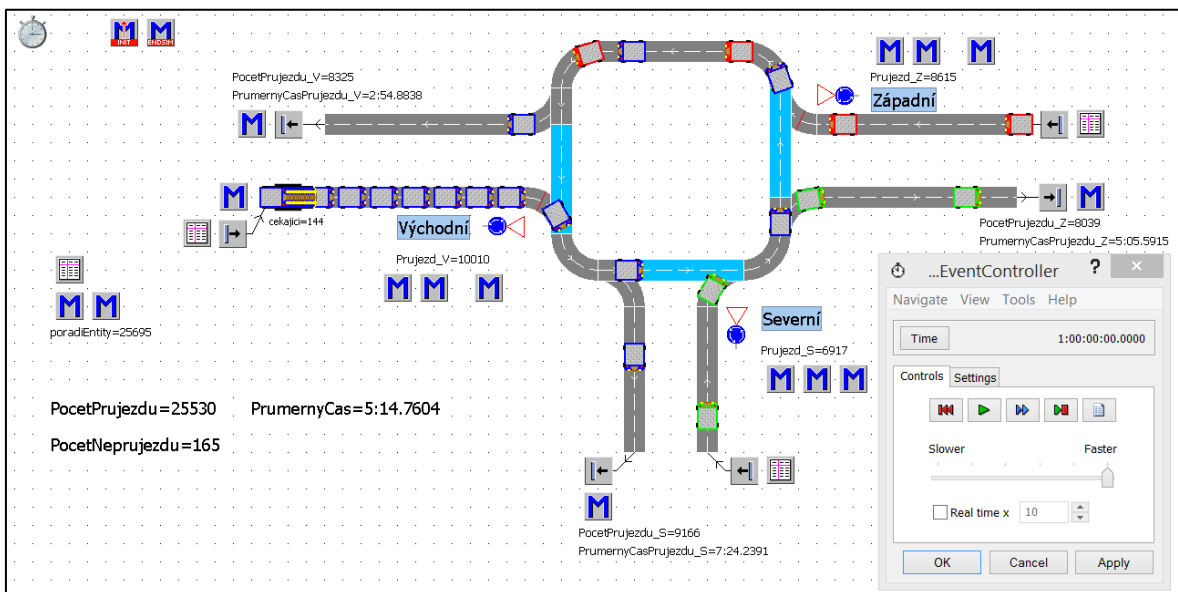
Malá okružní křižovatka je stanovena atributem *length* objektů typu Track, kterými je komunikace modelována. Zde konkrétně je hodnota atributu *length* rovna 5 m.



Obr. 4.4 Malá okružní křižovatka (model)

Tato simulace přinesla následující hodnoty hlavních sledovaných proměnných. Modelem projede **25 680 vozidel**, **15 nedojede** do žádného z objektů Drain a průměrný čas průjezdu křižovatkou pro všechny vygenerované entity je **51 vteřin**.

V návaznosti na důležitost velikosti okružního pásu, který byl zmiňován v teoretické části práce, je modelována stejná situace také při použití většího okružního pásu. Velikost atributu *length* byl zvýšen z původních 5 m na 6 m (obr. 4.5).



Obr. 4.5 Velká okružní křižovatka (model)

I přesto, že se tato změna nezdá jako zásadní, výsledné hodnoty se značně liší. V důsledku zvětšení okružního pásu už modelovaná křižovatka stanovenou intenzitu dopravy nezvládá (v reálu by se mohla zkoumat rychlost vozidel na vnitřním pásu, která je v modelu malé i velké okružní křižovatky stejná, v reálu však není, viz dále). V tomto případě ze směru Východní, kde je nejkratší interval generování entit. Pokud se podíváme na hodnotu Bufferu, na konci simulace zde čeká 144 vozidel. Celkem modelem neprojde **165** entit. Počet průjezdů se lehce snížil na **25 530 vozidel**, naopak průměrný čas se v důsledku čekajících vozidel výrazně zvýšil na **5 minut a 14 vteřin**.

4.4 Světelně řízená křižovatka

Třetím způsobem, který je modelován v této části práce, je světelně řízená křižovatka. Zachovává stejné nastavení jako řešení popisovaná výše a obsahuje ještě několik objektů navíc. Objekt *Generator* je hlavním řídicím prvkem tohoto modelu. Vysílá podněty v uživatelsky stanoveném čase pro jeho řídicí metodu, kterou je v tomto případě *mRizeniKrizovatky*. Čas je nastaven na 1 vteřinu, tudíž *Generator* každou vteřinu vyšle podnět ke spuštění řídicí metody.

4.4.1 Řídicí metoda

Řídicí metoda *mRizeniKrizovatky* stanovuje proměnnou *t*, podle níž určuje, který ze 4 způsobů nastavení světelné signalizace bude vybrán a v tomto případě plní úlohu řadiče. Před spuštěním simulace jsou uživatelsky nastaveny jednotlivé délky signálů volno (proměnné *stav1*, *stav2* a *stav3*) pro všechny 3 signální skupiny. V signálním programu je dále nastavena pevná doba 4 vteřin pro každou skupinu jako vyklizovací čas pro bezpečné vyklizení prostoru křižovatky. Lokální proměnná *cas* je definována jako součet těchto časů (délky signálů volno a vyklizovacích časů). Poté, co se vypočítá její hodnota při spuštění simulace, je pomocí cyklu nastaveno, aby se postupně snižovala o 1, dokud se nerovná nule. Pokud se rovná nule, do řídicí proměnné *t* je přiřazena proměnná *cas* (součet časů) a celý cyklus probíhá znovu. Tato část metody je uvedena na obr. 4.6.

```
/* IF cyklus pro promennou t, ktera je vyuzita pro nastaveni celkoveho casu pro rizeni krizovatky
   Soucet dob signalu volno a vyklizovacich casu (3*4) je priřazen do promenne cas */
cas := stav1 + stav2 + stav3 + 12;
if t = 0 then
  t := cas;
else t := t - 1;
end;
```

Obr. 4.6 Cyklus *if* pro nastavení řídicího času křižovatky (*SimTalk*)

Aby bylo možné provést experimenty s nastavením signálního plánu (viz dále) a optimalizovat propustnost křižovatky, nejsou zde nastaveny parametry řízení tzv. na pevně, nýbrž pomocí podmínek, které řídí horní a dolní meze intervalů. Pro každý směr je třeba interval signálu volno a interval vyklizovacího času, tudíž je potřeba celkem 6 možností. Ty jsou seřazeny postupně pro směr Východní, Severní a Západní, jak je patrné z obr. 4.7.

```
/* IF cykly pro nastavení casovych intervalu pro jednotlivé signalni skupiny
Vystup teto casti programu je klicovy pro vytvoreni signalniho programu */

if t > cas-stav1 AND t<= cas then -- Vychodni volno
    prom := cas;
end;

if t > cas-stav1-4 AND t<= cas-stav1 then --Vychodni vyklizovaci
    prom := cas-stav1;
end;

if t > cas-stav1-4-stav2 AND t<= cas-stav1-4 then --Severni volno
    prom := cas-stav1-4;
end;

if t > cas-stav1-4-stav2-4 AND t<= cas-stav1-4-stav2 then --Severni vyklizovaci
    prom := cas-stav1-4-stav2;
end;

if t > cas-stav1-4-stav2-4-stav3 AND t<= cas-stav1-4-stav2-4 then --Zapadni volno
    prom := cas-stav1-4-stav2-4;
end;

if t > 0 AND t<= cas-stav1-4-stav2-4-stav3 then --Zapadni vyklizovaci
    prom := cas-stav1-4-stav2-4-stav3;
end;
```

Obr. 4.7 Výpočet časových intervalů (*SimTalk*)

Výpočet probíhá postupným odečítáním od celkového času (proměnná *cas*), dokud se *t* nerovná nule. Pokud se hodnota proměnné *t* nachází v daném intervalu, do lokální proměnné *prom* se přiřadí hodnota horní meze intervalu. Pro zařazení příslušné fáze do signálního programu je prováděno testování pomocí proměnné *prom*. Pokud se hodnota této proměnné rovná aktuálnímu času *t*, zařadí se příslušná fáze. Fáze jsou celkem 4, pro každý směr je určena jedna z nich a čtvrtou fází je potom vyklizovací fáze, kdy jsou všechny vjezdy uzavřeny pro bezpečné vyklizení vnitřního prostoru křižovatky. Pro identifikaci je použita proměnná *type*,

kteřá nabývá hodnot 0 (pro vyklizovací fázi) až 3. Náhled kódu této metody pro první fázi (Západní volno) je uveden na obr. 4.8.

```
/* IF cyklus, který zkoumá aktuální hodnotu proměnné t a podle ní nastavuje jednu ze 4 signalizačních fází
   V case t, který se rovná jednomu ze způsobů řízení, se provede celý příkaz
   Poté čeká na opětovné spuštění, resp. na další hodnotu t, která je přiřazena dalšímu způsobu řízení */
if prom = cas then
  type := 1;
  -- Severní stop
  Track12.EntranceLocked := true;
  Track15.EntranceLocked := true;
  Semafor_S.CurrIconNo:=3;      -- červená na semaforu
  --Západní VOLNO
  Track32.EntranceLocked := false;
  Track36.EntranceLocked := false;
  Semafor_Z.CurrIconNo:=2;      -- zelená na semaforu
  --Východní stop
  Track22.EntranceLocked := true;
  Track26.EntranceLocked := true;
  Semafor_V.CurrIconNo:=3;      -- červená na semaforu
```

Obr. 4.8 Zařazení konkrétní signalizační fáze (SimTalk)

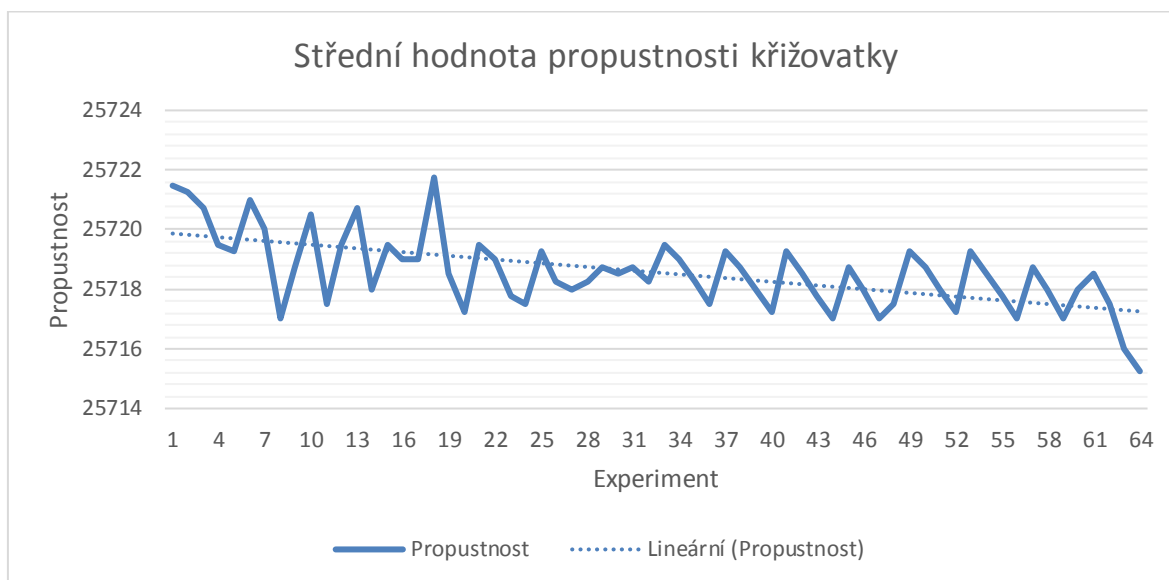
Metoda dále zapisuje do „sledovacích“ proměnných průběžné hodnoty počtu průjezdů pro každý směr a čekajících vozidel v každém směru. Tyto proměnné jsou využity pro sledování změn těchto hodnot v průběhu simulace a k lepšímu porozumění modelu.

4.4.2 Experimenty

Pro dosažení maximální propustnosti této světelně řízené křižovatky jsou pomocí objektu *ExperimentManager* provedeny experimenty s nastavením signálního programu. Jako vstupní parametry jsou zvoleny délky signálů volno (proměnné *stav1*, *stav2* a *stav3*). Pro tyto parametry je vytvořena tabulka možných kombinací, která je následně vložena do *ExperimentManageru*. Tabulka obsahuje všech 64 možných kombinací (viz příloha 1). Jako výstupní parametry jsou použity hlavní sledované proměnné *PocetPrujezdu* a *PrumernyCas*. Pro experimenty je stanovena hladina významnosti 95 % a pro každou kombinaci se provedou 4 měření (celkem proběhne 256 experimentů). *ExperimentManager* vypočítá výsledky přibližně za 7 minut.

Porovnáním středních hodnot proměnné *PocetPrujezdu* jsme schopni stanovit optimální nastavení pro maximalizaci propustnosti křižovatky, což je cílem těchto experimentů. Z grafu na obr. 4.9 je patrné, že propustnost křižovatky s delšími intervaly signálů volno klesá. Konkrétně, maximální propustnosti dosáhneme kombinací číslo 18 (*stav1* = 15, *stav2* = 10, *stav3* = 15). Tečkovaně je

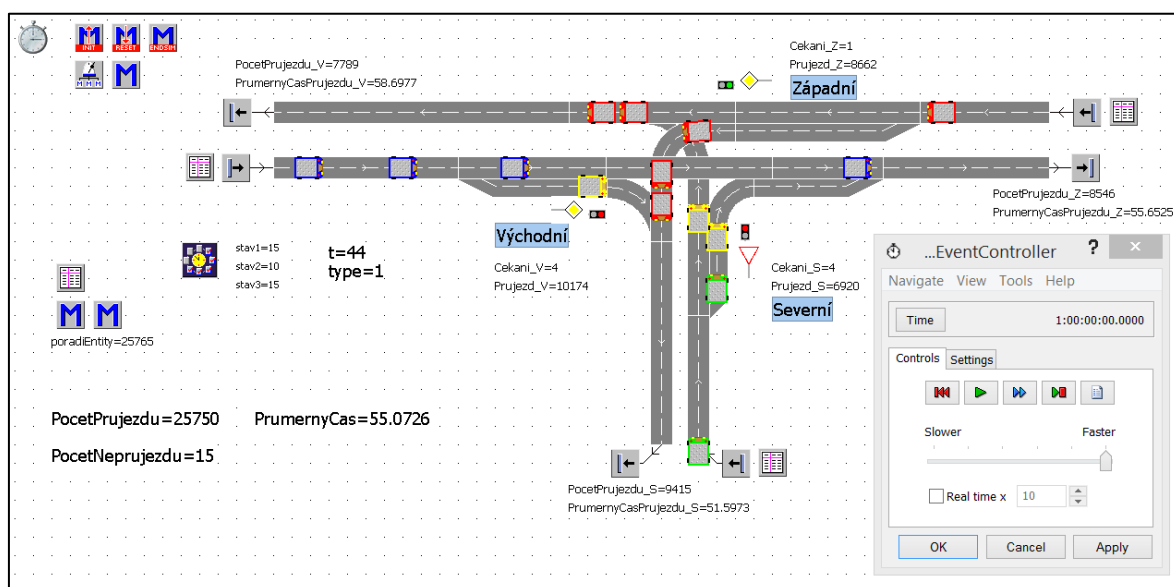
v grafu znázorněna také spojnice lineárního trendu, která ukazuje, že propustnost má v tomto případě opravdu klesající trend.



Obr. 4.9 Grafické znázornění propustnosti křižovatky

4.4.3 Výsledky simulace

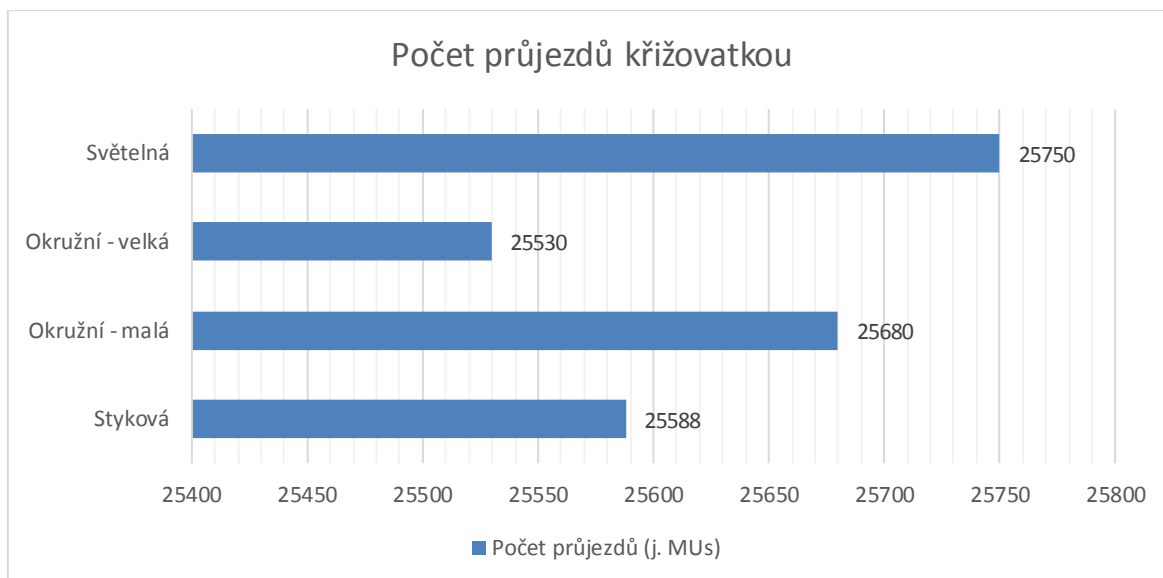
Pokud se budeme řídit těmito experimenty, nastavíme před spuštěním simulace hodnoty vstupních proměnných na kombinaci číslo 18. Po uběhnutí simulačního času lze pozorovat výsledné hodnoty hlavních proměnných (viz obr. 4.10). Celkem křižovatkou projede **25 750 vozidel** a do objektu Drain se **nedostane pouze 15 vozidel**. Průměrný čas strávený v křižovatce pro všechny entity je **55 vteřin**.



Obr. 4.10 Světelně řízená křižovatka (model)

4.5 Porovnání použitých řešení

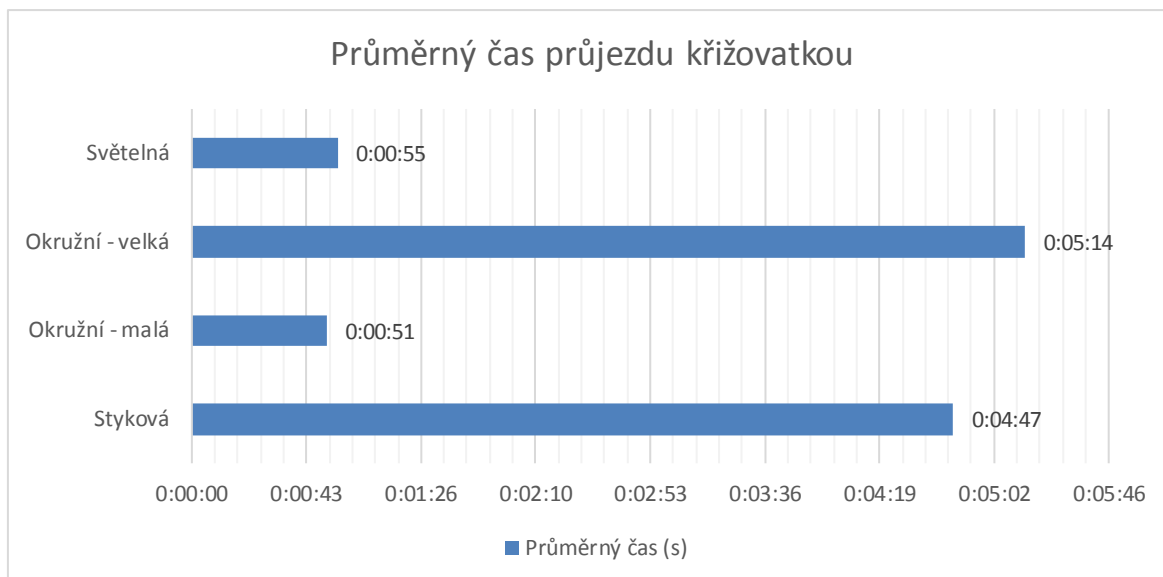
Pro porovnání modelovaných řešení je sestaven pruhový graf, který zobrazuje hodnoty proměnné *PocetPrujezdu* za dobu trvání simulace (viz obr. 4.11). Z grafu zřetelně vyplývá, že pokud by počet průjezdů byl jediným kritériem při rozhodování o typu křižovatky ve fázi návrhu, měla by být křižovatka správně řízena SSZ. Nicméně, jak bylo pospáno v teoretické části této práce, takovýchto kritérií je třeba zvážit mnohem více a určit, která budou primární a která vedlejší.



Obr. 4.11 Graf propustnosti modelovaných řešení

V této konkrétní simulaci je rozdíl mezi světelně řízenou a malou okružní křižovatkou pouze 70 vozidel za dobu trvání simulace (1 den), tudíž skoro zanedbatelný. Pokud by toto byl reálný výsledek simulace na konkrétní křižovatce, podle kterého by se rozhodovalo o jejím návrhu, přišlo by na řadu zřejmě další kritérium. Zde je to čas strávený v křižovatce.

Jak ukazuje graf na obr. 4.12, ani průměrné časy průjezdu světelnou a malou okružní křižovatkou se příliš neliší (rozdíl jsou 4 vteřiny). Nicméně, v porovnání s dalšími dvěma modely stykové a velké okružní křižovatky jsou rozdíly značné. Vysoké časy jsou ovlivněny tím, že řešení není schopno pojmout stanovenou intenzitu dopravy. V důsledku toho se na některých větvích křižovatky tvoří kolony vozidel, jejichž čas strávený v modelu se neustále započítává i přesto, že se nepohybují.



Obr. 4.12 Graf průměrné doby strávené v modelu

Zde tedy můžeme učinit první závěr. Z výše zmíněného lze vyvodit, že na základě velmi dlouhé průměrné doby strávené v modelu není pro takto nastavenou intenzitu dopravy vhodné použití neřízené stykové křižovatky ani velké okružní křižovatky. Naopak, rozdíly mezi propustností a průměrným časem stráveným v modelu mezi světelně řízenou a malou okružní křižovatkou jsou velmi malé. A jelikož nebyla stanovena další rozhodovací kritéria, nelze jednoznačně určit, které řešení je pro toto nastavení vhodnější. V praxi by se zkoumalo několik dalších kritérií, od kterých je v tomto modelu abstrahováno. Jedním z hlavních kritérií by byla jistě **ekonomická stránka** řešení. Obecně vzato, prvotní náklady jsou pro okružní křižovatkou vyšší vzhledem k větší zástavbě, nicméně náklady na údržbu jsou takřka zanedbatelné. U světelně řízené křižovatky jsou naopak prvotní náklady nižší, ale náklady na údržbu, spotřebu elektrické energie, revize, žárovky apod. mohou dosahovat vysokých hodnot.

V úvahu přichází proto zřejmě rozhodující kritérium, a to **bezpečnost**. Konkrétním řešením chceme vytvořit možnost plynulého a bezpečného průjezdu daným místem, což splňuje pouze okružní křižovatka. Okružní křižovatky jsou považovány za jedno z nejbezpečnějších řešení na místech křížení dopravních toků. Snižují počet kolizních bodů a zcela eliminují kolizní body křížné (nejnebezpečnější), zpomalují dopravní proud, tvoří jasnou přednost v jízdě svým tvarem a také umožňují zpětné otočení. I přesto, že SSZ poskytuje oproti okružním křižovatkám řadu výhod, ze kterých lze zmínit například možnost vyšší kapacity křižovatky,

dynamické řízení provozu, možnosti preferencí směrů a vozidel nebo menší zábor pozemků, je z hlediska bezpečnosti průjezdu lepším řešením křižovatka okružní.

4.6 Vlastní návrhy na zlepšení

Jednotlivá modelovaná řešení jsou zaměřena pouze na problematiku požadavků dopravních toků a jejich řízení. I přesto, že se jedná o primární cíl této práce, zakomponování některých vedlejších faktorů do modelu by mohlo vést k větší přesnosti a realističnosti modelu a výsledků simulace. Pokud bychom model doplnili například o simulaci chodců, dostali bychom mnohem přesnější informace o intervalech čekání v jednotlivých směrech, které pěší ovlivňují. Dále by bylo možné v reálném provozu analyzovat rychlost vozidel při průjezdu různými typy křižovatek a zohlednit tyto změny rychlosti do modelů. Změnou atributů u používaných instancí třídy Transporter (např. rozdílnou rychlostí, akcelerací, délkou apod.) by bylo možné model více přiblížit reálnému (diverzifikovanému) provozu.

Definováním cílových destinací (objektů typu Drain) pro jednotlivé MUs bychom mohli lépe usměrnit dopravní tok. Zároveň bychom na základě pozorování reálné situace na konkrétní křižovatce mohli modelovat takovou dopravní situaci.

V simulaci SSZ je aplikováno pevné řízení signálního programu, které není schopno reagovat na aktuální intenzitu dopravního proudu. Pokud bychom upravili zdrojový kód, přidali do modelu několik dalších objektů a využili možnosti dynamického řízení, rozšířili bychom počet modelovaných řešení. Následně bychom dostali nové srovnání pro aktuální model světelné křižovatky.

Výše popisované modely představují pouze izolované modely křižovatek, které jsou ovlivňovány jen objekty a metodami v rámci vlastního Frame. Zahrnutím souvislosti mezi takto izolovanými křižovatkami by pomohlo vytvořit model komplexní dopravní sítě. Takový model by představoval mnohem přesnější pojetí reality, kde se jednotlivé křižovatky (uzly) vzájemně ovlivňují.

Závěr

Rozvoj technologií a výpočetní techniky dal vzniknout velkému množství vynálezů od nanotechnologií, přes osobní počítače až po první obydlenu orbitální stanici v kosmu (ISS). I přesto, že naše společnost vnímá především hmatatelné statky, jsou to právě myšlenky a intelektuální vlastnictví, které definují a utvářejí technologický vývoj lidstva. Počítačová simulace byla kdysi také jen pouhou myšlenkou. Dnes se ale jedná o jeden z nejpoužívanějších optimalizačních nástrojů na světě a denně ho používají odborníci ve všech částech světa. Proto, aby mohla být počítačová simulace takto světově rozšířena, bylo nutné stanovit a ukázat konkrétní metodiku, jak přistupovat k jednotlivým problémům.

Tato práce se věnuje problematice řízení dopravních toků. V úvodní části práce byl definován základní pojem křižovatka. Vysvětlením požadavků na plánování a fungování křižovatky obecně je ukázána komplexnost kritérií, která jsou nutná brát v potaz ve fázích návrhu. Dále byla představena běžně používaná řešení v praxi a popsány hlavní principy a přínosy těchto řešení. Pohled na křižovatku jako uzavřený systém je rozšířen představením dopravních sítí, které zahrnují křižovatky jako uzly do komplexnějšího dopravního systému. Ke správnému pochopení souvislostí v rámci dopravní sítě bylo využito teorie grafů a uvedení některých používaných pojmů.

Jako úvod do praktické části byl představen simulační software PlantSimulation, vysvětleno generování entit a základní náležitosti modelu. Popsané nástroje a metody jsou použity při tvorbě konkrétních modelů křižovatek v praktické části práce. U každého modelu je detailně popsán způsob jeho vytvoření, princip fungování a použité nástroje. Konečným výstupem praktické části této práce jsou 3 simulační modely, na kterých je podrobně vysvětlena použitá metodika a možnosti řešení. Průjezdnost jednotlivými křižovatkami je na konci práce graficky vyjádřena, slovně interpretována a v rámci modelovaných řešení také srovnána. Jelikož cílem práce nebylo optimalizovat konkrétní průjezd křižovatkou, ale pouze ukázat metodiku postupu, jsou následně popsána ostatní kritéria, která mohou podpořit rozhodování. Na závěr je uveden také subjektivní názor autora, jak by mohly být jednotlivé modely upraveny.

Seznam literatury

BANGSOW, Steffen. *Manufacturing simulation with Plant Simulation and Simtalk: usage and programming with examples and solutions*. Berlin: Springer, c2010. ISBN 978-3-642-05074-9.

ČÁPKA, David. *Objektově orientované programování a evoluce vývoje softwaru*. ITnetwork.cz [online]. 2015 [cit. 2018-11-20]. Dostupné z URL:<<https://www.itnetwork.cz/navrh/objektove-orientovane-programovani-a-evoluce-vyvoje-softwaru>>.

ČESKO. Zákon č. 361/2000 Sb., o provozu na pozemních komunikacích a o změnách některých zákonů (zákon o silničním provozu), ve znění pozdějších předpisů. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010-2018 [cit. 01. 12. 2018]. Dostupné z URL:<<https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-361>>.

ČSN 73 6102 (736102) *Projektování křižovatek na pozemních komunikacích*. Praha: Český normalizační institut, 2007 [online]. Dostupné také z URL:<<http://csnonline.agentura-cas.cz/>>.

ČSN 73 6110 (736110) *Projektování místních komunikací*. Praha: Český normalizační institut, 2006 [online]. Dostupné také z URL:<<http://csnonline.agentura-cas.cz/>>.

DLOUHÝ, Martin, FÁBRY Jan, KUNCOVÁ Martina a Tomáš HLADÍK. *Simulace podnikových procesů*. Vyd. 1. Brno: Computer Press, c2007, 201 s. ISBN 978-80-251-1649-4.

Dopravní detektory: systémy pro silniční dopravu. AŽD Praha [online]. [cit. 2018-10-08]. Dostupné z URL:<<https://www.azd.cz/admin/files/Dokumenty/pdf/Produkty/Silnicni/Dopravni-detektory.pdf>>.

DORDA, Michal. *Úvod do dopravního inženýrství*. Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní [online]. 2011 [cit. 2018-10-02]. Dostupné z URL:<http://homet.vsb.cz/~dor028/DI_1.pdf>.

HLOSKA, Jiří. *Setkání uživatelů softwaru Plant Simulation od společnosti Siemens PLM*. Automa [online]. 2016, č. 8 [cit. 2018-10-05]. Dostupné z URL:<http://automa.cz/cz/casopis-clanky/setkani-uzivatelu-softwaru-plant-simulation-od-spolecnosti-siemens-plm-2016_08_0_9001/>.

JINDROVÁ, Věra. *Distribuční strategie po otevření severní dálnice v ČR*. Praha, 2015. Diplomová práce. Vysoká škola ekonomická v Praze, Fakulta informatiky a statistiky. Vedoucí práce Ing. Jan Fábry, Ph.D. Dostupné také z URL:<https://vskp.vse.cz/46291_distribucni_strategie_po_otevreni_severni_dalnice_vcr>

KNAPOVSKÝ, Martin. *Simulace a multiagentní modely v ekonomii* [online]. 2016 [cit. 2018-11-02]. Dostupné z URL:<<https://www.knapovsky.com/simulace-a-multiagentni-modely-v-ekonomii/>>.

KRAJČOVIČ, Marián. *Křižovatky pozemních komunikací: příprava přednášek*. Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební [online]. 2005 [cit. 2018-10-13]. Dostupné z URL:<http://fast10.vsb.cz/krajcovic/!kombinovane/!dopravni_a_vodni_stavby/pomucky_k_reseni/pdf/KRIZOVATKY_PK_KOMBI.pdf>.

MANLIG, František a Peter KELLER. *Možnosti využití počítačové simulace: shrnutí přednášek*. Technická univerzita Liberec [online]. 1998 [cit. 2018-10-19]. Dostupné z URL:<<http://fstroj.utc.sk/journal/sk/40/40.htm>>.

Navrhování světelných signalizačních zařízení pro řízení provozu na pozemních komunikacích: technické podmínky: TP 81. 3. vyd. Praha: Ministerstvo dopravy [online]. 2015. Dostupné z URL:<http://www.pjpk.cz/data/USR_001_2_8_TP/TP_81.pdf>.

NOVÁK, Martin. *Městské komunikace: Mimoúrovňové křižovatky, přednáška 12*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební [online]. 2011 [cit. 2018-10-13]. Dostupné z URL:<<https://www.fce.vutbr.cz/pko/novak.m/bm03/prednasky/12.pdf>>.

PASTOR, Otto a Antonín TUZAR. *Teorie dopravních systémů*. Vyd. 1. Praha: ASPI, 2007. ISBN 978-80-7357-285-3.

RADIMSKÝ, Michal. *Projektování pozemních komunikací: křižovatky úrovňové*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební [online]. 2007 [cit. 2018-10-13]. Dostupné z URL:<<http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/CM01-Projektování%20pozemních%20komunikací/M07-Křižovatky%20úrovňové.pdf>>.

ŘEHÁČKOVÁ, Darina. *Možnosti zahradně architektonického řešení kruhových objezdů*. Lednice, 2014. Bakalářská práce. Mendelova Univerzita v Brně. Vedoucí práce Ing. arch. Dagmar Bowyerová. Dostupné z URL:<https://is.mendelu.cz/zp/portal_zp.pl?prehled=vyhledavani;podrobnosti_zp=35822;zp=35822;download_prace=1>.

SHANNON, Robert E. *Introduction to the art and science of simulation* [online]. 1998 [cit. 2018-10-05]. Dostupné z URL:<<https://www.informs-sim.org/wsc98papers/001.PDF>>.

Shaping digitalization: Innovation at Siemens AG in 2016. Siemens AG [online]. 2016 [cit. 2018-09-17]. Dostupné z URL:<<https://www.siemens.com/press/pool/de/events/2016/corporate/2016-12-innovation/inno2016-shapingdigitalization-e.pdf>>.

Siemens Closes UGS Acquisition. DesignNews [online]. 2007 [cit. 2018-09-17]. Dostupné z URL: <<https://www.designnews.com/content/siemens-closes-ugs-acquisition/123039910128702>>.

SKLÁDANÝ, Pavel. *Okružní křižovatky v České republice*. Centrum dopravního výzkumu [online]. 2009 [cit. 2018-10-08]. Dostupné z URL: <<http://www.cdv.cz/file/clanek-okruzni-krizovatky-v-ceske-republice-chyby-a-omyly/>>.

SMĚLÝ, Martin. *Dopravní inženýrství: Řízené úroňové křižovatky část 2*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební [online]. 2007 [cit. 2018-10-19]. Dostupné z URL: <[http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/CM04-Dopravní%20inženýrství%20\(DST\)/M05-Řízené%20úroňové%20křižovatky%20II.pdf](http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/CM04-Dopravní%20inženýrství%20(DST)/M05-Řízené%20úroňové%20křižovatky%20II.pdf)>.

SYNEK, František. *Manažerská ekonomika*. 2. přeprac. a rozš. vyd. Praha: Grada, 2001. Expert (Grada). ISBN 80-247-9069-6.

ŠLAJER, Jan. *Optimalizace logistických procesů a materiálových toků pomocí dynamické simulace*. IT SYSTEMS [online]. 2010, č. 3 [cit. 2018-10-19]. Dostupné z URL: <<https://www.systemonline.cz/it-pro-logistiku/optimalizace-logistickych-procesu-a-materialovych-toku-pomoci-dynamicke-simulace-1.htm>>.

ULRYCH, Zdeněk a Antonín MILLER. *Simulace logistických toků a zásobování materiálem*. IT SYSTEMS [online]. 2013, č. 11 [cit. 2018-10-19]. Dostupné z URL: <<https://www.systemonline.cz/rizeni-vyroby/simulace-logistickych-toku-a-zasobovani-materialem.htm>>.

WALTER, Jaromír, VEJMOLA Stanislav a Petr FIALA. *Aplikace metod síťové analýzy v řízení a plánování*. 1.vyd. Praha: SNTL, 1989. ISBN 80-03-00101-3.

World Passenger Car Production. ACEA European Automobile Manufacturers Association [online]. 2018 [cit. 2018-12-10]. Dostupné z URL: <<https://www.acea.be/statistics/article/world-passenger-car-production>>.

Seznam obrázků a tabulek

Seznam obrázků

Obr. 1.1 Základní typy úrovnových křižovatek	12
Obr. 1.2 Vybrané typy mimoúrovňových křižovatek	12
Obr. 1.3 Graf intenzity dopravy na hlavní a vedlejší komunikaci	14
Obr. 1.4 Vyznačení stopčar.....	17
Obr. 1.5 Tangenciální (vlevo) a radiální (vpravo) nájezd na okružní křižovatku ...	25
Obr. 1.6 Porovnání počtu kolizních bodů na průsečné a okružní křižovatce	26
Obr. 2.1 Neohodnocený grafový model dopravní sítě	30
Obr. 2.2 Maximální propustnost dopravní sítě	32
Obr. 3.1 Schéma vzniku simulačního modelu.....	35
Obr. 4.1 Základ modelu	43
Obr. 4.2 Metoda Endsim (SimTalk).....	46
Obr. 4.3 Styková křižovatka (model)	48
Obr. 4.4 Malá okružní křižovatka (model).....	50
Obr. 4.5 Velká okružní křižovatka (model).....	50
Obr. 4.6 Cyklus if pro nastavení řídicího času křižovatky (SimTalk)	52
Obr. 4.7 Výpočet časových intervalů (SimTalk)	52
Obr. 4.8 Zařazení konkrétní signalizační fáze (SimTalk)	53
Obr. 4.9 Grafické znázornění propustnosti křižovatky	54
Obr. 4.10 Světelně řízená křižovatka (model).....	54
Obr. 4.11 Graf propustnosti modelovaných řešení	55
Obr. 4.12 Graf průměrné doby strávené v modelu	56

Seznam tabulek

Tab. 1.1 Tabulka vstupních časů.....	23
--------------------------------------	----

Seznam příloh

Příloha č. 1 Tabulka možných kombinací	64
----------------------------------------------	----

Příloha č. 1 Tabulka možných kombinací

Pro potřeby experimentů se vstupními parametry *stav1*, *stav2* a *stav3* pro stanovení optimálního nastavení signálního programu byla sestavena tabulka všech možných kombinací. Jelikož je zadaná intenzita provozu v modelech nízká, pro každý stav jsou určeny pouze 4 časy (10, 15, 20 a 25), které jsou postupně pomocí *ExperimentManageru* simulovány. Výsledná tabulka všech 64 kombinací je k nahlédnutí níže.

exp	stav1	stav2	stav3
1	10	10	10
2	10	10	15
3	10	10	20
4	10	10	25
5	10	15	10
6	10	15	15
7	10	15	20
8	10	15	25
9	10	20	10
10	10	20	15
11	10	20	20
12	10	20	25
13	10	25	10
14	10	25	15
15	10	25	20
16	10	25	25
17	15	10	10
18	15	10	15
19	15	10	20
20	15	10	25
21	15	15	10
22	15	15	15
23	15	15	20
24	15	15	25
25	15	20	10
26	15	20	15
27	15	20	20
28	15	20	25
29	15	25	10
30	15	25	15
31	15	25	20
32	15	25	25

exp	stav1	stav2	stav3
33	20	10	10
34	20	10	15
35	20	10	20
36	20	10	25
37	20	15	10
38	20	15	15
39	20	15	20
40	20	15	25
41	20	20	10
42	20	20	15
43	20	20	20
44	20	20	25
45	20	25	10
46	20	25	15
47	20	25	20
48	20	25	25
49	25	10	10
50	25	10	15
51	25	10	20
52	25	10	25
53	25	15	10
54	25	15	15
55	25	15	20
56	25	15	25
57	25	20	10
58	25	20	15
59	25	20	20
60	25	20	25
61	25	25	10
62	25	25	15
63	25	25	20
64	25	25	25

ANOTAČNÍ ZÁZNAM

AUTOR	Ondřej Kopčan		
STUDIJNÍ OBOR	6208R186 Podniková ekonomika a řízení provozu, logistiky a kvality		
NÁZEV PRÁCE	Řízení dopravních toků s využitím počítačové simulace		
VEDOUCÍ PRÁCE	doc. Ing. Jan Fábry, Ph.D.		
KATEDRA	KLAT - Katedra logistiky, kvality a automobilové techniky	ROK ODEVZDÁNÍ	2018
POČET STRAN	64		
POČET OBRÁZKŮ	21		
POČET TABULEK	1		
POČET PŘÍLOH	1		
STRUČNÝ POPIS	<p>Bakalářská práce se zaměřuje na problematiku řízení dopravních toků na křižovatkách. V práci jsou popsány aspekty správného projektování křižovatek společně s vymezením možností organizace dopravy a přístupů k řízení dopravy. S využitím základních pojmů teorie grafů jsou tyto znalosti doplněny představením dopravních sítí.</p> <p>Pro potřeby praktické části práce je představen simulační software PlantSimulation, základní principy počítačové simulace a dostupné nástroje pro řízení dopravních toků. V tomto softwaru jsou následně vytvořeny modely vybraných typů křižovatek. Výsledky simulací jsou pomocí sledovaných proměnných porovnány a okomentovány. Hlavním výstupem této práce je použitá a popsaná metodika aplikování těchto nástrojů v praxi.</p>		
KLÍČOVÁ SLOVA	Řízení dopravních toků, křižovatka, dopravní síť, počítačová simulace, PlantSimulation		

ANNOTATION

AUTHOR	Ondřej Kopčan		
FIELD	6208R186 Business Administration and Operations, Logistics and Quality Management		
THESIS TITLE	Traffic Flow Management Using Computer Simulation		
SUPERVISOR	doc. Ing. Jan Fábry, Ph.D.		
DEPARTMENT	KLAT - Department of Logistics, Quality and Automotive Technology	YEAR	2018
NUMBER OF PAGES	64		
NUMBER OF PICTURES	21		
NUMBER OF TABLES	1		
NUMBER OF APPENDICES	1		
SUMMARY	<p>The bachelor thesis focuses on the issues of traffic flow management at intersections. The thesis describes aspects of correct design of intersections, together with the definition of traffic organisation options and approaches to traffic management. Using the basic concepts of graph theory, this knowledge is complemented by the introduction of transport networks.</p> <p>For the practical part of the thesis, the simulation software PlantSimulation is introduced, together with basic principles of computer simulation and available tools for traffic flow management. Using this software, models of selected crossroads are created. The results of simulations are compared and commented on using the monitored variables. The main outcome of this work is the used and described methodology of applying these tools in practice.</p>		
KEY WORDS	Traffic flow management, intersection, road traffic network, computer simulation, PlantSimulation		