



Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Přírodovědecká fakulta

**Simulace dopravy s respektováním autonomní
komunikace mezi vozidly**

Bakalářská práce

Bc. Michal Papaj

Školitel: Ing. Jiří Jelínek, CSc.

České Budějovice 2022

Bibliografické údaje

Papaj, M., 2022: Simulace dopravy s respektováním autonomní komunikace mezi vozidly. [Traffic simulation with respect to autonomous communication between vehicles. Bc. Thesis, in Czech] – 73 p., Faculty of Science, University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic.

Anotace

Práce se zabývá tvorbou multiagentního modelu za účelem ověření vlivu komunikace mezi vozidly na plynulost dopravy. Zkoumá osobní charakteristiky a chování řidiče za účelem tvorby realistické simulace. Shrnuje možnosti zisku dat a komunikace v V2C a V2I komunikaci. Praktická část je zaměřena na tvorbu modelu využití multiagentního modelování se zaměřením na komunikaci mezi vozidly. Na základě výsledků experimentů jsou vyvozeny závěry a následná doporučení.

Annotation

Bachelor's thesis is focused on the multi-agent model in order to determine influence of communication between vehicles on traffic flow. Initial part examines personal characteristics and behaviour of a driver to create a realistic simulation. Thesis summarizes the possibilities of data acquisition and communication in V2V and V2I communication. Practical part aims on the creation of multi-agent model with a focus on communication between vehicles. Conclusions and subsequent recommendations are drawn based on the results of experiments.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem autorem této kvalifikační práce a že jsem ji vypracoval pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Českých Budějovicích dne 8. 12. 2022

.....

Michal Papaj

Poděkování

Rád bych poděkoval svému školiteli Ing. Jiřímu Jelínkovi, CSc., své rodině a přátelům za jejich podporu a neskonalou trpělivost.

Obsah

1 ÚVOD	1
1.1 CÍLE PRÁCE	2
2 TEORETICKÁ ČÁST	3
2.1 MULTIAGENTNÍ MODELOVÁNÍ DOPRAVNÍCH SYSTÉMŮ S PARAMETRY ŘIDIČE	3
2.2 INTELIGENTNÍ DOPRAVNÍ SYSTÉM	17
3 MODEL VÍCEPROUDÉ KOMUNIKACE	28
3.1 ANYLOGIC	28
3.2 NÁVRH SIMULAČNÍHO MODELU.....	28
3.3 DOPRAVNÍ ÚSEK	30
3.4 ŘIDIČ	31
3.5 ROADOBSERVER.....	40
3.6 ROADTRASMITTER	41
3.7 CENTRALUNIT	41
3.8 STATISTIKY.....	42
3.9 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI MODELU	43
4 EXPERIMENTY	44
4.1 ŠÍŘENÍ ZPRÁVY S UPOZORNĚNÍM.....	45
4.2 ZLEPŠENÍ KOMUNIKACE.....	48
5 ZÁVĚR	62
6 BIBLIOGRAFIE	63
7 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	67
8 SEZNAM GRAFŮ	68
9 SEZNAM OBRÁZKŮ	68
10 SEZNAM SCHÉMAT	69
11 SEZNAM TABULEK	69
12 PŘÍLOHY	70

1 Úvod

V dnešní době existuje nepřeberné množství aplikací, které řidičům umožňují upozorňovat na nečekané potíže během cesty. Hlášení kolon, nečekané zúžení silnice kvůli nehodě či dokonce její úplné uzavření. Mezi nejznámější aplikace a projekty v oblasti monitorování dopravní situace patří v případě zahraničí aplikace Waze. V případě České republiky se například jedná o systém RODOS s webovou aplikací viaRODOS a systém Czech Traffic, který disponuje nejen webovým rozhraním, ale také aplikacemi pro mobilní telefony se systémy Android a iOS.

Existuje více způsobů, jakým jsou informace o dopravní situaci získávány. Nové informace do aplikací zadávají zpravidla jejich uživatelé, většinou se jedná o samotné řidiče nebo jejich spolujezdce. Pokud cestuje řidič sám, může využít hlasového ovládání a zadat nové informace ihned po zjištění události. Řidič však takové možnosti využít nemusí, v takovém případě dochází mnohdy k významné prodlevě šíření aktuálních informací.

Dalšími možnostmi monitoringu dopravní situace mohou kromě kamerových systémů být i data získaná přímo z vozidel účastnících se silničního provozu (FCD – floating car data). Mezi FCD lze zařadit informace získané z GPS systému vozidla nebo data získána senzory mobilního telefonu, například poloha, směr a rychlost pohybu. Získání FCD a následná distribuce zpracovaných informací může probíhat více způsoby v závislosti na použité infrastruktuře nebo míře hustoty průjezdu vozidel. Vybraný způsob distribuce má následně dopad na rychlost, s jakou zareagují na nenadálou událost ostatní účastníci silničního provozu. Systémy RODOS i Czech Traffic zpracovávají získaná data centrálně a posléze distribuují výstupy pomocí svých aplikací ostatním účastníkům provozu. Existuje však i jiný pohled na distribuci dat. Vozidla mohou obejít centrální zpracování informací a místo toho si nejnovější data posílat automaticky mezi sebou, což odstraní potřebu udržovat centrální server pro zpracovávání dat a tato režie se přesune na jednotlivá vozidla.

1.1 Cíle práce

Výsledkem teoretické části bude provedení dvou rešerší. První rešerše se zaměří na téma multiagentního modelování dopravních systémů. Výsledný model by měl mimo jiné realisticky simulovat chování řidiče, proto je třeba dbát při tvorbě této rešerše na chování a osobní charakteristiky řidiče.

Pro vznik kvalitního modelu je neméně důležitý výběr možností, jakými se získávají data o provozu. Je tedy třeba udělat také rešerši metodik získání dat o pohybu a stavu vozidel a jednotlivým metodám přiřadit jasné charakteristiky. Rešerše bude nejvíce soustředěna na získání FCD, ale nevyhne se ani jiným metodikám. Nakonec budou zanalyzovány možnosti, jakými mohou mezi sebou vozidla v provozu komunikovat.

Získané závěry z předešlých částí poslouží ke vzniku návrhu simulačního modelu vozidel a vybraného úseku vícepruhové komunikace spolu s návrhy, jakým způsobem budou jednotlivé druhy komunikace implementovány do hotového modelu. Za vznikem tohoto návrhu stojí snaha ověřit možnosti využití vybraných variant komunikace mezi vozidly, jejich vliv na plynulost a rychlost dopravy a efektivitu reakce na vznik nečekaných událostí, například zablokování jednoho či více pruhů dopravní komunikace vlivem nehody nebo ucpání některého úseku vlivem jeho přetížení.

Po vytvoření návrhu se přejde k samotné implementaci modelu, na kterém budou posléze provedeny experimenty zaměřené na jevy zmíněné v předchozím odstavci. Dojde také ke kvantitativnímu zhodnocení vlivu komunikace mezi jednotlivými subjekty modelu.

V posledním kroku se zanalyzují výsledky simulace, porovnájí a vyhodnotí se výsledky získané při využití různých metod komunikace vozidel. Na základě těchto výsledků budou stanovena doporučení pro jednotlivé metody.

2 Teoretická část

2.1 Multiagentní modelování dopravních systémů s parametry řidiče

2.1.1 Dopravní systém

Článek [1] nabízí dva hlavní přístupy pro simulování dopravních scénářů:

- **Makroskopické** modely popisují provoz jako fyzický tok kapaliny a využívají matematické rovnice pro práci s makroskopickými veličinami, například hustotou provozu, průjezdností komunikací či průměrnou rychlostí. Tyto modely se nezabývají jednotlivými vozidly, předpokládají tedy, že se všechna vozidla chovají racionálně a tok dopravy je poměrně konzistentní. Podle [2] jsou makroskopické modely užitečné pro rozsáhlé dopravní systémy, které nepotřebují detailní pohled, například model popisující síť dálnic. Tento typ modelu není vhodný pro modelování skutečného provozu, protože není příliš realistický a nezohledňuje chování jednotlivců.
- **Mikroskopický** model bere v úvahu charakteristiky jednotlivých prvků v provozu a jejich společné interakce. Prvky vyskytující se v tomto modelu mohou být vozidla, semaforey či dopravní značení. Každé vozidlo interaguje s jinými vozidly a s prostředím.

Rozdělení simulací dopravního systému

Simulace dopravních systémů lze rozdělit podle typu dopravní sítě a možností, které simulace umožňuje. Simulace dopravy lze dle [2] klasifikovat do dvou skupin podle zaměření na dálniční a městské prostředí:

- **Simulace dálničních sítí** se zaměřují na pohyb po víceproudé komunikaci. Pro takové simulace není třeba tolik složitý model jako v případě městského prostředí, model se soustředí především na vozidla a jejich interakce. K vytvoření modelu dálniční sítě je možné využít mikroskopický i makroskopický přístup. Mezi hlavní rysy modelu zaměřeného na dálniční síť patří chování řidiče při následování před ním jedoucích vozidel a přejíždění mezi několika jízdními pruhy. Pokud v tomto druhu modelu existují křižovatky nebo výjezdy z dálnic, slouží především jako body pro vstup či

výstup agentů ze simulace. Pomocí těchto bodů lze upravovat provozní zátěž sítě. Modely dálničních sítí se využívají ke studiu vlivu dopravních nehod, omezení rychlosti provozu či uzavření některých pruhů na provoz dopravy.

- **Městské prostředí** představuje složitější a komplexnější dopravní scénář. Na rozdíl od dálniční sítě je dopravní proud často přerušován křižovatkami, světelnými signály, kruhovými objezdy, nebo přechody pro chodce. Městská síť obsahuje obvykle vysoké množství spojení mnohdy s konfliktním dopravním tokem. Po komunikacích se pohybuje velké množství vozidel, což často vyústí ve vysokou úroveň přetížení silnic. Výhody mikroskopického přístupu jsou lehce patrné, neboť jednotlivá vozidla mohou reagovat na všechny prvky nacházející se v simulovaném prostředí. Agent dokáže přečíst dopravní znamení, zareagovat na přechod pro chodce či vlakový přejezd.

Pro vytvoření modelu reprezentující vliv inteligentního dopravního systému na plynulost dopravy je vhodné využít oba přístupy k modelování. Některé metody získu dat mohou být lehce využitelné pro městské prostředí s vysokou hustotou vozidel, ale v rozlehlejších prostředí by nemusely dosahovat nijak vysoké efektivity.

Elementy užití v modelu dopravního systému

V modelovaném prostředí se nachází řada elementů, které nemají přímou souvislost s vozidly nebo řidiči, mají však stále vliv na styl jízdy nebo jízdu samotnou. Hlavní složkou modelu je síť silnic, a právě stav vozovky může ovlivnit jízdu vozidel. Jízdní komfort řidiče je tím větší, čím je povrch vozovky kvalitnější. Výmoly na silnici omezují řidiče, který musí přizpůsobit styl své jízdy špatným podmínkám vozovky. Špatný stav vozovky zvyšuje riziko vzniku dopravních nehod. Během noci hraje podstatnou roli i osvětlení vozovky. Při nedostatečném osvětlení dochází ke snížení pozornosti řidiče, který může některé objekty lehce přehlédnout. Šířka vozovky též ovlivňuje způsob jízdy, příliš úzká silnice může způsobovat problémy protijedoucím vozidlům nebo při objíždění překážek na silnici.

Kromě jízdních pruhů lze za základní prvky modelu považovat též křižovatky. Ty mohou ovlivňovat jízdu různým způsobem v závislosti na typu křižovatky. V případě větších křižovatek je situace řízena světelnými signály, u těch menších závisí doprava na pravidlech silničního provozu.

V průběhu jízdy je řidič instruován dopravními značkami, ty mohou ovlivňovat chování řidiče mnohými způsoby, například omezením rychlosti, úpravou pravidel přednosti nebo změnou směru jízdy.

Při modelování městské části je třeba počítat i s přechody pro chodce. Většinou jsou umístěny v oblasti křižovatek, neplatí to však vždy a je tedy třeba počítat i s umístěním přechodu pro chodce v oblasti delšího úseku pozemní komunikace.

V prostředí modelu se taktéž mohou nacházet prvky inteligentního dopravního systému. Kromě prvků zajišťující sběr dat je potřeba brát zřetel i na infrastrukturu pro přenos dat. Může se jednat o řídicí centrum či jednotlivé vysílače, které lze rozdělit podle typu použité technologie.

2.1.2 Simulační techniky

Multiagentní modelování

Základním principem multiagentního modelování je zaměření na elementární prvky komplexního systému, které mezi sebou provádí interakce. Agentům lze přiřadit individuální vlastnosti a charakteristiky chování. Chování těchto agentů je z části definováno nastavením jednoduchých pravidel, ale nemalou měrou ke způsobu chování přispívají i interakce s jinými agenty. Samotné interakce mezi agenty v modelu nemusejí mít vypovídající hodnotu, ale mohou pomoci při pozorování systému jako celku. Z pozorování lze objevit vzory chování, které nebyly přímo naprogramovány, ale vyplývají právě z interakcí agentů. V multiagentním modelování je na rozdíl od jiných simulačních technik vkládán důraz na různorodost jednotlivých agentů. [3]

2.1.3 Agent

Agentem je nazvána jakákoliv jednotka schopná vnímat prostředí, ve kterém se vyskytuje, pomocí receptorů a působit na toto prostředí pomocí efektorů. Agent může reagovat na aktuální vjemy, nebo se rozhodovat podle více vjemů, které někdy dříve získal. Příkladem mohou být robotičtí agenti, kteří vnímají okolní prostředí pomocí kamer a infračervených senzorů a využívají různé druhy motorů pro pohyb. V případě softwarového agenta lze jako vnímání nazvat například rozpoznání stisku klávesy. Odpovídající reakcí poté může být zobrazení nějaké informace na obrazovce. [4]

Článek [3] jako základní definující charakteristiku agenta označuje jeho schopnost jednat autonomně na základě vlastního rozhodnutí. Typicky jsou pak agenti aktivní a inicializují vlastní akce k dosažení svých cílů, než aby pasivně reagovali na prostředí a jiné agenty.

Práce [5] nabízí následující definici autonomie agenta: *Autonomie je vlastnost agenta, spočívající v samostatnosti rozhodování o svém chování v rámci daného systému, bez implicitní závislosti na jakýchkoliv jiných prvcích tohoto systému.*

2.1.4 Prostředí

Pro správné fungování agenta je neméně důležité prostředí, ve kterém se má vyskytovat. Podle [5] je možné jako prostředí označit vše, s čím agent během svého působení přijde do styku.

Typů prostředí je nepřeberné množství, lze je nicméně kategorizovat dle určitých specifikací. Kategorie prostředí pomáhají určit vhodný návrh agenta. V publikaci [4] jsou definovány tyto kategorie:

- **Plně pozorovatelné / Částečně pozorovatelné:**

Pokud je agent schopen kdykoliv pomocí svých receptorů získat přístup k úplnému stavu prostředí, lze ho nazvat plně pozorovatelné. Pokud dochází k nedokonalému zisku vjemů, nazýváme toho prostředí jen částečně pozorovatelné. Při absenci jakýkoliv senzorů schopných získávat vjemy z prostředí lze toto prostředí nazvat nepozorovatelné.

- **Deterministické / Stochastické:**

Deterministické prostředí nastává ve chvíli, kdy jeho následující stav je určen pouze stavem aktuálním a činnostmi provedenou agentem. Pokud dochází ke změně stavu nějakou náhodnou veličinou, hovoříme o prostředí stochastickém. Pokud je prostředí stochastické nebo jen částečně pozorovatelné, potom lze toto prostředí nazvat nejistým, neboť jeho následující stav lze předvídat pouze s určitou procentuální šancí.

- **Epizodické / Sekvenční:**

V epizodickém prostředí vykonává agent svou činnost v rámci nedělitelných epizod, v nichž nejprve přijme vjemy a následně provede určitou akci. V sekvenčním prostředí má mnohdy chování agenta vliv na jeho budoucí akce. Agent pracující v sekvenčním prostředí tedy může být vybaven určitou vnitřní pamětí uchovávající předchozí rozhodnutí.

- **Statické / Dynamické:**

V případě dynamického prostředí dochází k jeho změnám během zpracovávání vjemů agentem, tedy v době mezi příjmem vjemu a následnou akcí. Ve statickém prostředí dochází ke změnám pouze na základě akcí agenta. Agent tedy nemusí aktivně kontrolovat nové vjemy během určování jeho akce ani nemusí brát v potaz dopad času na trvání vyhodnocení jeho reakce.

- **Diskrétní / Spojité:**

Způsob, jakým se v daném prostředí pracuje s časem. V diskrétním prostředí probíhá veškeré dění v rámci jednotlivých kroků. Ve spojitém prostředí ubíhá čas neustále.

- **Znamé / Neznámé:**

Ve známém prostředí si je agent vědom jeho fyzikálních zákonů a možných následků svých akcí. Agent pohybující se v neznámém prostředí musí nejprve prozkoumat dopady svých akcí a poté na jejich základě určit ideální postup například pro dosažení svého cíle.

2.1.5 Druhy agentů

Princip každého agenta je v základu stejný. Přijaté vjemy jsou zpracovány a následně se agent rozhodne, kterou akci provede. Agenti se však mohou lišit právě způsobem rozhodování. Publikace [4] rozlišuje 4 základní třídy agentů, které lze převést na učícího se agenta schopného lepších reakcí:

- **Agent s reflexy:**

Nejjednodušší typ agenta, který pracuje pouze s aktuálně získanými vjemy, jelikož nemá žádný vnitřní stav uchovávající předchozí vjemy. Rozhodování je založeno na implementovaných podmínkách, kdy jsou nejprve zkontrolována vstupní data a následně je provedena určitá akce. Může u něj dojít k zacyklení, kdy agent není schopen vnímat širší perspektivu a pokouší se provést stejnou akci stále dokola.

- **Agent s modelem:**

Aby se překonal problém v částečně pozorovatelném prostředí, může mít agent nějaký svůj vnitřní stav popisující prostředí z předchozích pozorování. Pro udržení validního

obrazu simulovaného prostředí je třeba, aby měl agent představu o principech, kterými se prostředí řídí bez ohledu na chování agenta, a také přehled o možných dopadech svých činností. Tyto dvě znalosti o fungování okolního prostředí představují model, který agent využívá k rozhodnutí o provedení určité akce.

- **Agent s cílem:**

Někdy však samotné informace o aktuálním stavu prostředí nemusí stačit k vybrání správné akce agenta. Aby si agent mohl spolehlivě vybírat, co zrovna udělá, je třeba nastavit agentovi určitý cíl, který bude svými činnostmi sledovat. Agent tak nevyhodnocuje pouze aktuální stav simulačního prostředí, ale také zvažuje dlouhodobé následky svých činů.

- **Agent s užitekem:**

Ve většině případů může agent svého cíle dosáhnout mnohými způsoby, ne každý z nich však přináší požadovaný užitek. Aby se agent mohl rozhodovat s co nejlepším výsledkem, je třeba implementovat do funkce rozhodování i další požadavky a přidat i míru naplnění užitku provedené činnosti agenta. Využit tento typ agenta je možné například při existenci více cílů, kterých se agent snaží dosáhnout. Tehdy se agent může rozhodnout podle nového měřítka, které určuje jeho efektivitu.

- **Učící se agent:**

Pokud se agent vyskytuje v neznámém prostředí, není mnohdy schopen splnit svůj cíl natož ho splnit s požadovaným užitekem. Pro takové prostředí je vhodné implementovat agenta se schopností získávat zpětnou vazbu ke svým činům a postupně se zdokonalovat. Je nutné rozšířit agenta o tři komponenty. Vjemy ze simulačního prostředí jsou kromě výkonného prvku zpracovávány i v komponentě zabývající se kritikou, kde dochází ke zhodnocení následků předchozích činů. Učící se prvek je třetí komponentou, zpracovává zpětnou vazbu po zhodnocení komponenty kritiky. V této komponentě dochází k procesu učení, vyhodnocení zpětné vazby způsobí změnu ve výkonném prvku tak, aby následující činy agenta měly požadované následky.

Tyto tři komponenty by mohly být pro agenta dostačující, může však nastat situace, kdy se agent zastaví v lokálním optimu a do globálního se nikdy nedostane. Od toho existuje

v učícím se agentu čtvrtá komponenta, generátor problémů. Tato část navrhuje provedení jiných akcí, které mohou vést k novým informacím o simulačním prostředí.

2.1.6 Interakce mezi agenty v multiagentním modelu

Mimo modelování samotného agenta je též důležité správně naimplementovat i vzájemné interakce mezi agenty. Základními problémy je určení, kdo s kým může komunikovat, a definovat možné způsoby interakce mezi agenty.

Jindřiška Reismüllerová ve své práci [6] popisuje dva druhy systému multiagentního modelování. Centralizovaný systém představuje jako množinu agentů komunikující mezi sebou prostřednictvím nadřízeného agenta, který přijímané zprávy zpracuje a dále předává pokyny pro agenty nižší instance.

V případě decentralizovaného systému jsou veškeré informace dostupné pouze na lokální úrovni, získané pomocí receptorů. V takovém systému neexistuje centrální autorita, která by posílala informace všem agentům nebo dokonce ovlivňovala chování agentů za účelem lepších výsledků simulace. Agenti jsou schopni komunikace mezi sebou, ale nikoliv se všemi ostatními agenty v reálném čase. Agent je většinou schopen interakcí s určitou podskupinou agentů, které lze nazvat jeho sousedy. Agent tedy vnímá pouze své okolí z celého prostředí a stejně tak přijímá informace pouze od svých sousedů. Množina sousedů se většinou v průběhu simulace mění spolu s tím, jak se mění poloha jednotlivých agentů.

Způsob propojení agentů se obecně nazývá topologie. Běžná topologie propojení zahrnuje prostorovou mřížku nebo síť uzlů a hran. Uzly v takovéto síti prezentují jednotlivé agenty, hrany poté jejich vztahy. Těmito topologiemi je vyjádřeno, který agent předává informace komu. Agent může být v rámci jednoho modelu členem více topologií.

Množina sousedů je pojem aplikovatelný bez ohledu na dimenzi propojení, může se jednat o blízkost ve fyzickém prostoru nebo o abstraktní množinu znamenající sociální interakce, například přátelství.

Komunikační model

Alexandru Cicortas a Norbert Somosi představují komunikační model založený na spolupráci [7]. Agenti musí mít nástroje pro sdílení informací a znalostí tak, aby jejich vlastní činnost byla srozumitelná pro ostatní agenty systému. Spolupráce je způsob, jak umožnit agentům pracovat společně na společném cíli, jejich činnosti jsou neoddělitelné a probíhají v jasně definovaném pořadí. Zároveň musí být definován jazyk společný pro všechny agenty tak, aby mohli přesně vyjádřit své znalosti a podmínky interakcí.

Simulační systém městské dopravy představený Alexandrem Cicortasem a Norbertem Somosi je založen na myšlence rozdělení sítě cest na uzly představující agenty a hrany mezi nimi představující komunikační kanály. Předávaná zpráva zpravidla představuje vygenerované vozidlo.

V komunikačním modelu jsou využity dva druhy agentů:

- **Normální agenti:** slouží k přeposílání zpráv mezi jednotlivými agenty. Agent přijme zprávu (vozidlo) a přepoše ji dalšímu agentu v pořadí.
- **Inteligentní agenti:** mohou upravovat přijatou zprávu, případně ji pozdržet ve frontě po určitý čas. Příkladem inteligentního agenta v komunikačním modelu může být uzel typu křižovatky, neboť přeposílají zprávy pouze, pokud je jejich vnitřní stav nastaven na zelenou.

2.1.7 Řidič vozidla

Chování agentů představující vozidla není ve vytvořeném modelu podmíněno pouze vlastnostmi prostředí a charakteristikami vozidla samotného. Neméně důležitým prvkem je zde samotný řidič. Modely dopravních systémů mohou být zaměřeny na organizovaný nebo neorganizovaný provoz. V případě organizovaného provozu se vozidla pohybují po předem vytyčených trasách a celková doprava je řízena pouze semaforem na křižovatkách. Tato práce je zaměřena na komunikaci mezi vozidly, kdy jsou sice data z provozu získávána především pomocí detektorů a zařízení popsanych v další kapitole, nicméně jejich konečné zpracování je na řidiči vozidla, který posléze rozhodne, jakým způsobem se získanými informacemi naloží. Je tedy třeba při vytváření modelů neopomenout lidský faktor.

Vozidla mezi sebou interagují nejen v závislosti na jejich pozicích či rychlostech, ale do jejich interakcí vstupuje i lidský faktor. Zásah lidského faktoru do rozhodování lze ukázat na následujícím případu. Dvě vozidla se pohybují stejným směrem. Pokud se vozidlo vpředu pohybuje nižší rychlostí, je třeba rozhodnout o akci zadního vozidla. To může snížit rychlost pro zabránění kolize nebo se v určitých případech rozhodnout pro předjíždění. Aby se agent rozhodl předjíždět před ním jedoucí vozidlo, je podle [8] potřeba do rozhodovacího algoritmu vložit i specifikace lidského chování, například míru sebevědomí či časovou tíseň.

Rozhodování dle cílů

V publikaci [8] je rozhodování řidiče rozděleno na makro (dlouhodobé) a mikro (krátkodobé) cíle:

- **Dlouhodobé cíle** jsou základními cíli agenta, které se buď v průběhu simulace nemění, nebo jsou měněny s relativně nízkou frekvencí. Těmito cíli může být cílová destinace vozidla spolu s vypočítanou cestou, kterou se vozidlo vydá. Pro snadnější rozhodování v průběhu simulace může být vypočítaná cesta vytyčena pouze orientačními body, například křižovatkami. Jakým způsobem se vozidlo dostane z jednoho orientačního bodu do druhého již není zahrnuto v rozhodování v rámci dlouhodobého cíle.
- **Krátkodobý cíl** zahrnuje výsledek jakéhokoliv rozhodování v kterémkoliv časovém bodu za účelem dosažení cíle. Ve skutečnosti se jedná o jakýkoliv cíl, který agenta přiblíží ke splnění svého dlouhodobého cíle. Může se jednat například o rozhodnutí zvýšit rychlost vozidla nebo předjet vozidlo jedoucí před agentem. V rámci konkrétního modelu, který je jedním z cílů této práce, lze za krátkodobý cíl považovat i rozhodnutí vyhnout se dopravní zácpě.

Dynamické chování

Agenti představující vozidla s řidiči musí dynamicky reagovat na neustále proměnlivé prostředí dopravního provozu. Základem jejich dynamiky je podle [8] kombinace předvídání a reaktivity, tedy schopností reagovat. V každém okamžiku simulace agent předvídá určité události a jeho chování je tomu přizpůsobeno. Stejně jako v reálném prostředí může nastat situace, kdy je agent nucen čelit události, kterou neočekával. Je tedy třeba, aby měl agent připravena určitá opatření i pro tyto neočekávatelné události.

Příkladem může být jízda vozidla v závěsu za druhým. Vozidlo jedoucí vzadu neví nic o situaci před v pořadí prvním jedoucím vozidlem, nemá tedy dostatek informací k předvídání jeho chování. Agent může předpokládat, že vozidlo před ním bude pokračovat stejnou rychlostí vpřed. V případě nenadálé situace, například prudké zpomalení vozidla před ním, však musí být připraven zareagovat tak, aby zabránil kolizi.

Osobní preference řidičů

Pro zpřesnění modelu je možné definovat agentům proměnné upravující typické charakterové rysy řidiče. Nabízí se následující příklady použitých proměnných:

- **Preference rychlosti**, kterou by chtěl řidič udržovat a která se může lišit od limitu rychlosti na pozemní komunikaci.
- **Preferenci využití brzdné síly** automobilu. Pokud mu vyhovuje menší využití brzdné síly, je třeba, aby pro zpomalení na určitou rychlost začal brzdit s předstihem oproti řidiči, kterému nevadí vyšší hodnota zpomalení. Stejně tak dochází k rozdílu při využití plné brzdné síly při vzniku akutní potřeby zastavit.
- **Míra možného zrychlení** je ohraničena vozidlem, ve kterém se řidič nachází, přesto je jeho zrychlení do určité míry ovlivněno řidičem.
- **Každý řidič udržuje jinou vzdálenost** od ostatních vozidel. Některý řidič dokáže udržovat bezpečnou vzdálenost od vozidla před sebou, nicméně je mnohdy možné se setkat s vozidly s velmi krátkým odstupem.
- **Vzdálenost případného protijedoucího vozidla** v případě, že se agent jedoucí za vozidlem rozhodne toto vozidlo předjíždět. Je-li vzdálenost dle jeho uvážení dostatečná, zahájí předjíždění. Dostatečná vzdálenost protijedoucích vozidel je subjektivní záležitost řidiče.

Výše uvedené charakterové znaky utvářejí psychologii řidiče. Dle Parachuriho [8] lze tyto psychologické rysy klasifikovat do třech skupin podle sklonu k dosažení svého zadaného cíle. Každý řidič uplatňuje při dosažení svých cílů určitou dravost. Podle míry dravosti existují řidiči agresivní, obvyklí a opatrní. Rozdíl v jejich chování lze vyzorovat při jízdě v jednom jízdním pruhu, pokud jsou omezováni pomaleji jedoucím vozidlem před nimi. V této situaci jede vozidlo před agentem nižší rychlostí, než je rychlost preferovaná sledovaným řidičem.

Kniha [9] popisuje negativní dopady agresivního jednání na chování řidiče. Řidič má zpravidla vyšší zrychlení a brzdnou rychlost, neudrží dostatečnou bezpečnou vzdálenost mezi vozidly a má tendenci zrychlit i kvůli krátkému úseku, po kterém stejně musí zpomalit. V porovnání s ostatními účastníky provozu řidiči s agresivním chováním častěji předjíždějí, udržují vyšší rychlosti a je u nich vyšší pravděpodobnost, že se pokusí natlačit své vozidlo mezi jiná vozidla. Někteří lidé mají predispozice k agresivnímu chování, je jejich charakterovým rysem, jiné řidiče však k agresivitě mohou dohnat události, které se staly v průběhu jízdy. Agresivně jedoucí řidič zvyšuje riziko vzniku dopravní nehody.

Další charakteristiky ovlivňující způsob jízdy řidiče

Důležitou roli ve stylu jízdy řidiče hraje podle [9] věk. Mladší řidiči jezdí odlišným stylem oproti starším osobám. Mladý řidič, který teprve nedávno získal řidičské oprávnění, nemá příliš zkušeností, a více se soustředí na činnosti s řízením souvisejícími, jež zkušenější řidič koná automaticky. Řidiči nižšího věku též tíhnou k přecenění svých řidičských schopností. Dle Jiřího Kamenického [10] bylo v České republice mezi roky 2007 až 2010 více než 50 % dopravních nehod zaviněno řidiči mladších 35 let. Se stoupajícím věkem klesá procento zaviněných dopravních nehod. V důchodovém věku nehodovost opět stoupá [9]. Starší lidé vykazují sníženou ochotu riskovat a mají častěji pomalejší reflexy, horší pozorovací schopnosti a občas se nedokáží rozhodnout ve složitější situaci.

Kniha [9] taktéž popisuje zkušenost řidiče jako jeden z parametrů utvářejících řidiče. Řidiči s čerstvým řidičským oprávněním nemají dost zkušeností, přeceňují své zkušenosti a nezvládají složité situace. Více zkušeností snižuje riziko nehod, pro zkušené řidiče je jednodušší zvládat nebezpečné situace. Uvádí se, že mladí řidiči potřebují až osm let řízení, aby se mohli pokládat za zkušené řidiče.

Vysoký dopad na způsob řízení má podle [9] taktéž stres. Pokud jede řidič pod vlivem stresu, méně se soustředí a tíhne k chybování. Uvolněný řidič věnuje více pozornosti svému okolí. Stres redukuje schopnost lidského mozku správně zpracovávat informace, dokáže tedy získávat méně podnětů oproti normálnímu stavu. Jízda v časové tísní je jedním z nejčastějších důvodů stresu a vede k nepředvídatelným akcím řidiče, například nebezpečnému předjíždění, které může lehce způsobit dopravní nehodu.

Faktor sebevědomí a faktor spěchu

Parachuri [8] ve své práci vysvětluje působení psychologie na řidiče při rozboru situace předjíždění. Aby se řidič rozhodl předjíždět, musí nejprve posoudit, zda je mezera mezi vedoucím a protijedoucím vozidlem dostatečná. To záleží kromě aktuální vzdálenosti i na rychlosti všech tří vozidel. Tyto dva údaje dohromady určují, jestli je možné vozidlo bezpečně předjet, po psychologické stránce však ještě záleží na dvou faktorech, spěchu a důvěře.

Řidič může pociťovat určitou hodnotu sebejistoty k předjetí vozidla. Každý řidič má dle [8] práh sebejistoty jinde. Agresivní řidič překypuje sebedůvěrou při předjíždění, zatímco faktor sebevědomí opatrného řidiče je velmi nízký. Z větší části rozhodnutí pro předjetí vozidla vychází právě z faktoru sebejistoty. V rámci modelování lze faktor sebevědomí považovat za určitou funkci, mezi jejíž vstupní parametry patří aktuální rychlost předjíždějícího vozidla, preferovaná rychlost řidiče a předpokládané rychlosti ostatních vozidel v provozu. Agresivní řidič může předpokládat, že ostatní účastníci provozu své rychlosti sníží nebo přinejhorším zůstanou stejné. Opatrný řidič naopak počítá s možným zvýšením rychlosti ostatních vozidel. Výsledkem této funkce je vzdálenost vozidel, pro kterou je řidič ochoten začít s předjížděním a následně dojde k porovnání se skutečnou mezerou mezi vozidly. Pokud je skutečná mezera mezi vozidly stejná nebo větší než vypočítaná vzdálenost, je řidič ochoten začít s předjížděním.

V běžném případě řidič předjíždí pouze v situaci, kdy je naprosto přesvědčen, že se mu manévru povede. V některých případech je řidič v časové tísní kvůli nějaké nouzové situaci, tehdy do jeho rozhodování vstupuje i faktor spěchu. Každý agent má jinou hodnotu tohoto faktoru. Pro určení faktoru spěchu využívá Parachuri [8] rozptyl od 0,75 do 1. Hodnota 1 značí, že řidič není v časové nouzi a jeho odhadování situace není ničím zkresleno. Pokud je hodnota nižší než 1, je posuzování situace řidičem zatíženo potřebou chvátat, touto hodnotou je vynásoben výsledek funkce pro výpočet faktoru sebejistoty. V zásadě tak snižuje mezeru mezi vozidly, při které zahájí manévru předjíždění.

Řidič zatížený při uvažování faktorem spěchu může samozřejmě přecenit své možnosti. Pokud si to agenti účastníci se provozu uvědomí, ve většině případů zafunguje jejich naprogramovaná reaktivita, v některých případech však může dojít ke kolizi. Při kolizi dojde k uzavření daného úseku komunikace.

Parametry řidiče v navrženém modelu

Na základě získaných poznatků byl určen způsob, jakým bude řidič v navrženém modelu ovlivňován. Místo několika parametrů, jejichž kombinací by byly určeny charakterové vlastnosti řidiče, bude možné nastavit řidiči jeden parametr s názvem agresivita. Tento parametr pak bude ovlivňovat osobní preference řidičů tak, jak jsou nadefinovány v kapitole 2.1.7. V modelu existují výchozí hodnoty pro rychlost, brzdnou sílu, zrychlení a vzdálenost mezi vozidly. Hodnota agresivity pak bude mít dopad na tyto charakteristiky řidiče.

2.1.8 Simulování chování řidiče pomocí architektury BDI

Pro modelování lidského chování doporučuje [9] využít architekturu BDI (Belief-Desire-Intention – představy-přání-záměry). Architektury využívající pouze logické závěry nejsou pro modelování chování řidiče vhodné, neboť nedokáží správně reagovat na vysokou dynamičnost okolního prostředí. Využití reaktivních agentů nemůže přinést uspokojující výsledky, protože se od řidiče neočekávají pouze reakce na vjemy získané z okolí. Agenti implementovaní za využití BDI architektury mají určité představy, svá přání, která lze pokládat za cíle, a záměry. Mohou mít i plány, jak svých cílů dosáhnout. Představy reprezentují aktuální vnitřní stav prostředí, ve kterém se agent vyskytuje. Pokud agent přijme novou informaci, je jeho vnitřní stav aktualizován. Příkladem představ jsou agentovy preference ve využití určitých cest či úroveň jeho agrese. Přání či touhy jsou cíle, kterých chce agent dosáhnout. Záměry určují aktuální akce agenta. Pokud nastane nová událost, agent se na základě nové situace rozhodne ve využití nejvíce vhodného plánu, záměrem tedy můžeme nazvat i uskutečnění některého z plánů.

Plány nejsou podle [9] definovány úplně přesně a v průběhu simulace mohou být některé detaily upraveny. Pokud agent přijme například informaci o zastavení provozu na své trase a jeho plánem je dojet do určité cílové destinace, je nucen upravit trasu, po které se pohyboval. Agent si též může zvolit, které cíle má aktuálně sledovat, na které události by měl reagovat a jakým způsobem by měl dosáhnout svého cíle. V některých případech se agent může i rozhodnout od svého cíle upustit.

Kniha [9] dále upozorňuje na možnost agenta pracovat během svého přemýšlení s časem. Pro určité situace se může rozhodovat delší dobu, a tedy realističtěji simulovat lidské chování.

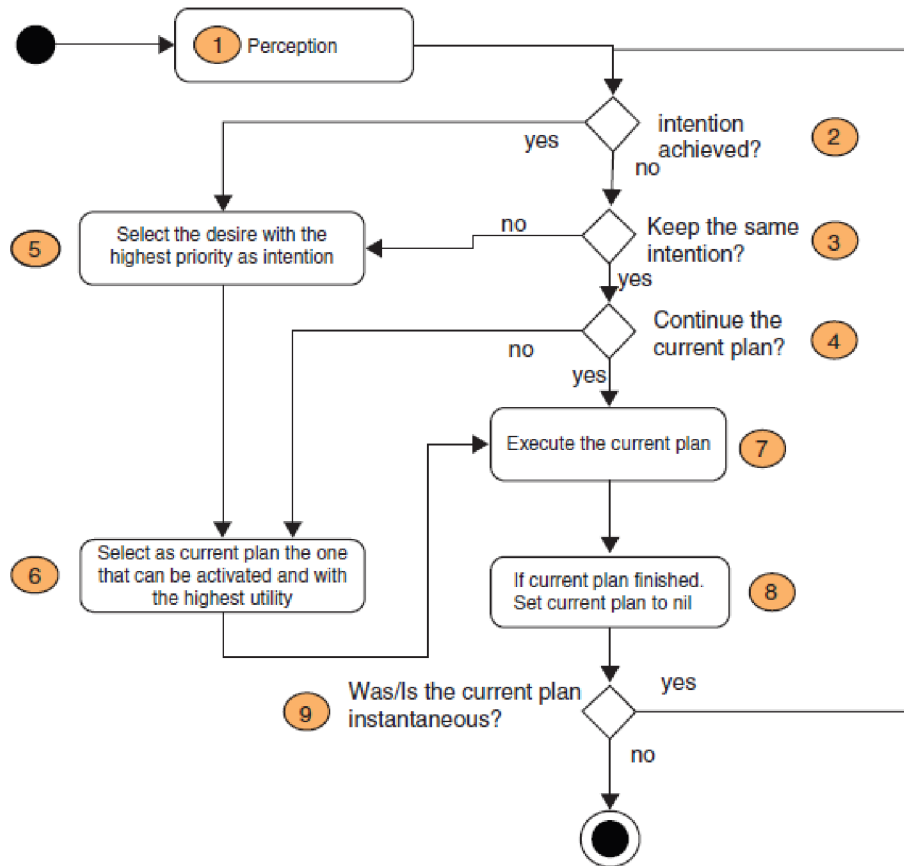
Časové trvání při zpracování získaných vjemů může napomoci simulovat různé úrovně citlivosti na změny prostředí.

Proces přemýšlení

Philippe Caillou se svými kolegy popisuje ve své práci [11] proces přemýšlení agenta v případě využití BDI architektury. Celý proces je popsán na obrázku číslo 1 a skládá se z následujících kroků:

1. **Vnímání:**
V tomto kroku jsou zpracovány nově získané vjemy na jejichž základě dojde k aktualizaci představ či přidání nových přání.
2. **Bylo dosaženo některého z mých záměrů?**
Pokud bylo dosaženo daného záměru, je možné odstranit aktuální plán, záměry i přání související s daným záměrem.
3. **Budu pokračovat se stejným záměrem?**
Zde do rozhodování vchází aktuální stav prostředí. Je možné, že se prostředí změnilo takovým způsobem, že je třeba přehodnotit své záměry.
4. **Budu pokračovat se stejným plánem?**
Pokud má agent nějaký plán shodující se s aktuálním záměrem, plán bude pokračovat. V některých případech může dojít k upuštění od zadaného plánu.
5. **Výběr přání pro nový záměr**
Pokud je třeba vybrat nový záměr, zvolí se ze seznamu aktuálních přání agenta podle priority.
6. **Zvolení nového plánu**
Nový plán je vybrán ze seznamu plánu kompatibilních s aktuálním záměrem na základě priority.
7. **Provedení současného plánu**
8. **Je můj plán dokončen?**
Pokud bylo dosaženo podmínky pro ukončení aktuálního plánu, plán bude vymazán. V opačném případě je plán využit při další iteraci.
9. **Mám můj plán okamžité následky?**

Některé plány mohou být brány v rámci jednoho kroku jako okamžité, agent tedy může provést v rámci jednoho cyklu přemýšlení více plánů.



Obrázek 1 Diagram procesu přemýšlení řidiče [11]

2.2 Inteligentní dopravní systém

Inteligentní dopravní systém (ITS) dle [12] spojuje IT s vozidly a dopravními sítěmi. ITS spojuje potřeby všech uživatelů dopravní infrastruktury do jednoho výsledného systému, jehož spojením vznikne nadstavba nad dopravou umožňující optimalizovat dopravní toky, a tedy zvýšit nejen plynulost, ale i bezpečnost provozu na těchto komunikacích. [12]

Pro svoji funkci potřebuje ITS vysoce kvalitní provozní data v reálném čase. Práce [13] nabízí tři možnosti získání těchto dat – použití detektorů podél komunikace, sběrem dat pomocí senzorů vozidla nebo využitím takzvaných Floating Car Data (FCD).

2.2.1 Získávání dat pomocí detektorů

Základním způsobem zisku provozních dat je využití *in situ* technologií, tedy zisk naměřených dat pomocí detektorů rozmístěných podél komunikací. [13] Existují dvě základní metody měření dat – destruktivní a nedestruktivní. [12] Jako destruktivní metody jsou označovány způsoby zisku dat pomocí senzorů a měřičů instalovaných dovnitř nebo na povrch vozovky. Nedestruktivní metody jsou založeny na vzdálenějším pozorování.

Destruktivní druhy detektorů

Mezi destruktivní metody zisku dat lze zařadit následující detektory [13]:

- **Pneumatické detektory** – gumové hadice položené napříč vozovkou. Vozidla jsou detekována na základě změny tlaku v hadici ve chvíli, kdy je stlačena pneumatikou projíždějícího vozidla. Změna tlaku je zaznamenána a zpracována samotným detektorem, který se nachází mimo komunikaci. Výhodou této metody je snadná instalace, při níž nedochází k narušení vozovky. Největší nevýhodou je závislost na počasí, teplotách a rychlé opotřebení hadice průjezdem vozidel.
- **Piezoelektrické detektory** – senzory jsou umístěné do žlábků vytvořených na povrchu vozovky. Principem je převedení mechanické energie do elektrické. Mechanická deformace materiálu indukuje v kabelovém vedení detektoru napětí, které je využito při vyhodnocení váhy projíždějícího vozidla. [12] Kromě váhy je detektor schopen rozlišit i rychlost vozidel.
- **Indukční smyčky** – nejběžnější technologie použitá v České republice sloužící ke shromažďování dat o provozu. [12] Indukční smyčka je umístěna do povrchu vozovky do tvaru čtverce, kde vytváří magnetické pole. Kovová karoserie projíždějících vozidel narušuje magnetické pole a tyto změny zaznamenává detektor umístěný mimo vozovku. Nevýhodou je nízká životnost, protože může snadno dojít k přetržení smyčky při průjezdu těžkých vozidel.

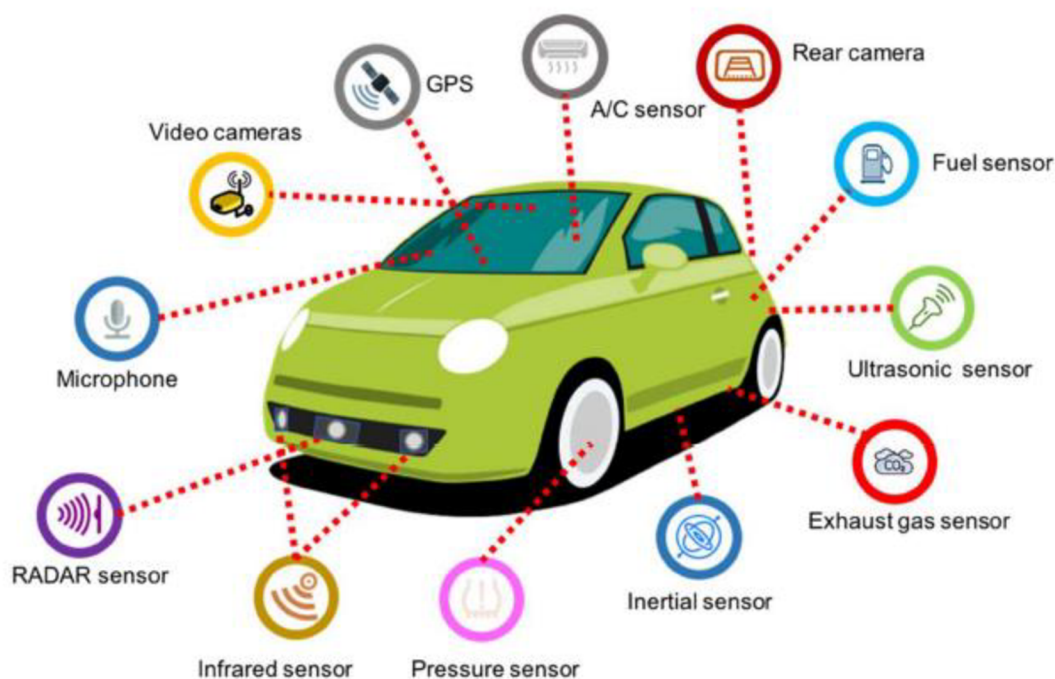
Nedestruktivní metody zisku dat o provozu

Data o provozu lze získat i nedestruktivními metodami, které žádným způsobem nenarušují ani nemění povrch vozovky. Data jsou získávána z větší vzdálenosti mezi detektory a projíždějícími vozidly [13]:

- **Ruční počítání** – nejtradičnější metoda. Pozorovatelé většinou sbírají data, která nelze efektivně získat zautomatizovaným počítáním, například míru obsazenosti vozidel a jejich klasifikaci. [13]
- **Pasivní infračervené detektory** – infračervené detektory, které nevysílají žádné záření, pouze zaznamenávají a vyhodnocují změny energie vyzářenou projíždějícími vozidly. Výhodou těchto detektorů je nezávislost na změnách počasí. [12]
- **Aktivní infračervené detektory** – aktivní infračervené detektory vysílají nízkoenergetické vlny v infračerveném pásmu. Tyto vlny jsou odraženy projíždějícími vozidly a následně přijímány optickými senzory. Na rozdíl od pasivních infračervených detektorů ovlivněny změnami počasí. [12]
- **Mikrovlnné detektory** – využívají šíření elektromagnetických vln, jejichž paprsek je vyslán z parabolické antény a odražen od karoserie vozidla zpět k detektoru. Používají se především k počítání projetých vozidel. [12]
Za využití Dopplerova jevu je lze též využít k výpočtu rychlosti projížděných vozidel. [13]
- **Ultrazvukové detektory** – v pravidelných intervalech vysílají zvukové vlny a následně měří dobu, za kterou se odražená vlna vrátí zpět. Tento systém je lehce ovlivněný teplotními i povětrnostními podmínkami. [13]
- **Optické detektory** – skládají se z vysílače a přijímače. Vysílač vysílá infračervený či laserový paprsek, jehož přerušení je zaznamenáno a zpracováno. Při využití dvou optických detektorů v předem stanovené vzdálenosti lze využít tuto metodu pro výpočet rychlosti projíždějících vozidel. [12]
- **Video detekce** – systém detekování projíždějících vozidel za využití kamer. Projíždějící vozidlo změní hodnoty barev a jasů, čímž dojde k jeho identifikaci. Kamera se zpravidla umísťuje na sloup světelné signalizace či veřejného osvětlení. [12]

2.2.2 Data získaná senzory vozidla

Senzory umístěné uvnitř auta či z vnějšku podle [14] slouží pro snahu vyřešit nejrůznější problémy, se kterými se řidič může setkat, například problémy s dopravní zácpou, parkováním nebo zpožděním. Přehled nejpoužívanějších senzorů lze najít na následujícím obrázku číslo 2.



Obrázek 2: Příklady senzorů ve vozidle [14]

Vyobrazené senzory mohou být rozděleny do několika kategorií [14]:

- **Detektory blízkých objektů** – lze je využít pro asistenci během parkování. Mezi takové detektory lze zahrnout snímače přiblížení. Ultrazvukové a elektromagnetické senzory. Snímače přiblížení dokáží detekovat objekty přibližující se k vozidlu. Ultrazvukové senzory využívají druh sonaru pro určení vzdálenosti objektů kolem vozidla. Elektromagnetické senzory vytváření kolem předních a zadních nárazníků elektromagnetické pole. Pokud některý objekt toto pole naruší, dojde k upozornění řidiče.
- **Detektory vzdálenějších objektů** – oblast kolem celého vozidla mohou monitorovat laserové a radarové senzory. K detekci objektů a určení jejich vzdáleností jsou v případě radaru využity radio vlny. Pokud je některý objekt tímto systémem

zachycen, bezpečnostní aplikace vozidla může aktivovat brzdy za účelem zabránění kolizi.

Jednou z klíčových komponent ve vývoji autonomních vozidel je takzvaný LIDAR, který na rozdíl od radaru nevyužívá rádiových vln, ale neustále vyzařuje paprsky laserového světla a následně měří dobu, za kterou se světlo vrátí ke snímači.

- **Stav vozidla** – k určení polohy, směru jízdy a rychlosti se využívá gyroskop a akcelerometr. Tato data se běžně využívají ke zvýšení přesnosti globálního pozičního systému GPS.

CAN sběrnice

Pro komunikaci mezi zařízeními uvnitř vozidla je dle [15] využit standard CAN. Sběrnice CAN představuje standard umožňující mikrokontrolerům a zařízením uvnitř vozidla komunikovat mezi sebou bez nutnosti centrálního počítače. CAN je síťový protokol speciálně navrhnutý pro využití ve vozidlech, v současnosti se však využívá i v jiných odvětvích, například automatizaci podniků nebo v lékařských zařízeních.

Podle [15] mohou mít moderní vozidla více než 70 elektronických řídicích jednotek využitelných v různých podsystémech. Největším procesorem zpravidla bývá kontrolní jednotka spolupracující s motorem vozidla. Jiné řídicí jednotky mohou být přiřazeny například k převodovce, airbagům nebo protiblokovací systém brzd ABS.

Informace jsou prostřednictvím sběrnice CAN posílány ve formě signálu, který může být vysílán všemi elektronickými zařízeními v moderním autě. Mezi nejdůležitější informace pro využití v ITS lze zařadit data o aktuálním stavu jízdy, například zrychlení, aktuální rychlost či úhel natočení kol. [15]

2.2.3 Floating Car Data

Principem FCD je sběr dat o provozu v reálném čase za pomoci především mobilních telefonů nebo GPS napříč celou dopravní infrastrukturou. Jak vysvětluje [13], každé vozidlo vybavené mobilním telefonem nebo GPS by se prakticky stává detektorem dopravní sítě. Informace o poloze, rychlosti vozidla a směru jízdy jsou nejprve anonymně poslána do centrální jednotky. Po jejich zpracování dojde k distribuci užitečných informací zpět účastníkům provozu.

Využití vozidel jako sond k monitorování dopravy je vícero. Kromě již zmíněných GPS a mobilních telefonů lze využít i sledování pohybu jednotlivých vozidel za pomoci jejich identifikace v dopravní síti například pomocí RFID čteček rozmístěných podél dopravní komunikace. [16]

V publikaci [17] je představeno několik způsobů přenosu dat. Jedná se především o sledování polohy vozidel pomocí vysílačů, identifikace vozidel, využití rádiové komunikace, GPS nebo mobilních telefonů:

Automatické sledování polohy vozidel pomocí vysílačů

Pro sledování pozic vozidel jsou podél dopravní infrastruktury rozmístěné vysílače sbírající údaje od projíždějících vozidel. Tato vozidla je třeba vybavit vlastními vysílači schopnými komunikovat s vysílači podél dopravních komunikací. Většinou je tento systém využit přepravními společnostmi v oblastech vysoké zástavby. Pro komunikaci mezi obcemi se tato technologie využívá pouze zřídka.

Každý z vysílačů podél cest emituje unikátní identifikační kód, který je přijímán projíždějícími vozidly. Tyto jedinečné kódy jsou uloženy v lokalizační jednotce vozidla spolu s časovou a datovou známkou, rychlostí a identifikačním kódem vozidla. V pravidelných intervalech jsou tato data posílána do centrálního řídicího zařízení ke zpracování.

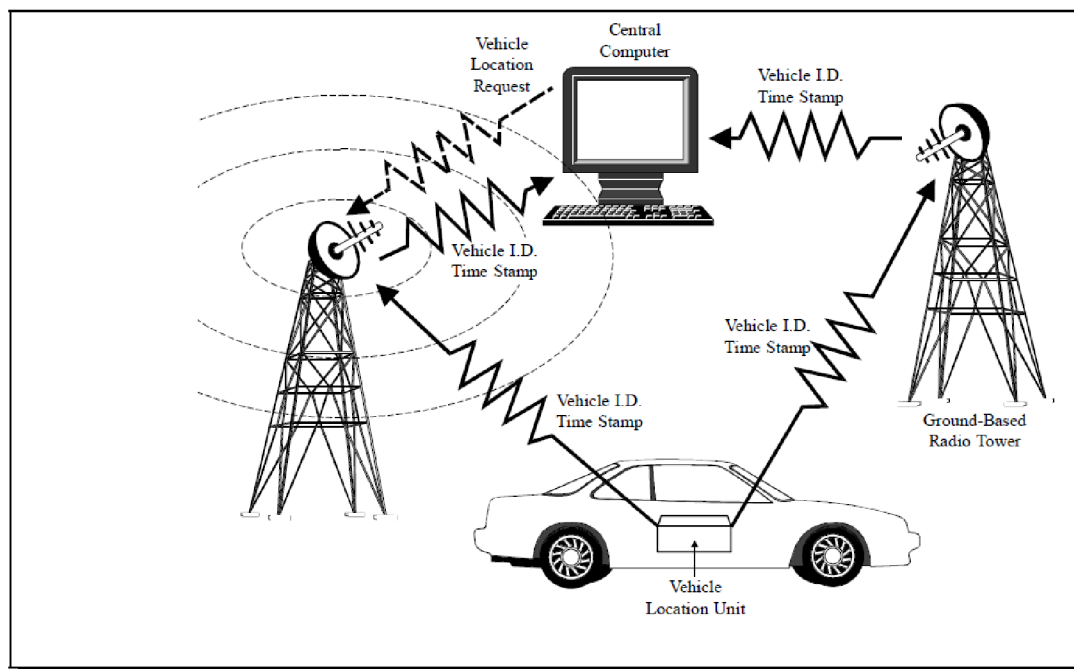
System AVL lze lehce implementovat instalováním vysílačů podél cest, nicméně s rozšiřující se rozlohou měřitelné oblasti se značně zvyšují náklady na provozovaná takového systému.

Automatická identifikace vozidel

Automatická identifikace vozidel je využívána zejména pro výběr mýtného, monitorování dopravy a sběr údajů o stavu dopravy. Využití mohou najít i pro sledování dopravní situace v hustě zabydlených oblastech, ale primárně účel je výběr mýtného.

Podél cest je třeba umístit speciální anténu, která detekuje projíždějící vozidla se zabudovaným transpondérem na identifikaci vozidel ve svém dosahu. Ve chvíli, kdy vozidlo zachytí signál antény, vyšle vlastní rádiový signál se svým ID. Anténa ID zachytí a spolu s časovou známkou pošle údaj o průjezdu vozidla do centrální jednotky k dalšímu zpracování. Rychlost vozidel se vypočítává dle času průjezdu mezi dvěma anténami.

Pozemní rádiová navigace



Obrázek 3: Princip pozemní rádiové komunikace [17]

Tato metoda využívá přijímací antény a vozidla se zabudovanými elektronickými transpondéry. Rádiová navigace na pozemních komunikacích se využívá především pro transportní dopravu a pro monitorování vozidel soukromých společností. Centrální zařízení v pravidelných intervalech či na základě jiného pokynu vysílá požadavek na určení polohy. Jakmile zařízení ve vozidle tento požadavek zachytí, vyšle prostřednictvím rádiové frekvence signál se svým ID a časem vysílání. Toto vysílání je zpětně zachyceno několika rádiovými věžemi a posláno do centrálního zařízení. Vysílaný signál mezi rádiovou věží a vozidlem cestuje lineárně při konstantní rychlosti. Lze tedy snadno vypočítat vzdálenost vozidla od rádiových věží. Přesná poloha vozidla je poté vypočtena matematicky pomocí triangulace za předpokladu, že vyslaný signál z vozidla přijmou alespoň 4 rádiové věže.

GPS údaje

Údaje o vozidle jsou získávány ze soukromých vozidel se zabudovanou GPS. Probíhá zde obousměrná komunikace se satelity na oběžné dráze. GPS signály jsou posílány do řídicího centra, kde je možné zobrazit pozici sledovaných vozidel v reálném čase. [17] V současné

době nejsou systémem GPS vybavena všechna vozidla, využití mají především při správě vozového parku. Určení polohy je relativně přesné v rámci jednotek metrů. [13]

Sledování pomocí mobilních telefonů

Jelikož má v dnešní době u sebe mobilní telefon téměř každý, vyplatí se podle [13] mobilní telefony využívat jako anonymní zdroje dat o dopravě. Poloha mobilních telefonů je pravidelně posílána do mobilní sítě pomocí triangulace či jiných technik. Po zjištění polohy vozidel je možné zpracovávat i další informace, například směr a rychlost pohybu.

2.2.4 Komunikace v ITS – V2I

V publikaci [18] je pojem Vehicle-to-Infrastructure (V2I) vysvětlen jako komunikace vozidla s některým centrálním prvkem, který zajišťuje sběr informací o provozu a stavu na pozemních komunikacích. Tento centrální prvek na základě zpracování získaných dat navrhuje vozidlům změnu jízdy či jejího stylu. Návrhy mohou být vozidlům předány buď prostřednictvím silničních displejů či jiných značení nebo za využití bezdrátového spojení přímo jednotlivým vozidlům.

V komunikačním prostředí dochází k přenosu dat, hlasu a obrazu. [12] Existuje několik systémů, které se o přenos informací starají a každý s nich má rozdílné požadavky na parametry přenosu. Telekomunikační sítě jsou v České republice poskytovány v rámci Jednotné telekomunikační sítě a dále jsou pak provozovány soukromými vlastníky a podnikatelskými subjekty. V [12] jsou dále popsány příklady komunikační infrastruktury:

- **Rozhlasové vysílání** – využívá analogové sítě. Rozhlasové vysílání RDS spočívá na šíření analogových přenosů, ke kterým jsou modulována i digitální data, například informace zobrazované na panelu rádia jsou tímto způsobem přenášeny. Rozhlasové vysílání umožňuje využívat i Traffic Message Channel (TMS), pomocí kterého je přenášen kód varovných hlášení, která jsou uložena na čipové kartě rádia.
- **Datové spojení veřejnou telefonní sítí** – veřejná telefonní síť je alternativním komunikačním kanálem využívající lokální spojení prostřednictvím modemu či digitálně.
- **Spojení krátkého dosahu DSRC** – tato metoda umožňuje bezdrátovou komunikaci na krátké vzdálenosti za využití mikrovlňného nebo infračerveného přenosu. Využíván

je především pro výběr mytného, nicméně existuje možnost využití i pro jiné účely, například pro platby za parkování. Vzhledem k velmi krátkému dosahu (několik desítek metrů) nenarušuje tento druh komunikace žádné z televizních ani rozhlasových vln

- **Multimediální systémy** – systémy umožňující přenášet kromě dat i obraz a zvuk. Pro tento druh přenosu se využívají vysokorychlostní síťové architektury, například ATM, Fast Ethernet nebo MPLS.
- **GMS přenosy** – Představuje spojení prostřednictvím digitální radiové sítě GSM. Tento systém využívá vybudovanou infrastrukturu pro telefonní sítě, které pokrývají téměř celé území. V tomto případě jsou data posílána obousměrně, a tedy informace z vozidel mohou být centrálně zpracovány a následně budou stejným zařízením přijata výstupní data centrály. Mimo vozidla mohou zpracovaná data přijímat i jiné aktivní prvky na pozemních komunikacích, příkladem může být informační tabule.

2.2.5 Komunikace v ITS – V2V

Zkratka V2V je odvozená od Vehicle-to-Vehicle, což znamená přímou komunikaci mezi vozidly. Realizovat komunikaci mezi vozidly bez využití centrálního prvku je podle [18] složitější než vytvoření V2I komunikace, neboť dochází k vytvoření decentralizované struktury vozidel schopných komunikovat a v optimálním případě i spolupracovat. Komunikace a výměna dat probíhá vždy v rámci určité lokality mezi skupinou vozidel, které jsou aktuálně v dosahu jiného vozidla. Použití takového způsobu komunikace vyžaduje vznik dohody mezi výrobcem a dodavatelem vozidel na použití komunikačních technologií a protokolů, což se děje v rámci sdružení CAR2CAR Consortium. Komunikace je založena na standardu IEEE 802.11 [18].

Pokud se dvě či více vozidel přiblíží na dosah rádiové komunikace, automaticky se připojí do nově vytvořené ad hoc sítě, která umožňuje sdílení pozice, rychlosti a informace o směru jízdy. Každé vozidlo je zároveň routerem, který umožňuje přeposílání získaných informací vzdálenějším vozidlům. [18]

Využití V2V komunikace

Přímá komunikace mezi vozidly díky své rychlosti umožňuje využití v mnoha případech. Jedním z nich je využití v oblasti bezpečí, neboť přímá komunikace může zajistit rychlou

reakci na nečekané události na vozovce. Rossetti ve své práci [19] upozorňuje na zvyšující se množství vozidel pohybující se v dopravní síti, což přispívá výskytu nebezpečných situací. Počítač může napomoci řidiči ve zvolení vhodné strategie v nebezpečných situacích, čímž dojde ke zvýšení úrovně bezpečnosti.

Typickým příkladem využití může být kooperativní varování před kolizí. Častým důvodem pro srážku dvou za sebou jedoucích vozidel je nepozornost řidiče nebo náhlé brždění v předu jedoucího vozidla. Tento typ nehody je jedním z nejčastějších. Kooperativní varování před kolizí může asistovat řidiči za účelem vyhnouti se tomuto druhu srážek. Během jízdy mohou vozidla mezi sebou sdílet informace o poloze, rychlosti a směru pohybu. Aby mohla vozidla předpovídat riziko kolize, sledují činy řidiče a zároveň polohu všech okolních vozidel. Pokud vozidlo zaregistruje kritické hodnoty pro vznik nehody, varuje vizuálními, zvukovými nebo hmatovými signály. Vozidlo může být též vybaveno senzory pro detekci okolí za účelem kontrolovat možnost srážky s vozidly, která nejsou touto technologií vybaveny.

V některých případech může dojít k situaci, kdy je již srážka nevyhnutelná. Vozidla tento stav zjistí na základě periodické kontroly poloh všech sousedících vozidel. Ve chvíli, kdy je kolize již nevyhnutelná, dojde k rychlé výměně detailních informací mezi zúčastněnými vozidly jako přesnější poloha a velikost vozidla. Všechny informace získané navíc vozidla využijí pro optimalizaci využití bezpečnostních prvků, kterými mohou být třeba airbagy.

Pokud ke srážce již došlo, lze systém V2V komunikace využít pro varování ostatních účastníků provozu. Varovat ostatní vozidla je možné i v jiných případech, zmínit lze kluzkou silnici nebo hluboké výmoly. Pokud je vozidlo nuceno využít elektronický systém stability, vyšle ostatním vozidlům v okolí informaci o své aktuální poloze. Vozidla, která informaci obdržela, pobídnou řidiče ke změně jízdního stylu odpovídajícímu danému nebezpečí. [18]

Technická zpráva [20] zmiňuje několik scénářů se špatnou viditelností objektů, ve kterých lze spatřit výhody V2V komunikace:

- Pokud jede vozidlo za nákladním automobilem, nemůže sledovat stav na silnici před ním. Pokud některé z vozidel před nákladním automobilem z nouzových důvodů potřebuje zastavit, mohou se to včas dozvědět všichni řidiči, dochází tak ke snížení reakční doby.

- Při změně jízdních pruhů bývá problém se slepým bodem, tedy místem, nad kterým nemá řidič ani s využitím všech zrcátek dohled. Při pokusu o změnu jízdního pruhu mohou spustit vozidla v okolí komunikaci ohledně určení jejich přesné polohy. Pokud hrozí, že se jiné vozidlo nachází ve slepém bodě či do něj brzy vjede, je řidič vozidla předjíždějícího do jiného jízdního pruhu informován o nebezpečnosti svého manévru.
- Může nastat situace, kdy se řidič pokusí o nebezpečné předjetí vozidla, například autobusu či nákladního automobilu, které neumožňuje dostatečný výhled do pruhu v protisměru. Pokud jsou případná protijedoucí vozidla vybavena prostředky pro V2V komunikaci, sdělí vozidlu, které se chystá o manévr předjíždění, sdělí svou rychlost a vzdálenost. Pokud není vzdálenost dostatečná, dojde k upozornění řidiče.

2.2.6 Shrnutí získaných poznatků pro tvorbu modelu

Dle popisů jednotlivých technologií sběru dat a způsobu komunikace s vozidly lze říci, že V2V komunikace kombinující FCD a data získaná zabudovanými senzory vozidel je možno využívat pro situace napomáhající krátkodobým cílům řidiče. Díky tomuto způsobu je možno vyřešit aktuální situace související s řízením v reálném čase jako jsou předjíždění, detekce kolizí, předcházení dopravních nehod nebo jiným nenadálým událostem.

Data získaná metodou *in situ* slouží primárně pro V2I komunikaci, pro kterou se v hojné míře využívá i FCD. Využití centrálního prvku umožňuje posuzovat situaci na daleko rozsáhlejší území, než je možno dosáhnout klasickým routováním zpráv v rámci komunikace V2V z jednoho vozidla těm vzdálenějším. Centrální prvek získává informace o rychlostech, směru a pozici všech vozidel, dokáže tedy nejspolehlivěji zanalyzovat situaci v provozu, určit vytížení jednotlivých úseků komunikace a následně informovat účastníky provozu o problémech, kterým mohou čelit, pokud se například nerozhodnou změnit trasu.

V2V komunikaci se primárně využívá při potřebě sdělování informací mezi některými vozidly, v případě potřeby lze využít vzniklé ad hoc sítě pro sdílení informací i pro vzdálená vozidla pomocí routování. Aby taková síť fungovala, je potřeba vysoké hustoty vozidel pro zamezení výpadků. Pro V2V komunikaci se zdá ideální městské prostředí, zatímco V2I lze využít jednak v městském prostředí, jednak pro vyplnění mezer v silniční síti mimo městskou část. Zajímavou variantou vhodnou pro návrh modelu je i kombinace obou způsobů komunikace, kdy mohou být odstraněny nedostatky nepřiliš hustého dopravního provozu.

3 Model víceproude komunikace

Obsahem této práce je vytvoření simulačního modelu schopného věrně reprezentovat chování vozidel v dopravě pohybující se po vymezeném úseku dopravní komunikace. Pro vytvoření modelu bude využit multiagentní přístup. Jednotlivými agenty budou především vozidla, ale v závislosti na použité technologii komunikace vozidel je třeba za agenty považovat i jednotlivé prvky infrastruktury pro komunikaci typu V2I, například *in situ* detektory.

3.1 Anylogic

Anylogic je software pro tvorbu multiagentních modelů od stejnojmenné firmy. Tento nástroj umožňuje kombinaci více přístupů k modelování. Nabízí možnost vytvořit komplexní modely, které jsou zároveň velmi detailní v požadovaných oblastech.

Pro tvorbu modelu lze využít některé předdefinované knihovny firmy AnyLogic, například pro modelování silniční dopravy, železniční dopravy nebo knihovnu pro tvorbu modelu zaměřeným na chodce.

Anylogic je psán v programovacím jazyku Java a umožňuje uživateli psát vlastní funkce nebo třídy

Prvotním záměrem bylo využít pro implementaci modelu víceproude komunikace výhody plynoucí ze zabudované knihovny silničního provozu. V průběhu implementace se však tato knihovna ukázala jako nevhodná. Většinu problémů by šlo sice odstranit kombinací vlastního kódu a voláním metod knihovny, avšak knihovna neumožňovala měnit některé velmi zásadní parametry, které byly v návrhu modelu zahrnuty. Příkladem může být změna jízdního pruhu, kterou si obsluhuje knihovna interně a není možné z vnějšku přinutit vozidlo zařazení do jiného pruhu na vyžádání.

Tato práce tedy stále využívá výhod nástroje Anylogic pro tvorbu mikroskopického multiagentního modelu, zároveň ale bylo nutné rozšířit model o základní fyzikální vlastnosti vozidel, aby bylo zajištěna jeho realistické chování.

3.2 Návrh simulačního modelu

Pro vytvoření návrhu modelu je potřeba specifikovat jednotlivé prvky, které bude model obsahovat. Model reprezentuje úsek víceproude komunikace. Základem modelu je jízdní pruh,

po kterém se pohybují vozidla. Jízdní pruhy se slučují do silnice, která se stává součástí komunikační sítě. Kromě jednotlivých vozidel obsahuje model také detektory umožňující pomocí V2I komunikace ovlivňovat dopravní provoz.

Pro zjednodušení počítá model s jedním homogenním úsekem komunikace, ve kterém nedochází ke změnám pravidel silničního provozu.

3.2.1 Jízdní pruh

Základní prvek, po kterém se vozidla pohybují. Jízdní pruh vede vždy od jakéhokoliv křížení silnic k dalšímu. V případě víceproude komunikace bude moci vozidlo dle svého uvážení jízdní pruhy měnit v závislosti na aktuální dopravní situaci. Více pruhů se slučuje do silnice. Jízdní pruh je popsán základními parametry, jimiž jsou počáteční a koncový bod a směr jízdy.

Pro vyhodnocení experimentů si každý pruh zároveň uchovává informaci o aktuálních vozidlech využívající daný pruh. To umožňuje vypočítat průměrnou rychlost a hustotu provozu na daném úseku komunikace.

3.2.2 Silnice

Silnicí je myšlen shluk jednoho nebo více jízdních pruhů v daném směru. Uchovává informace o maximální povolené rychlosti a stavu jízdních pruhů.

3.2.3 Detektory

Detektory jsou myšleny nejen všechny elementy získu dat pomocí *in situ* technologií zmíněné v této práci. Jejich smyslem není nějakým způsobem ovlivňovat jízdu vozidel, ale pouze monitorovat dopravu a získané informace předávat buď centrálnímu nebo jinému prvku podílející se na V2I komunikaci.

3.2.4 Ukazatele

Stejně jako detektory se i ukazatele nacházejí v pravidelném intervalu podél vozovky. Jejich význam spočívá v předávání informací vozidlům generovaných například centrálním prvkem. Ukazatel je možné si představit jako interaktivní tabuli případně se může jednat o další z bodů V2I infrastruktury.

3.2.5 Vozidla

Vozidla budou generována na krajích silniční sítě. Při vytvoření jim bude určen jejich cíl a podle dostupných informací se rozhodne i prvotní cesta, kudy se k cíli dostane – určí si tedy i své krátkodobé cíle, které se v průběhu jízdy budou měnit. Vozidla se v rámci komunikační sítě budou pohybovat po silnicích, konkrétně v jízdnicích pruzích. Vozidlo má určité parametry, které řidič nemůže ovlivnit: jeho rozměry, maximální rychlost a maximální zrychlení.

Každé vozidlo má samozřejmě svého řidiče, který má své vlastní parametry. Jedná se o míru agresivity řidiče, která ovlivňuje osobní preference rychlosti, využití brzdné síly, míru zrychlení nebo vzdálenost od ostatních vozidel. Další parametr využitý v modelu je reakční doba řidiče.

3.3 Dopravní úsek

Model reprezentuje úsek dopravní komunikace. Daný úsek dlouhý 2.6 km je tvořen třemi jízdnicími pruhy v jednom směru a jedním pruhem v opačném směru. Je tak možné experimentovat s několika jízdnicími pruhy naráz a případně zapojit do komunikace i protijedoucí vozidla. Jízdnicí pruh je reprezentován třídou *AbstractRoadLane*. Třída *AbstractRoad* udržuje informace o úseku víceproude silnice a uchovává objekty třídy *AbstractRoadLane*.

3.3.1 AbstractRoad

Třída *AbstractRoad* popisuje úsek komunikace. Ve svém konstruktoru přijímá informace o maximální povolené rychlosti daného úseku a seznam všech jízdnicích pruhů v pořadí od krajního (pomalejšího) k vnějšimu (rychlému).

Slouží k logickému uspořádání jízdnicích pruhů. Využití této struktury lze spatřit při změně jízdnicích pruhů. Pomocí indexu lze přistupovat k jednotlivým jízdnicím pruhům. Dotazem na jízdnicí pruh s použitím vyššího indexu je možné dostat rychlejší pruh na stejném úseku, nižší index naopak zajistí získání pruhu pomalejšího. Pokud pruh s daným indexem neexistuje, vrací prázdnou hodnotu *null*.

3.3.2 AbstractRoadLane

Třída AbstractRoadLane přijímá ve svém konstruktoru následující argumenty:

- **start** – počáteční bod jízdního pruhu
- **end** – koncový bod jízdního pruhu
- **lane** – objekt třídy Path z knihovny Anylogic. Představuje cestu, po které se agent v modelu skutečně pohybuje.

Každý jízdni pruh navíc uchovává seznam vozidel, která se v daném pruhu aktuálně pohybují.

Tato funkce slouží pouze pro generování časového grafu v průběhu experimentů.

3.4 Řidič

Vozidlo představuje nejdůležitější prvek celého modelu. Je zde veškerá logika chování řidiče, jeho znalosti o světě, ve kterém se pohybuje, jeho zásady a preference chování. Veškerá tato data se zde zpracovávají a agent na ně následně reaguje provedením určitých akcí. Řidič si vybírá dlouhodobé cíle, které se snaží pomocí vhodně zvolených plánů dosáhnout.

Proces výběru vychází z architektury BDI, která je však pro potřeby modelu upravena.

Změna rychlosti vozidla je prováděna odděleně od rozhodovacího diagramu, neboť pohyb a změna rychlosti by neměla být ovlivněna procesem myšlení řidiče. Ten pouze rozhoduje, jakého zrychlení chce aktuálně dosáhnout, což si lze představit jako sešlápnutí pedálu vozidla a model následně s určitým časovým intervalem zajišťuje, že se tento signál převede na změnu rychlosti.

Konstruktore agenta přijímá 5 parametrů:

- **startNode** – počáteční bod, ve kterém agent začíná svou cestu
- **destinationNode** – cílová destinace, do které chce agent dorazit
- **speed** – počáteční rychlost
- **aggressiveness** – míra agresivity řidiče
- **reactionTime** – reakční doba řidiče

3.4.1 Cíle a plány

Cíl představuje déletrvající záměr agenta, plán pak reprezentuje způsob, jakým může řidič dosáhnout svého cíle. Agent řidiče pro každý cíl definuje vlastní stavový diagram, který pomáhá výběru následujícího plánu.

Cíl

Příkladem cíle agenta může být například cíl dorazit do určité destinace či změnit jízdní pruh. Cíl agenta rozšiřuje abstraktní třídu *Goal* zobrazenou v následující ukázce.

Každý cíl má přiřazen status, ve kterém se může nacházet: **AVAILABLE** (cíle může být vybrán), **SELECTED** (cíle vybrán, ale ještě nevyužit), **RUNNING** (probíhá), **FINISHED** (dokončen) a **UNREACHABLE** (nelze dokončit).

Cíl musí obsahovat vlastní implementaci následujících funkcí:

- *isPlanFinished* – vrací informaci, jestli byl aktuálně zvolený plán dokončen
- *isPreconditionMet* – zjišťuje, jestli je možné si zvolený cíle osvojit
- *selectPlan* – vybere nejvhodnější plán z aktuálně dostupných plánů
- *isPlanInstantaneous* – zkontroluje, zda je plán proveden okamžitě
- *executePlan* – provede činnosti spojené s aktuálně zvoleným plánem

Řidič může vybírat z následujících cílů:

GoalNavigateTo

Tento cíle slouží k řízení vozidla směrem k určenému bodu na mapě. Pokud není nadefinována trasa k cíli, řidič si ji naplánuje. V případě naplánované cesty řidič pravidelně upravuje svoji plánovanou rychlost a požadovanou akceleraci. Míra zrychlení a zpomalení je limitována vozidlem a faktorem agresivity řidiče. Jako reference pro zpomalení slouží analýza [21], která se zabývá rozdílem míry zpomalení při nouzovém zastavení u profesionálních a neprofesionálních řidičů na mokré i suché vozovce. Analýza ukázala průměrné hodnoty zpomalení profesionálních řidičů 8.4 m/s^2 v případě suché vozovky a 7.9 m/s^2 na mokré vozovce. V případě pouhého snížení rychlosti o 20 až 30 km/h bylo naměřeno průměrné zpomalení 9.5 m/s^2 na suché a 9.1 m/s^2 na mokré vozovce. Neprofesionální řidiči vykazují

velký rozptyl naměřených výsledků, průměr však vychází na 7.4 m/s^2 pro suchou a 7.0 m/s^2 na mokré vozovce.

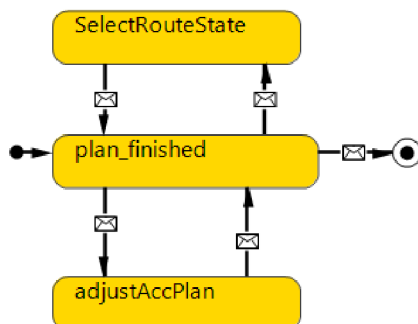
Průměrná hodnota zpomalení u komfortního zastavení neprofesionálních řidičů z rychlostí 70 až 20 km/h je přibližně 3.2 m/s^2 [21].

Výpočet maximálního zpomalení probíhá na základě následujícího vzorce:

$$a = -C * \frac{A + 1}{2}$$

C je koeficient brzdné síly. Na základě informací získaných z [21] je jeho hodnota rovna 8. Parametr A odpovídá míře agresivity řidiče. Agresivitu agentů v simulaci lze nastavit dvěma parametry. První parametr určuje střední hodnotu agresivity všech řidičů napříč jejich populací, druhý poté nastavuje rozptyl agresivity v populaci od této odchylky v rozmezí -0.5 až 0.5. Při nastavení míry agresivity od 0.7 do 1.3 se tak zpomalení vozidla může pohybovat v intervalu od v intervalu 5.6 m/s^2 až 9.2 m/s^2 .

Obrázek 5 ukazuje přechod mezi plány tohoto cíle.



Obrázek 4: Plány cíle GoalNavigateTo

GoalMoveToFasterLane

Pokud řidič dospěje k názoru, že je pro něj výhodnější přejet do rychlejšího pruhu, přijme cíl **GoalMoveToFasterLane**. Aby došlo k osvojení cíle, je potřeba splnit několik podmínek tak, jak jsou popsány v ukázce kódu číslo 3. Cíl je automaticky odmítnut, pokud nastane alespoň jedna z následujících možností:

1. Před vozidlem není žádné jiné vozidlo

2. Vozidlo se již nachází v nejrychlejšímu pruhu
3. Agent si osvojil jiný cíl, jehož výsledkem je změna jízdního pruhu
4. Rychlejší pruh je zároveň pruhem, který má být z nějaké příčiny uvolněn
5. Vozidlo potřebuje zastavit
6. Vzdálenost od začátku pruhu je menší než 10 metrů – toto pravidlo slouží pouze k optimalizaci experimentů při rozjezdu nově vygenerovaných vozidel).

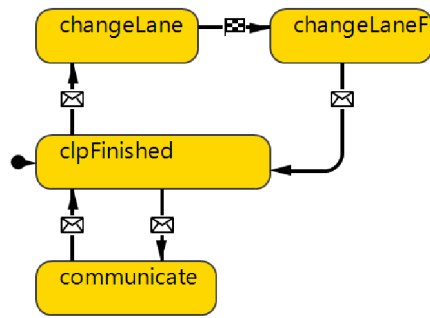
Cíl je přijat, pokud je splněno alespoň jedno z následujících pravidel:

- rozdíl rychlostí (v m/s^2) současného a čelního vozidla je menší nebo roven hodnotě ***SPEED_DIF_RATIO*** a zároveň současné vozidlo nejede svou maximální komfortní rychlostí.
- současné vozidlo nechce zastavit a čelní vozidlo stojí (ošetřena situace, kdy obě vozidla stojí)

Jakmile se řidič rozhodne předjíždět, zkontroluje situaci v rychlejšímu pruhu. Pokud situace umožňuje změnu pruhu, zahájí manévr. Pokud nemůže zahájit manévr a je k dispozici komunikační kanál, aktivuje plán ***communicate*** a pustí se do vyjednávání o uvolnění vedlejšího pruhu.

Vyjednávání o uvolnění pruhu probíhá v několika fázích. Vozidlo, které chce přejet do rychlejšího pruhu (**A**), pošle vozidlu v rychlejšímu pruhu (**B**) dotaz na jeho přesnou rychlost. Jakmile obdrží odpověď, spočítá rozdíly rychlostí a jaká je potřebná rychlost pro zařazení do rychlejšího pruhu. Vozidlo **A** pak pošle vozidlu **B** dotaz s žádostí o snížení rychlosti tak, aby bylo možné provést manévr. Vozidlo **B** pak může dotaz schválit, nebo poslat zápornou odpověď. Při kladné odpovědi vyčká vozidlo **A** na srovnání rychlostí a uvolnění pruhu, poté přejede.

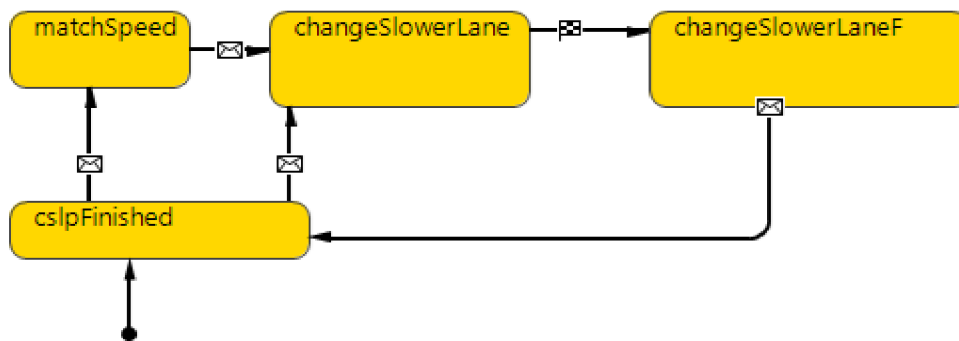
Pokud obdrží od vozidla **B** zápornou odpověď, vyžádá si od něj v další fázi informace o pozici vozidla jedoucím za ním (**C**). Vozidlo **A** pak zahájí s vozidlem **C** stejnou komunikaci. Takto může probíhat komunikace několikrát, dokud nedojde k uvolnění pruhu, nebo není od cíle přejet upuštěno.



Obrázek 5: Stavový diagram cíle GoalChangeLane

GoalMoveToSlowerLane

Cíl pro přejetí do pomalejšího pruhu je velmi podobný předchozímu cíli. Základní předpoklady přijetí cíle se nemění, liší se však provedení a výběr plánů.

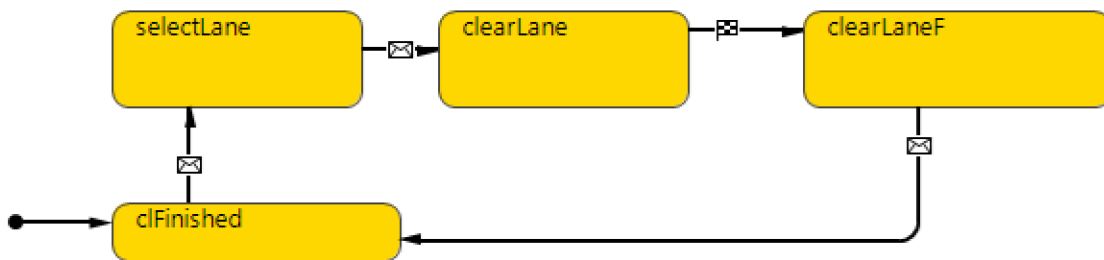


Obrázek 6: Stavový diagram cíle GoalMoveToSlowerLane

Při přijetí cíle je nejprve rozhodnuto, jestli je možné okamžitě změnit jízdní pruh, nebo je potřeba přizpůsobit svou rychlost pro zařazení. Tento plán využívá toho, že vozidlo z pomalejšího pruhu nemůže podjíždět vozidla z rychlejšího pruhu a podle toho upravuje svou rychlost. Jakmile dojde ke srovnání rychlostí, zahájí se manévr pro předjíždění.

GoalClearLane

Tento cíl je přijat, pokud je požadováno uvolnění aktuálního jízdního pruhu některou z nadřazených entit. Tou může být vozidlo s přednostním právem jízdy nebo centrální jednotka předávající informace prostřednictvím ukazatele. V režii tohoto cíle není samostatná změna pruhu, pouze je rozhodnuto, zda je vhodnější přejet do rychlejšího nebo pomalejšího pruhu, pokud jsou tyto možnosti dostupné. Jakmile je vybrán nový jízdní pruh, postará se o samotné předjíždění jeden z cílů *GoalMoveToFasterLane* nebo *GoalMoveToSlowerLane*.



Obrázek 7: Stavový diagram cíle GoalClearLane

GoalSuddenStop

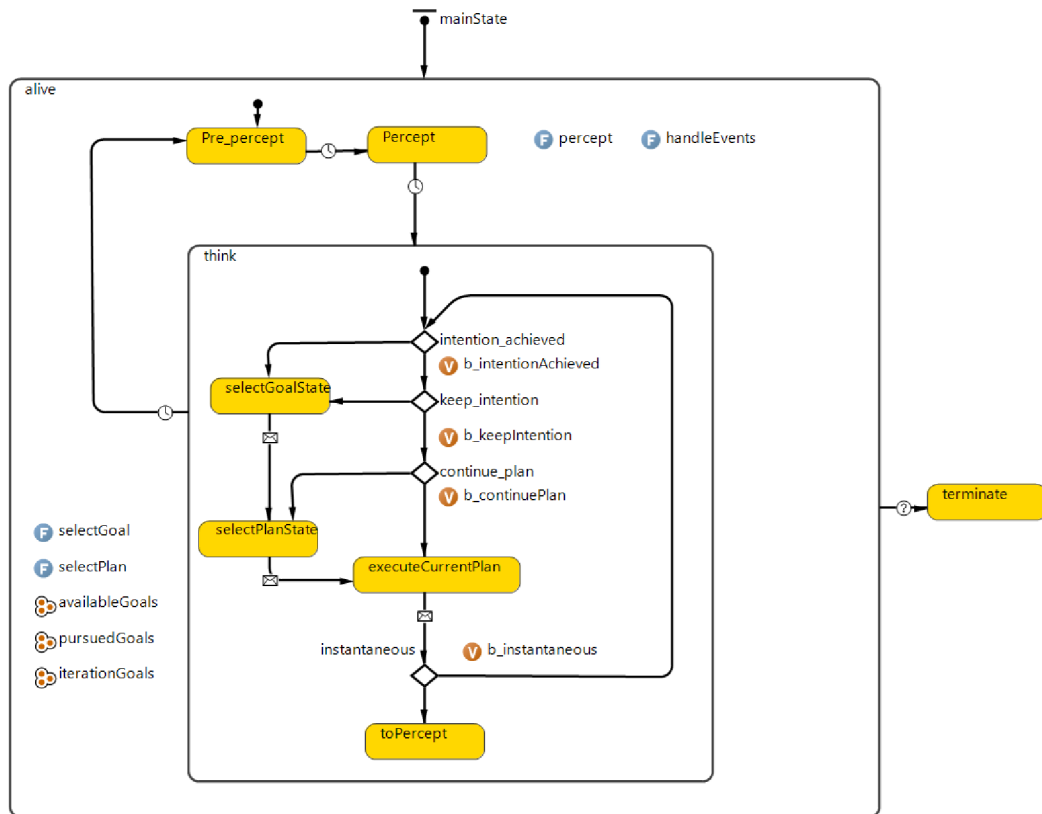
Cíl vytvořen pro účel experimentů. Představuje situaci, kdy se vozidlo stane nepojízdným. Řidič je donucen zastavit vozidlo za využití maximální brzdné síly. Přepíná se pomocí boolean proměnné **needToStop** a je nadřazený ostatním cílům.

3.4.2 Životní cyklus

Životní cyklus agenta řidiče lze rozdělit do dvou stavů – *alive* a *terminate*. Stav *alive* je primární stav agenta, ve kterém zůstane do doby, než je vyvoláno jeho ukončení a smazání. V tomto stavu probíhá v cyklu myšlení řidiče za pomoci architektury BDI.

Cyklus je rozdělen do tří částí: *pre_percept* a *percept* a *think*.

Anylogic je nastaven tak, aby část funkcí vytvořených agentů řadil to fronty a volal je až ve chvíli, kdy není žádná vnitřní část agenta využívána. Z toho důvodu jsou přechody mezi těmito stavy na okamžik pozastavené. Konkrétně trvá 2 ms přechod mezi *think* a *pre_percept*, 15 ms mezi *pre_percept* a *percept* a 15 ms mezi *percept* a *think*. Tyto hodnoty se ukázaly jako dostačující, aby mohl AnyLogic zavolat veškeré potřebné funkce. Zároveň to snižuje výpočetní náročnost modelu. Schéma životního cyklu je vyobrazeno na obrázku číslo 8.



Obrázek 8: Životní cyklus agenta

Pre_percept

V tomto stavu probíhá vytvoření spojů mezi agenty. Je nalezeno čelní vozidlo i vozidlo v pořadí za aktuálním vozidlem. Stejně tak jsou nalezena sousední vozidla v rychlejším pruhu. K spojení je využit objekt knihovny Anylogic *LinkToAgentCollection*. Připojení vozidel skrze tento objekt trvá určitý simulační čas, 15 ms se ukázalo jako dostačující čas, aby byly agenti úspěšně připojení.

Percept

Agent ve stavu *percept* postupně zkontroluje vnější prostředí a aktualizuje své vědomosti, které o tomto prostředí uchovává. Stejným způsobem také zkontroluje svá vlastní data a pokud někde nastane výrazná změna, je o tom agent informován, takže v procesu přemýšlení zařadí tyto nové skutečnosti do rozhodování.

Probíhá zde také zpracování událostí pracující s reakční dobou řidiče.

Think

Think reprezentuje pro stav agenta, ve kterém probíhá myšlení řidiče. V této části je také použita již dříve zmíněna architektura BDI a je tedy nezbytné popsat základní strukturu této architektury.

Agent spravuje celkem tři zásobníky: *availableGoals* (dostupné cíle, z kterých agent vybírá), *pursuedGoals* (cíle, kterých chce agent dosáhnout) a *iterationGoals* (cíle, na kterých v daném cyklu agent pracuje).

Při vytvoření agenta jsou do zásobníku *availableGoals* přidány dostupné cíle popsané v předchozí kapitole. Agent může v jednu chvíli následovat více cílů, pokud spolu navzájem nekolidují. Během každé iterace přemýšlení je zavoláno provedení plánu pro každý z přijatých cílů. Některé plány mohou být okamžité, v takovém případě je možné ve stavu přemýšlení zůstat delší dobu a proces zopakovat. Jakmile jsou všechny plány provedeny, opustí se proces přemýšlení.

3.4.3 Reakční doba

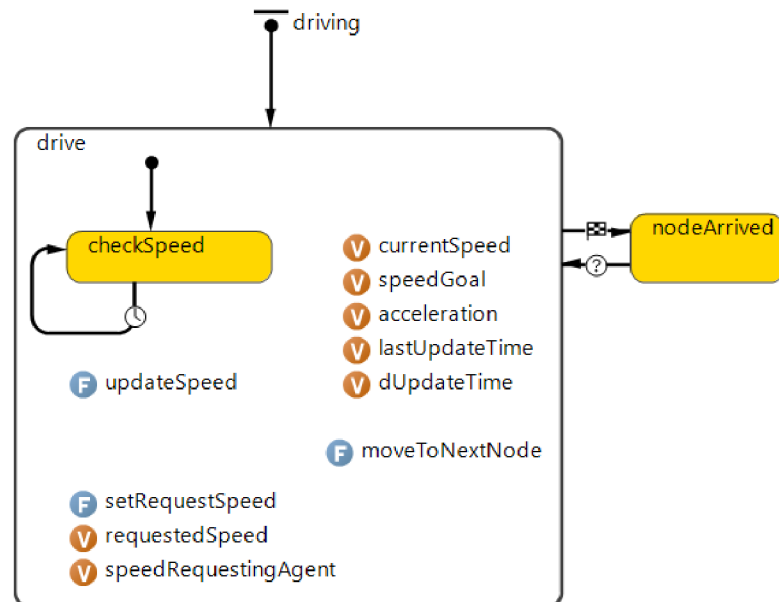
Model dokáže simulovat reakční dobu řidiče. Události jsou předávány formou objektu třídy *PerceptionEvent*. Kdykoliv nastane změna sledované veličiny, uloží se nový objekt do stromové struktury *TreeMap*. Klíčem je aktuální čas detekce nové informace.

Při každém průchodu stavem percept jsou kontrolovány informace, které je řidič schopen ze svého okolí vypořadovat. Pokud se jedná o informaci, pro kterou je typická určitá doba, není informace uložena napřímo, ale ukládá se stromové struktury. Agent má nastavitelnou reakční dobu, po kterou jsou informace ve stromové struktuře uchovány. Při vypršení reakční doby jsou pak informace uloženy pro zpracování řidičem.

3.4.4 Změna rychlosti

Změna rychlostí probíhá samostatně v rámci stavového diagramu *driving*, kdy v pravidelném intervalu 10 ms dochází k přepočítání rychlostí. Výpočet pracuje s informacemi získaných od řidiče uložených v proměnných *speedGoal* (požadovaná rychlost) a *acceleration* (zrychlení). Pro výpočet je použit vzorec $v = u + at$. Pokud by měla rychlost přesáhnout práh požadované rychlosti, nová rychlost bude odpovídat tomuto limitu.

Rozjezd stojícího vozidla vyžaduje v rámci použitého programu Anylogic zavolání funkce *moveTo* nebo *moveToStraight*, které přijímají v parametru bod, do kterého má agent zamířit. Simulace využívá obě funkce v různých situacích – *moveToStraight* je použito při přejíždění z jednoho pruhu do druhého. Byla implementována funkce *moveToNextNode*, která mezi různými situacemi rozlišuje.



Obrázek 9: Cyklus změny rychlosti

Stavový diagram *driving* zároveň reaguje na situaci, kdy agent dorazí do cílového bodu. Tato situace není pro řidiče relevantní, dochází zde ke změnám na úrovni agenta a vnitřní logiky programu Anylogic. Řidič již o své cestě rozhodl a ví, kterým směrem se z daného bodu vydá dále. Je tedy potřeba zajistit plynulý rozjezd agenta do dalšího bodu, aniž by byl narušen cyklus přemýšlení řidiče.

K přechodu do stavu *nodeArrived* je využit spouštěč *Agent arrival*. Vstupní funkce do stavu *nodeArrived* obstará logiku přechodu agenta na další cestu a stav je okamžitě přepnut zpět do *drive*.

3.4.5 Komunikace

Pro komunikaci v rámci V2V a V2I slouží třídy rozšiřující generickou abstraktní třídu *Message*. Každý objekt těchto tříd uchovává informace o zaslaných datech, odesílateli a

žádosti o odpověď. Zároveň musí každá třída obsahovat implementaci abstraktní funkce *handleMessage*, kde probíhá zpracování poslané zprávy.

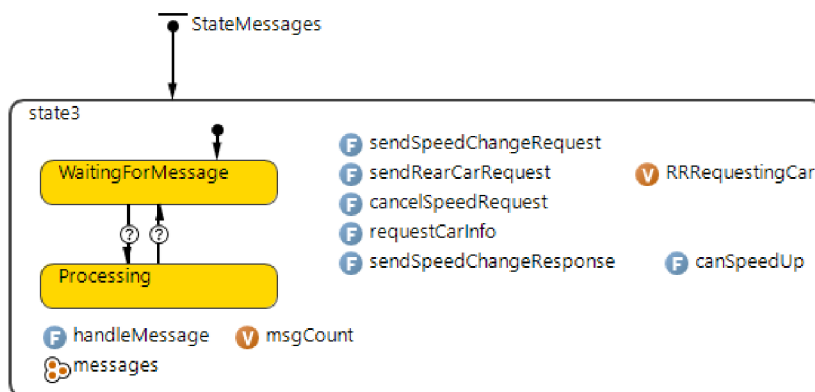
Pro V2V komunikaci jsou použity následující třídy:

- **MrearCarRequest** – dotaz na další vozidlo v pořadí
- **MrearCarResponse** – odpověď s odkazem na další vozidlo v pořadí
- **McarInfoRequest** – dotaz na aktuální informace o stavu jízdy daného vozidla
- **McarInfoResponse** – odpověď obsahující informace o stavu jízdy vozidla

Následující zprávy lze využít jak pro V2I, tak pro V2V komunikaci:

- **MspeedChangeRequest** – žádost o změnu rychlosti
- **MspeedChangeResponse** – odpověď na změnu rychlosti
- **MlaneWarning** – upozornění na nenadálou situaci

Pro příjem a zpracování zpráv na straně řidiče slouží stavový diagram *StateMessages* pracující s kolekcí *messages*. Dokud je kolekce prázdná, nachází se agent ve stavu *WaitingForMessage*. Po přijetí je přepnut do stavu *Processing*, kde jsou zprávy zpracovány.



Obrázek 10: Zpracování zpráv

3.5 RoadObserver

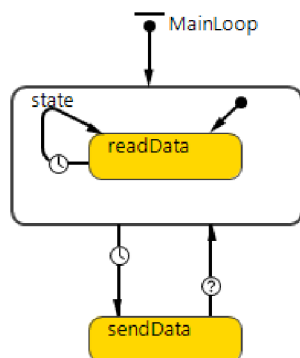
Detektory na místě používají různé způsoby měření, ale výstup mají velmi podobný. Je tedy možné zahrnout možnosti detekce na místě v rámci jednoho agenta s názvem *RoadObserver*.

Agent získává data od každého projíždějící vozidla bez nutnosti navázání komunikace. Pro tento účel pravidelně kontroluje nejbližší úsek komunikace a detekuje každé nové vozidlo,

keré se v daném úseku objeví. *RoadObserver* pak získá základní informace – rychlost vozidel a jízdní pruh, ve kterém se vozidlo nachází.

K uchování informace slouží třída *RoadObserverData*. Při detekci vozidla ve svém dosahu je vytvořen nový objekt a přidán do kolekce dat.

V pravidelném intervalu 2 vteřin pak detektor vyfiltruje údaje za poslední minutu a pošle centrálnímu prvku průměrnou rychlost a celkový počet vozidel v jízdních pruzích.



Obrázek 11: Schéma chování detektoru

Druhou, volitelnou, funkcí detektoru je přijímání zpráv posílaných vozidly a předání této zprávy centrálnímu prvku k dalšímu zpracování. Funkci je potřeba povolit před začátkem simulace. Přijímání zpráv nachází využití při experimentech s V2I komunikací.

3.6 RoadTrasmitter

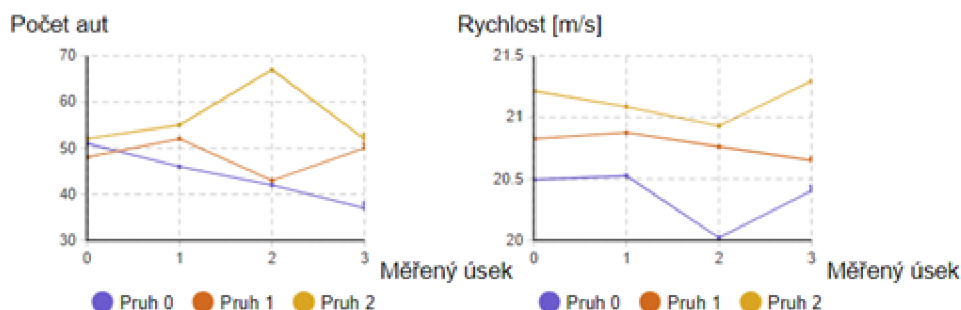
RoadTrasmitter je prvek umístěný na mapě umožňující jednosměrnou komunikaci směrem k vozidlu, s projíždějícími vozidly navazuje spojení pomocí linku *connections*, což je připravená funkcionalita v programu AnyLogic na propojení jednotlivých agentů. Dosah tohoto vysílače je určen parametrem při spouštění simulace.

Vysílač získává zprávy z připojeného centrálního prvku a ty pak předává vozidlům. V rámci modelu se jedná o předání zprávy *MlaneWarning* upozorňující na problém na vozovce.

3.7 CentralUnit

Centrální prvek dostávající informace od menších vysílačů rozptýlených po celém simulačním prostředí. Má přehled o veškeré situaci na mapě a na požádání může uvést průměrnou rychlost v daných úsecích.

Graf číslo 1 ukazuje zpracované informace o provozu. Vlevo se nachází průjezdnost vozidel za poslední minutu v jednotlivých pruzích, pravý graf pak průměrnou rychlost za poslední minutu v jízdních pruzích.

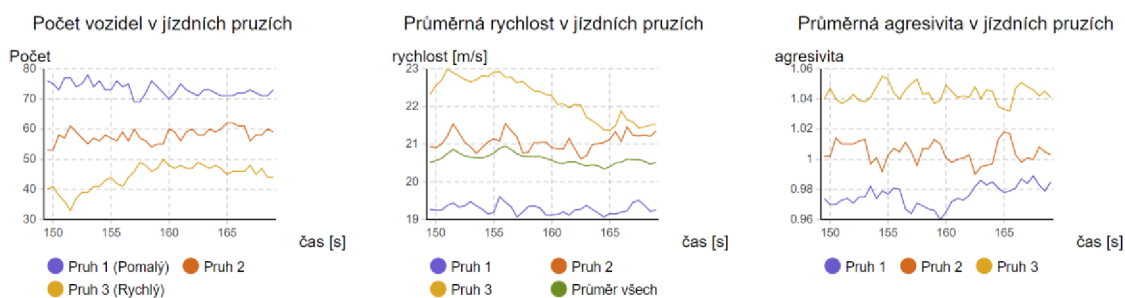


Graf 1: Informace o provozu

Centrální prvek taktéž slouží pro zpracování zprávy varující o problému na vozovce a tuto zprávu může předat instancím *RoadTransmitter* pro další šíření. f

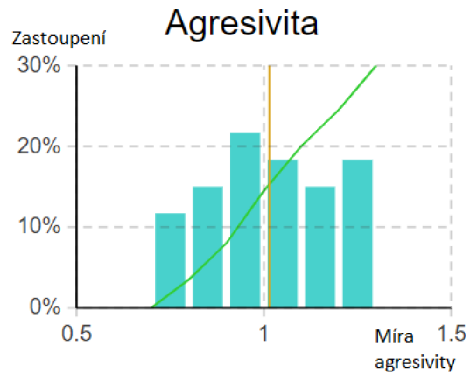
3.8 Statistiky

Kromě statistik získaných v rámci simulace pomocí detektorů a zasílaných centrálnímu prvku jsou zobrazovány ještě statistiky na úrovni modelu samotného. Je tak možné sledovat průměrné rychlosti v jízdních pruzích a vliv agresivity na vybraný jízdní pruh. Tyto údaje taktéž mohou sloužit pro kontrolu údajů v centrální jednotce.



Graf 2: Sledované globální údaje v simulaci

Další sledovaný údaj je rozložení agresivity napříč populací řidičů. Na grafu 3 je vidět rozložení agresivity se střední hodnotou 1 a maximální odchylkou 0.27



Graf 3: Rozdělení agresivity napříč populací

3.9 Ověření funkčnosti modelu

Jak již bylo v této kapitole řečeno, při implementaci modelu nebylo možné využít integrovanou knihovnu pro silniční dopravu, základní chování řidiče a vozidla tak bylo implementováno spolu s tvorbou modelu. Aby bylo možné ověřit a případně doladit správné chování vozidel, byly vytvořeny testovací scénáře, které sloužily ke kontinuálnímu testování jednotlivých parametrů modelu. Tyto testovací scénáře nejsou součástí experimentů a jejich vyhodnocení. Pomáhají však odhalit mnohé nelogické akce řidiče.

3.9.1 Náhlé zastavení vedoucího vozidla

Scénář vychází ze situace, kdy se po dvoupruhové komunikaci pohybují 4 vozidla, vždy po dvou v jednom pruhu. Vedoucí vozidlo v pomalejším pruhu je nuceno zastavit za využití plné brzdné síly. Je sledována rychlost reakce vozidel a schopnost druhého vozidla v pomalém pruhu zařadit se do pruhu rychlejšího.

3.9.2 Plynulost dopravy ve třech pruzích

Předmětem zkoumání je ověření plynulosti úseku třípruhové komunikace. Jsou generována vozidla v pravidelném intervalu na všech třech jízdnicích pruzích s náhodně zvolenou agresivitou, která způsobuje, že se v populaci agentů náhodně vyskytují jedinci přejíždějící do rychlejších pruhů.

4 Experimenty

Na vytvořeném modelu byly následně provedeny simulace šíření zprávy za využití V2V, případně V2I komunikace. Model umožňuje libovolně nastavit vzdálenost a zpoždění během komunikace. Pro experimenty byly simulovány tři technologie s následujícími parametry:

- Bluetooth (dosah 15 metrů, zpoždění 200 ms) [22]
- Bluetooth (dosah 60 metrů, zpoždění 200 ms)
- Wi-Fi (dosah 90 metrů, zpoždění 200ms)

Vzhledem k rozdílnému dosahu těchto technologií v reálném provozu je vhodné provést experimenty vůči různým hodnotám zatížení dálniční sítě. Nejprve byly pro testování použity následující parametry na základě údajů publikovaných v [23] :

- Průměrné vytížení – 60 aut za minutu
- Vysoké vytížení – 120 aut za minutu
- Maximální vytížení – 180 aut za minutu

Při testování dosahu 90 metrů patrný dopad změny zatížení komunikace na maximální dosah vygenerované zprávy, proto byly porovnávány hodnoty nižšího vytížení komunikace:

- 20 aut za minutu
- 40 aut za minutu
- 60 aut za minutu

Každá technologie byla vyzkoušena v několika scénářích zaměřených na různé způsoby šíření zprávy: s využitím bufferu, protijedoucího vozidla, V2I komunikace a kombinací těchto metod dohromady. Průběh simulace je vždy stejný. Po spuštění simulace dochází k přidávání vozidel do dálniční sítě.

Aby došlo k zaplnění celého úseku komunikace, model nejprve běží 100 vteřin před zahájením jednotlivých experimentů. Experimenty běžely s nastavením průměrné hodnoty agrese na 1 s maximální odchylkou 20 % oběma směry.

4.1 Šíření zprávy s upozorněním

V tomto experimentu dojde k vygenerování zprávy vozidlem nacházejícím se přibližně ve třech čtvrtinách sledovaného úseku. Zpráva se za využití V2V a případně i V2I komunikace šíří napříč celým úsekem.

V tomto experimentu je pozorována rychlost šíření zprávy, dosah šíření zprávy a taktéž poměr vozidel, které zprávu obdržely, oproti velikosti populace.

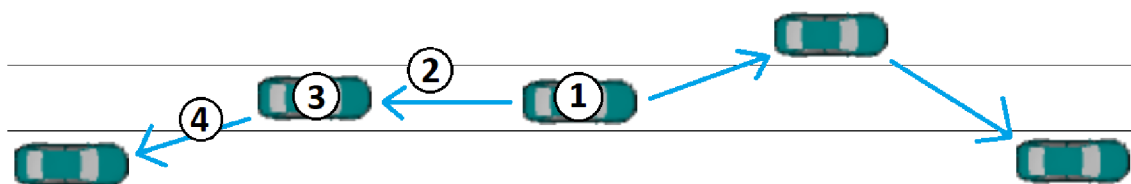


Schéma 1: Princip šíření zprávy

Šíření zprávy je znázorněno ve schématu 1. Nejprve je zpráva vygenerována (bod 1), následně je zpráva poslána všem vozidlům v dosahu (bod 2). Šíření zprávy mezi vozidly probíhá s nastaveným zpožděním. Příjemce zprávu obdrží (bod 3) a přepoše ji dalším vozidlům ve svém dosahu (bod 4).

Výstupem experimentu jsou tyto hodnoty:

- Maximální vzdálenost a čas dopředného šíření zprávy,
- Maximální vzdálenost a čas zpětného šíření zprávy
- Celkový počet vozidel v simulaci
- Počet informovaných vozidel, která obdržela zprávu
- Poměr informovaných vozidel oproti celkovému počtu vozidel v simulaci

V průběhu simulace některé vozy opouští simulaci a jiné se přidávají, nelze tedy dosáhnout 100% rozšíření zprávy. Hodnoty nad 95 % jsou považovány za plné rozšíření.

Dosah 15 metrů

První test simuloval Bluetooth 4.0 s hodnotami naměřenými v [22]. Tabulka číslo 1 ukazuje výsledky měření v závislosti na intenzitě provozu. Ukázalo se, že dosah 15 metrů není pro základní šíření zprávy vyhovující. Simulace nižších hodnot provozu ukázala poměr informovaných vozidel 3 procenta. Zprávu se povedlo odeslat pouze nejbližší vozidlům,

k dalšímu přeskočení zprávy už důsledkem větší vzdálenosti mezi vozidly nedošlo. Při simulaci nejvyšší špičky provozu se povedlo informovat pouhých 7 % všech vozidel na simulovaném úseku, došlo pouze ke dvěma přeskokům od původního zdroje.

Bluetooth (15 m, 200 ms)	60 aut/hod	120 aut/hod	180 aut/hod
Max. dopředná vzdálenost [m]	9,76	37,351	49,584
Max. dopředný čas [ms]	213,735	411,322	625,47
Max. zpětná vzdálenost [m]	7,968	1,254	65,671
Max. zpětný čas [ms]	207,585	209,373	2265
Vozidel v simulaci	103	160	266
Obdrželo zprávu	3	5	19
Poměr informovaných vozidel	0,03	0,03	0,07

Tabulka 1: Výsledky měření

Graf číslo 4 ukazuje trend, jakým postupovala zpráva v čase. Je zde patrná snížená rychlost zpětného šíření, která je dána kombinací nízkého dosahu, vysoké rychlosti vozidel a latence při přenosu informace. Zpráva se sice šířila lépe, ale hraničních 66 metrů opačným směrem od zdroje bylo dosaženo po 2.2 vteřinách, v porovnání s 50 metry za 0.65 vteřiny dopředným směrem tak došlo ke zpoždění přenosu zprávy o více jak 60 %.



Graf 4: Porovnání zpětného a dopředného šíření pro dosah 15 m a zatížení 180 aut/min

Dosah 60 metrů

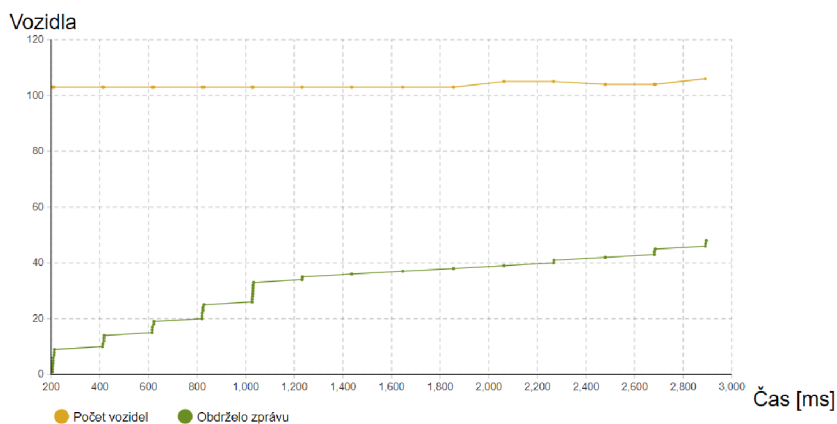
Další měření se změnou dosahu signálu na 60 metrů lépe ukázalo závislost šíření signálu na hustotě dopravy. Jak ukazuje tabulka 2, při průjezdu 60 vozidel za minutu se zpráva rozšířila mezi téměř polovinu všech účastníků hovoru, což dokazuje i graf 5, který znázorňuje poměr vozidel s přijatou zprávou v populaci v čase.

Bluetooth (60 m, 200 ms)	60 aut/hod	120 aut/hod	180 aut/hod
Max. dopředná vzdálenost [m]	232,73	1032	1283
Max. dopředný čas [ms]	1033	4119	4758
Max. zpětná vzdálenost [m]	555	1147	1005
Max. zpětný čas [ms]	2891	5359	4112
Vozidel v simulaci	106	166	267
Obdrželo zprávu	48	162	260
Poměr informovaných vozidel	0,45	0,98	0,97

Tabulka 2: Naměřené hodnoty

Z tabulky 2 je taktéž patrné, že hustota provozu 120 aut za minutu je dostačující pro rozšíření zprávy napříč celou populací. Zvýšení hustoty vozidel na 180 aut za minutu už tedy nepřineslo v měřené situaci žádné zlepšení co se týče poměru rozšíření zprávy. Pokud jsou porovnány vzdálenosti a časem šíření, je patrný vztah k hustotě dopravy. Při průjezdu 60 aut za minutu je rychlost dopředného šíření 218 m/s, u 180 aut za minutu odpovídá tato hodnota 270 m/s. Zpětné šíření udává rychlost 192 a 244 m/s pro hustoty 60, respektive 180 aut za minutu.

Graf 5 taktéž ukazuje, že nejvyšší rychlosti šíření bylo dosaženo v první třetině rychlosti měřeného intervalu. Prvních 35 % vozidel bylo informováno během vteřiny, dalších 10 procent pak v průběhu dalších 2 vteřin.



Graf 5: Vývoj poměru inf. vozidel při dosahu 60 m a hustotě dopravy 60 aut/min

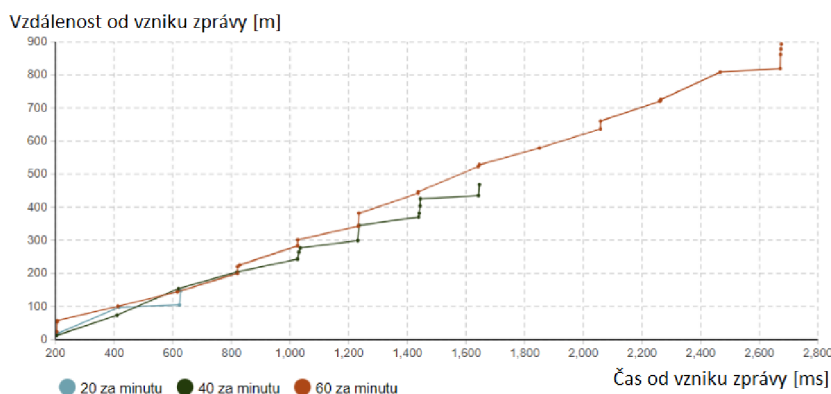
Dosah 90 metrů

Jak již bylo zmíněno v zadání experimentu, prvotní testy ukázaly maximální rozšíření zprávy při hustotě dopravy vyšší než 60 aut za minutu, proto byl tento vstupní parametr pro potřeby testu snížen. Testovány tak byly hodnoty 20, 40 a 60 vozidel za minutu, výsledky jsou zapsány v tabulce 3.

Wi-Fi (90 m, 200 ms)	20 aut/hod	40 aut/hod	60 aut/hod
Max. dopředná vzdálenost [m]	169,935	351,991	1151,04
Max. dopředný čas [ms]	416,54	820,615	3103,387
Max. zpětná vzdálenost [m]	147,25	468,379	943,655
Max. zpětný čas [ms]	627,857	1645,964	3083,624
Vozidel v simulaci	46	70	107
Obdrželo zprávu	8	35	102
Poměr informovaných vozidel	0,17	0,5	0,95

Tabulka 3: Naměřené hodnoty

Naměřené hodnoty ukázaly nedostatky v dosahu u nastavené intenzity 20 a 40 aut za minutu. Tyto výsledky byly vyhodnoceny jako ideální pro následné testy způsobů zlepšení šíření zpráv. Graf 6 nabízí srovnání zpětného šíření zprávy u různých hodnot hustoty dopravy. Kromě zvýšeného dosahu přenosu zprávy přináší vyšší hustota dopravy i mírné zrychlení šíření zprávy (282 m/s při nejnižší hustotě dopravy oproti 371 m/s při hustotě nejvyšší).



Graf 6: Srovnání zpětného šíření zprávy pro různé hustoty dopravy

4.2 Zlepšení komunikace

Cílem tohoto experimentu je ověřit možnosti zvýšení dosahu komunikace, a tedy je potřeba vybrat taková nastavení z předchozího experimentu, u kterých lze dosáhnout zlepšení.

K testování tedy budou použity následující parametry:

- Dosah 15 metrů, zpoždění 200 ms, intenzita 180 aut za minutu
- Dosah 60 metrů, zpoždění 200 ms, intenzita 60 aut za minutu
- Dosah 90 metrů, zpoždění 200 ms, intenzita 20 aut za minutu
- Dosah 90 metrů, zpoždění 200 ms, intenzita 40 aut za minutu

Nabízí se tyto tři možnosti zlepšení a jejich případné kombinace:

- Přidání bufferu pro uložení zprávy
- Přidání komunikace s protijedoucím vozidlem
- Přidání VI2 komunikace prostřednictvím detektorů a vysílačů

Přidání bufferu

Vozidlům byl přidán buffer, který po určitou dobu uchovává přijetou zprávu, kterou pak v pravidelném intervalu po určitou dobu odesílá. Myšlenka vychází ze skutečnosti, že se vozidla pohybují ve sledovaném úseku různorodou rychlostí. Vozidlo tak může obdržet zprávu a v závislosti na své rychlosti buď dohnat vedoucí vozidla nebo naopak počkat, než ho rychleji jedoucí vozidla doženou. Těmto vozidlům pak může se zpožděním předat zprávu a případně tím způsobit další řetězení.

Souhrn výsledků testů lze nalézt v tabulce 4. Pro každé nastavení byl proveden opakovaný test s jiným generátorem náhodných hodnot. Data pak byla zprůměrována a zapsána do tabulky. Testy potvrdily zlepšení v poměru oslovených vozidel. Maximální doba přesunu zprávy se navýšila, což koresponduje s delší prodlevou přenosu.

(15 m, 200 ms, 180 aut/min) – 25x	Základ	S Bufferem
Max. dopředná vzdálenost [m]	178,27	372,57
Max. dopředný čas [ms]	2411,566	5977,875
Max. zpětná vzdálenost [m]	113,515	123,871
Max. zpětný čas [ms]	3306,662	5659,027
Poměr informovaných vozidel	0,161	0,244

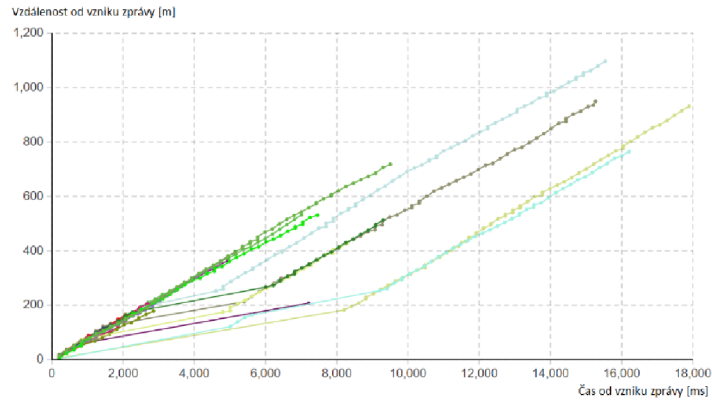
(60 m, 200 ms, 60 aut/min) – 30x	Základ	S Bufferem
Max. dopředná vzdálenost [m]	419,23	407,853
Max. dopředný čas [ms]	1740,456	1904,695
Max. zpětná vzdálenost [m]	322,319	537,663
Max. zpětný čas [ms]	1684,526	6406,006
Poměr informovaných vozidel	0,391	0,52

(90 m, 200 ms, 40 aut/min) – 40x	Základ	S Bufferem
Max. dopředná vzdálenost [m]	338,621	314,605
Max. dopředný čas [ms]	954,664	1086,297
Max. zpětná vzdálenost [m]	334,622	412,771
Max. zpětný čas [ms]	1145,401	2197,867
Poměr informovaných vozidel	0,407	0,412

(90 m, 200 ms, 20 aut/min) – 40x	Základ	S Bufferem
Max. dopředná vzdálenost [m]	92,072	149,602
Max. dopředný čas [ms]	316,184	1404,159
Max. zpětná vzdálenost [m]	88,574	128,01
Max. zpětný čas [ms]	326,593	825,484
Poměr informovaných vozidel	0,154	0,226

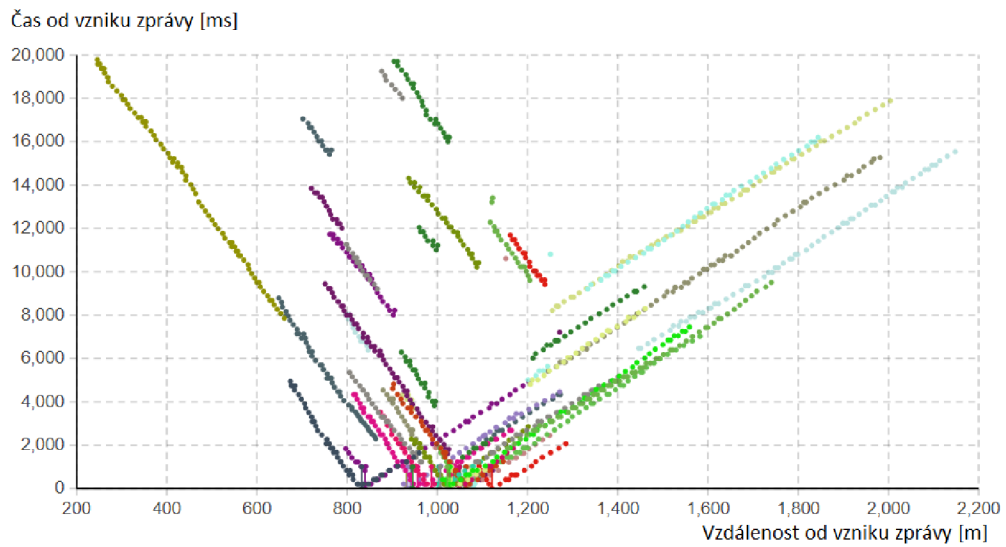
Tabulka 4: Srovnání základního šíření s bufferem

Šíření přenosu zřetelně popisuje graf číslo 7. Lineární spojnice vycházející z počátku souřadnicového systému představují přímou komunikaci bez využití bufferu. Posuny těchto spojnic po ose X pak ukazují využití bufferu. Vzdálenost přenosu zprávy narostla pouze o ujetou vzdálenost vozidla, zároveň však došlo k řetězení dalšího přenosu zprávy.



Graf 7: Dopředné šíření s aktivním bufferem – dosah 15 m, hustota 180 aut/min

Na grafu 8 lze spatřit šíření zprávy oběma směry. Osa X vzdálenost od počátku měřeného úseku, osa Y představuje čas v ms, při kterém byla zpráva zaznamenána dalším vozidlem. Každé přijetí zprávy je v tomto grafu znázorněno jedním bodem. Jednotlivé barvy pak značí iterace proběhlé simulace. Posuny spojnic po ose Y prozrazují použití bufferu.



Graf 8: Šíření s aktivním bufferem – dosah 15 m, hustota 80 aut/min

Protijedoucí vozidlo

(15 m, 200 ms, 180 aut/min) – 20x	Základ	S Protijedoucím vozidlem
Max. dopředná vzdálenost [m]	178,27	300,26
Max. dopředný čas [ms]	2411,566	4063
Max. zpětná vzdálenost [m]	113,515	66,11
Max. zpětný čas [ms]	3306,662	1938,267
Poměr informovaných vozidel	0,161	0,165
(60 m, 200 ms, 60 aut/min) – 25x	Základ	S Protijedoucím vozidlem
Max. dopředná vzdálenost [m]	449,25	494,957
Max. dopředný čas [ms]	1847,125	2011,951
Max. zpětná vzdálenost [m]	318,965	326,482
Max. zpětný čas [ms]	1608,854	1638,355
Poměr informovaných vozidel	0,423	0,434
(90 m, 200 ms, 40 aut/min) – 30x	Základ	S Protijedoucím vozidlem
Max. dopředná vzdálenost [m]	366,365	367,738
Max. dopředný čas [ms]	1052,082	1040
Max. zpětná vzdálenost [m]	288,486	426,28
Max. zpětný čas [ms]	950,702	1423,064
Poměr informovaných vozidel	0,375	0,437
(90 m, 200 ms, 20 aut/min) – 30x	Základ	S Protijedoucím vozidlem
Max. dopředná vzdálenost [m]	100,879	120,078
Max. dopředný čas [ms]	330,771	400,488
Max. zpětná vzdálenost [m]	73,778	107,4
Max. zpětný čas [ms]	262,393	387,048
Poměr informovaných vozidel	0,15	0,184

Tabulka 5: Srovnání komunikace s protijedoucím vozidlem

Experiment předpokládá přidání protijedoucích vozidel do probíhající komunikace. Bez využití bufferu se tato vozidla chovají spíše jako kdyby byl přidán další pruh do komunikace. Očekávalo se jen nepatrné zlepšení, neboť experiment nijak nezlepšuje techniku komunikace, jen přidává další prostředky a případné přechodné prvky. Tento předpoklad lze potvrdit při pohledu na tabulku 5, kde jsou průměrné hodnoty z proběhlých simulací. Odchylka rychlosti šíření je ve většině případů 0 až 1 %.

Protijedoucí vozidlo s bufferem

Dva předchozí testy ukázaly dva způsoby, jak zlepšit dosah přenášené zprávy. Tento test má za cíl ověřit dopad jejich kombinace. Popis tohoto způsobu komunikace je vyobrazen na schématu 2. Zpráva je po vygenerování (1) poslána protijedoucímu vozidlu (2). Vozidlo si zprávu uchová a pokračuje ve své cestě (3). V určitý moment se protijedoucí vozidlo dostane

do komunikační vzdálenosti s vozidlem v měřeném úseku (4). Pokud má protijedoucí vozidlo stále uloženou zprávu, předá ji všem vozidlům, která kolem něj projedou (5).

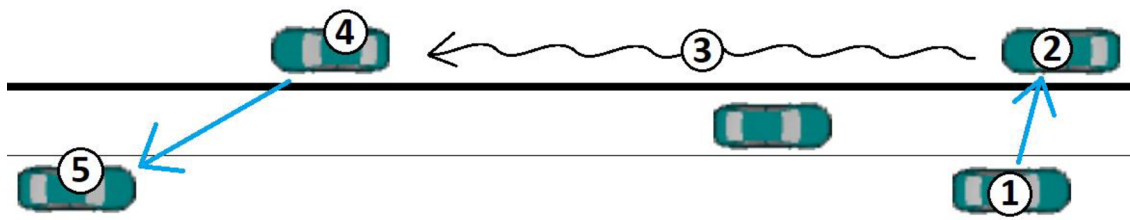


Schéma 2: Princip komunikace s protijedoucím vozidlem za využití bufferu

Tento experiment ukázal dosud nejlepší zlepšení, co se poměru informovaných vozidel týče. Byly vyzkoušeny dvě doby uložení zprávy ve vozidle – 3 a 10 vteřin. Byla vyzkoušena i vyšší doba, ale testy ukázaly, že další zvyšování nemá na navržený model téměř žádný stav, simulace se dostane brzy do stavu, kdy je zpráva uložena napříč celou populací a okamžitě předávána novým vozidlům, jakmile se na kraji pozorovaného úseku objeví. Tyto hodnoty lze vyčíst z tabulky 6. Buffer s nižší dobou uchování zprávy ukazuje, že nejdůležitějším parametrem je zde hustota dopravy. Jedině tak je zajištěno, že se zpráva stihne předat protijedoucímu vozidlu včas.

(15 m, 200 ms, 180 aut/min) – 20x	Proti + BUFF (3 s)	Proti + BUFF (10 s)
Max. dopředná vzdálenost [m]	1499,841	1468,14
Max. zpětná vzdálenost [m]	1018,419	1036,233
Poměr informovaných vozidel	0,996	0,996
(60 m, 200 ms, 60 aut/min) – 25x	Proti + BUFF (3 s)	Proti + BUFF (10 s)
Max. dopředná vzdálenost [m]	1371,108	1010,549
Max. zpětná vzdálenost [m]	1042,877	1032,424
Poměr informovaných vozidel	0,959	0,927
(90 m, 200 ms, 40 aut/min) – 30x	Proti + BUFF (3 s)	Proti + BUFF (10 s)
Max. dopředná vzdálenost [m]	1297,355	1436,413
Max. zpětná vzdálenost [m]	1084,772	1104,371
Poměr informovaných vozidel	0,962	0,986
(90 m, 200 ms, 20 aut/min) – 30x	Proti + BUFF (3 s)	Proti + BUFF (10 s)
Max. dopředná vzdálenost [m]	778,758	1131,131
Max. zpětná vzdálenost [m]	846,857	992,0646
Poměr informovaných vozidel	0,761	0,873

Tabulka 6: Porovnání šíření zpráv za využití protijedoucího vozidla a bufferu

VI2 komunikace s bufferem i bez

Toto je jediné řešení využívající externí infrastrukturu oproti ostatním, kdy byly využity pouze prvky V2V komunikace. Výhoda využití vysílačů podél silnice může spočívat ve zvýšení

dosahu i v případě nízkého zatížení modelovaného úseku komunikace. Schéma 3 ukazuje princip komunikace za využití V2I komunikace. Vozidlo (1) přepoše vygenerovanou zprávu detektoru či přijímači (2), který předá informaci centrální jednotce (3). Centrální jednotka pak zajistí rozeslání zprávy vysílačům (4) rozmístěným podél komunikace. Vysílače naváží spojení s projíždějícími vozidly (5) a předají jim informaci, kterou od centrální jednotky dostaly.

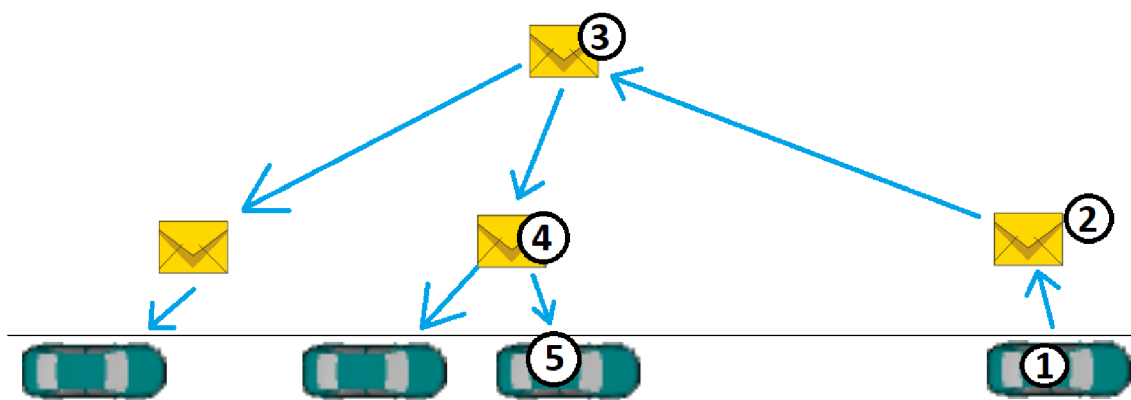
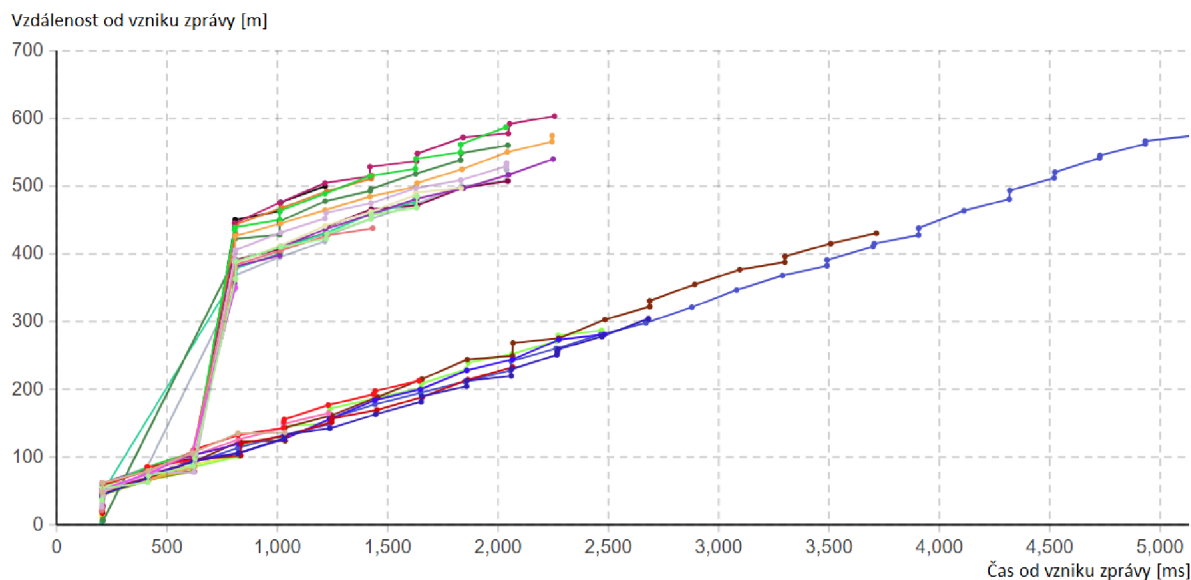


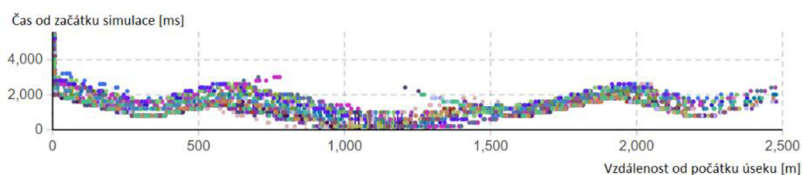
Schéma 3: Princip využití V2I komunikace

Efekt V2I komunikace je jasně patrný z grafu 9, zpráva se postupně šíří v rámci V2V komunikace tak, jak tomu bylo patrné u předchozích testů. Zároveň ale vysílače vytvářejí lokální uzly, odkud se začne zpráva šířit dál.



Graf 9: Zrychlení šíření zprávy u V2I komunikace (90 m, 40 aut za minutu)

Tento způsob šíření lze taktéž vyzorovat z grafu 10. Velmi jasně lze taktéž vidět pozice vysílačů tam, kde se vyskytuje sedlový tvar. Většina zpráv se generuje na úseku mezi 900 až 1400 metry. Vysílače jsou pak rozmístěny na 324, 954, 1584 a 2214 metrech od začátku úseku.



Graf 10: Vliv vysílačů na směr šíření zprávy (60 m, 60 aut za minutu)

Tabulka 7 porovnává získané hodnoty ze simulací s využitím V2I komunikace oproti V2I komunikace s zapnutým bufferem. Je patrné, že při aktuálním rozestupu 630 metrů mezi jednotlivými vysílači a nastavením doby vysílání zprávy na 3 vteřiny je dosaženo velmi vysokého pokrytí.

(15 m, 200 ms, 180 aut/min) – 20x	V2I	V2I + BUFFER (3 s)
Max. dopředná vzdálenost [m]	155,15	636,69
Max. zpětná vzdálenost [m]	200,926	568,842
Poměr informovaných vozidel	0,15	0,971
(60 m, 200 ms, 60 aut/min) – 25x	V2I	V2I + BUFFER (3 s)
Max. dopředná vzdálenost [m]	460,13	676,576
Max. zpětná vzdálenost [m]	357,98	602,31
Poměr informovaných vozidel	0,635	0,981
(90 m, 200 ms, 40 aut/min) – 35	V2I	V2I + BUFFER (3 s)
Max. dopředná vzdálenost [m]	523,831	653,783
Max. zpětná vzdálenost [m]	466,652	616,834
Poměr informovaných vozidel	0,789	0,985
(90 m, 200 ms, 20 aut/min) – 35x	V2I	V2I + BUFFER (3 s)
Max. dopředná vzdálenost [m]	409,762	562,071
Max. zpětná vzdálenost [m]	307,257	535,661
Poměr informovaných vozidel	0,515	0,86

Tabulka 7: Test V2I komunikace

Kombinace V2V i V2I infrastruktury

Poslední test byl zaměřen na kombinace všech předchozích metod komunikace. Výsledky naznačují, že takový způsob dokáže dostatečně pokrýt pozorovaný úsek komunikace a rozšířit zprávu mezi více jak 97 % populace vozidel.

(15 m, 200 ms, 180 aut/min) – 10x	Vše (3 s)
Max. dopředná vzdálenost [m]	1433,563
Max. zpětná vzdálenost [m]	992,08
Poměr informovaných vozidel	0,996
(60 m, 200 ms, 60 aut/min) – 15x	Vše (3 s)
Max. dopředná vzdálenost [m]	1400,331
Max. zpětná vzdálenost [m]	1090,847
Poměr informovaných vozidel	0,989
(90 m, 200 ms, 40 aut/min) – 10x	Vše (3 s)
Max. dopředná vzdálenost [m]	1379,243
Max. zpětná vzdálenost [m]	1103,021
Poměr informovaných vozidel	0,985
(90 m, 200 ms, 20 aut/min) – 20x	Vše (3 s)
Max. dopředná vzdálenost [m]	1217,582
Max. zpětná vzdálenost [m]	1122,441
Poměr informovaných vozidel	0,972

Tabulka 8: Výsledky kombinace všech metod komunikace

Porovnání výsledků

Na základě provedených scénářů byly vytvořeny dvě tabulky s porovnáním rychlostí šíření a poměrem informovaných vozidel. Pro větší přehlednost byly jednotlivé konfigurace šíření zpráv označeny písmeny:

- A – 15 metrů dosah, 200 ms latence, 180 aut za minutu
- B – 60 metrů dosah, 200 ms latence, 60 aut za minutu
- C- 90 metrů dosah, 200 ms latence, 40 aut za minutu
- D = 90 metrů dosah, 200 ms latence, 20 aut za minutu

Do tabulky 9 byly vypsány poměry informovaných vozidel. Nejvyšší poměr informovaných vozidel po skončení scénáře byl vždy viděn při použití bufferu, hodnoty se většinou blížily plnému informování všech vozidel na sledovaném úseku. Těmto výsledkům mohla částečně konkurovat V2I komunikace a šíření zprávy skrze vysílače podél cest, hodnoty však byly výrazně horší při komunikaci na nízkou vzdálenost nebo při nižší hustotě dopravy.

Poměr informovaných vozidel	A	B	C	D
Základ	0,161	0,391	0,407	0,154
Buffer	0,244	0,52	0,412	0,226
Protijedoucí vozidlo	0,165	0,434	0,437	0,184
Protijedoucí vozidlo + buffer (3 vteřiny)	0,996	0,959	0,962	0,761
Protijedoucí vozidlo + buffer (10 vteřin)	0,996	0,927	0,986	0,873
V2I	0,15	0,635	0,789	0,515
V2I + buffer (3 vteřiny)	0,971	0,981	0,985	0,86
V2I + protijedoucí vozidlo + buffer (3 vteřiny)	0,996	0,989	0,985	0,972

Tabulka 9: Poměr informovaných vozidel

Tabulka číslo 10 obsahuje přehled rychlosti přenosu zpráv. Ve scénářích, kde se poměr informovaných vozidel blíží jedné, dochází ke zkreslování přenosové rychlosti zpráv z důvodu omezení úseku modelu. Jsou porovnány hodnoty, jejichž hodnota nebyla tímto jevem zkreslena. Dopředný směr šíření je označen v hlavičce písmenem D, zpětný směr pak písmenem Z.

Poměr informovaných vozidel	A - D	A - Z	B - D	B - Z	C - D	C - Z	D - D	D - Z
Základ	73,92	34,33	240,87	191,34	354,7	292,14	291,19	271,2
Buffer	62,32	21,9	214,13	83,93	289,61	187,8	106,54	155,07
Protijedoucí vozidlo	73,9	34,1	246	199	353,6	299,6	299,8	277,5
V2I	130	106,26	293,72	205,35	500	338,6	529	403,2

Tabulka 10: Rychlost šíření zprávy

Z obou tabulek je patrné, že se zpráva přenáší nejrychleji při využití V2I architektury. Je však nutné brát v potaz fakt, že se vysílače mohou nacházet dále od sebe a může nastat situace, kdy jsou informována jen nejbližší vozidla a zbytek v oblasti mezi vysílači zůstane neinformován. Volba způsobu šíření zprávy pak může záviset i na preferovaném směru šíření. Pro zpětné šíření se jeví jako nejlepší volba kombinace vysílačů a protijedoucích vozidel s bufferem, ale dostačující může být i šíření pouze pomocí protijedoucího vozidla. Na dopředné je doporučeno používat především V2I infrastrukturu. V úsecích s vysokou hustotou provozu je taktéž možné využít pouze V2V komunikaci, nicméně pravděpodobnost přenesení zprávy všem účastníkům provozu klesá se snižujícím se dosahem komunikace.

4.2.2 Právo přednostní jízdy

Experiment je zaměřen na vliv způsobu komunikace pro průjezd vozidel s právem přednosti jízdy.

Simulace je nejprve spuštěna po dobu 100 vteřin, aby došlo k zaplnění celého simulovaného úseku komunikace. Střední hodnota agrese řidičů je 0.9. Posléze je v prostředním pruhu vygenerováno vozidlo s právem přednostní jízdy, které po celý zbytek simulace zůstává ve svém přiděleném jízdním pruhu. Simulace končí, jakmile vozidlo s přednostním právem jízdy opustí simulovaný úsek komunikace.

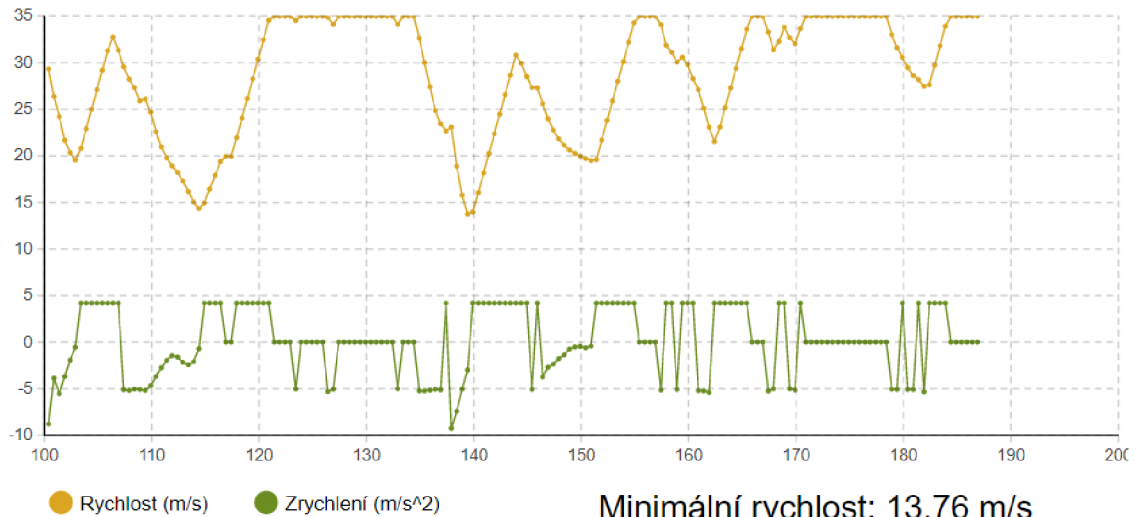
Pro porovnání byl zaznamenán průjezd vozidla po prázdné komunikaci bez dopravy. Maximální rychlost vozidla je 35 metrů za vteřinu. Vstupní rychlost je 30 metrů za vteřinu. Sledované vozidlo úsek projede za 71,03 vteřiny a průměrná rychlost činí 34,94 metrů za vteřinu.

Výstupem jsou následující hodnoty:

- Celkový čas vozidla s právem přednostní jízdy na projetí úseku
- Průměrná rychlost vozidla s právem přednostní jízdy
- Minimální rychlost vozidla s právem přednostní jízdy

Bez komunikace

Simulace je prováděna bez žádného způsobu komunikace. Pokud jakékoliv vozidlo spatří ve zpětném zrcátku vozidlo s právem přednostní jízdy, které jede ve stejném jízdním pruhu, snaží se tento pruh co nejdříve opustit. Dohled zpětného zrcátka je dán v metrech, výpočet probíhá vzorcem $100 * agresivita$.



Minimální rychlost: 13.76 m/s
 Průměrná rychlost: 28.58 m/s
 Doba strávená na úseku: 86.91 s

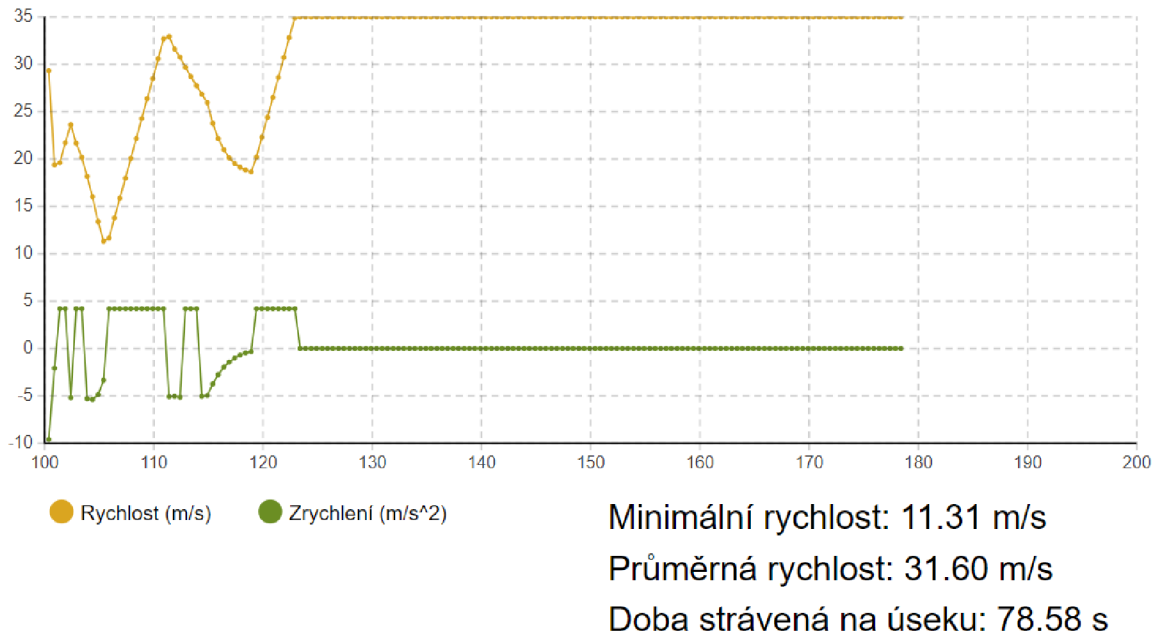
Graf 11: Přednostní právo jízdy bez komunikace

Na grafu 11 je poznat, že vozidla jedoucí po úseku komunikace nestačila včas uhýbat vozidlu s přednostním právem jízdy. To muselo často zpomalit, přizpůsobit svou rychlost okolí a počkat, než se cesta uvolní. Tento problém trval po celou dobu průjezdu pozorovaného úseku. Celková doba strávená na trase se zvýšila o téměř 23 % oproti hladkému průjezdu bez dopravy.

V2V komunikace

Scénář využívá komunikace mezi vozidly s využitím bufferu a protijedoucího vozidla. Jakmile první vozidlo spatří ve zpětném zrcátku vozidlo s přednostním právem jízdy, zahájí manévr pro uvolnění jízdního pruhu a zároveň vygeneruje zprávu pro ostatní vozidla o uvolnění daného pruhu. Zpráva se šíří způsobem popsaným v kapitole 4.2. Podle grafu 12 mělo vozidlo s přednostním právem jízdy problém pouze na začátku při zařazení do provozu. První vozidla na pozorovaném úseku komunikace nemohla využít výhod plynoucích z V2V komunikace a reagovala pomalu. Vozidlo s přednostním právem jízdy muselo zpomalit, dokonce na nižší rychlost než v simulaci bez jakékoliv komunikace. Tento problém ale dal dostatek času zbylým vozidlům ve zbytku úseku, aby připravily prostřední pruh pro hladký průjezd.

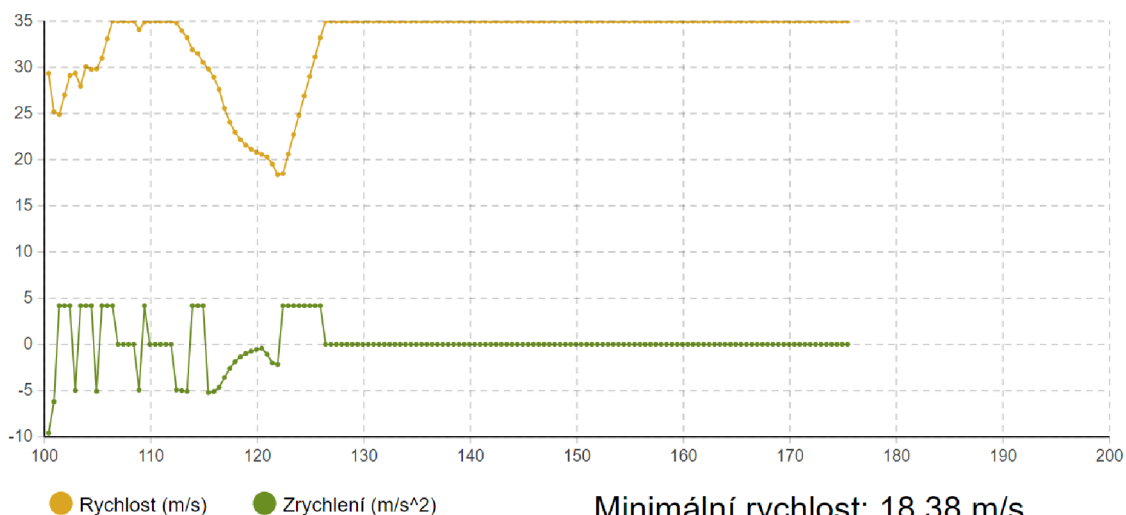
Scénář ukázal zlepšení oproti průjezdu bez žádné komunikace o necelých 10 %.



Graf 12: Přednostní právo jízdy s V2V komunikací

V2V + V2I komunikace

Poslední scénář kromě V2V komunikace využívá i statickou infrastrukturu podél vozovky. Vzhledem k tomu, že je většina této infrastruktury umístěna až v části, kde předchozí scénář nevykazoval problémy, neočekávala se žádné výrazné zlepšení. Přesto je na grafu 13 možné zlepšení spatřit, především zůstala minimální hodnota rychlosti vozidla na nejvyšší hodnotě ze všech scénářů. Celkovou dobu potřebnou na projetí sledovaného úseku se povedlo zkrátit na 75,62 vteřin, tedy hodnotu jen o 6,5 % vyšší oproti době průjezdu prázdného úseku.



Minimální rychlost: 18.38 m/s
 Průměrná rychlost: 32.82 m/s
 Doba strávená na úseku: 75.62 s

Graf 13: Přednostní právo jízdy s V2V i V2I komunikací

Srovnání

Pro srovnání scénářů tohoto experimentu byla vytvořena tabulka číslo 10. Průjezd bez žádné bezdrátové komunikace vykazuje v souhrnu nejhorší výsledky. Horší je pouze hodnota minimální rychlosti při využití V2V komunikace, kdy došlo při první reakci na žádost o uvolnění pruhu k výraznému zpomalení nejbližších vozidel. Jinak si ovšem scénáře s kteroukoli formou komunikace vedou dobře, navýšení času průjezdu se podařilo snížit o více jak polovinu v případě V2V a o téměř tři čtvrtiny v případě kombinace V2V a V2I komunikace. Na základě těchto dat lze vyvodit závěr, že je V2V (a V2I) komunikace vhodná pro reálné situace v provozu a její využití vede k zefektivnění dopravní sítě.

	Bez dopravy	Bez komunikace	V2V	V2V + V2I
Čas průjezdu [s]	71,03	86,91 (+22,35 %)	78,58 (+10,62 %)	75,62 (+6,46 %)
Minimální rychlost [m/s]	30	13,76 (-54,13 %)	11,31 (-62,3 %)	18,38 (-38,73 %)
Průměrná rychlost [m/s]	34,94	28,58 (-18,2 %)	31,6 (-9,56 %)	32,82 (6,07 %)

Tabulka 11: Srovnání experimentu s právem přednostní jízdy

5 Závěr

Cílem práce bylo vytvořit model úseku víceproudé komunikace se zaměřením na osobní charakteristiky řidiče a komunikaci mezi vozidly. K dosažení tohoto cíle pomohlo provedení dvou rešerší. Na základě první rešerše byly nadefinovány požadavky na simulované prostředí, způsob myšlení řidiče a charakteristiky řidiče, které ovlivňují jeho chování. Druhá rešerše pomohla k pochopení způsobu přenosu dat mezi vozidly v rámci V2I a V2V komunikace a možnosti zisku dat pomocí statických detektorů.

Získané poznatky byly využity pro návrh modelu víceproudé komunikace. Byl navržen úsek se třemi souběžnými pruhy jedním směrem a jedním protisměrným. Podél komunikace byly v pravidelném úseku rozmístěné detektory a vysílače. Vozidla komunikují mezi sebou a mohou zasílat zprávy na delší vzdálenosti za využití detektorů a vysílačů.

Pro implementaci modelu byl využit nástroj Anylogic. V průběhu implementace bylo nutné upustit od využití integrované knihovny pro simulaci dopravy a bylo potřeba implementovat i základní chování vozidel. Po implementaci byly vytvořeny scénáře pro ověření funkčnosti modelu a porovnání chování modelu oproti představám o chování v reálném provozu.

Bylo provedeno několik experimentů. První experiment se zaměřil na porovnání několika druhů komunikace – V2V v rámci jednoho směru jízdy, V2V za účasti protijedoucích vozidel a V2I za účasti statické infrastruktury podél vozovky. Na každé z těchto metod komunikace pak byly vyzkoušeny různé parametry přenosu bezdrátového signálu. Experiment ukázal změny v dosahu a rychlosti komunikace v závislosti na použité technologii. Podle získaných dat je vhodné využít pro šíření zpráv zpětným směrem protijedoucí vozidla v kombinaci s vysílači v rámci V2I komunikace. Pro šíření dopředným směrem lze využít vysílače samotné.

Druhý experiment ukázal vliv použité technologie komunikace na plynulost průjezdu vozidla s právem přednostní jízdy. Využitím kombinace V2V a V2I komunikace lze i při vysokém zatížení dopravní sítě dosáhnout téměř srovnatelné rychlosti průjezdu jako v prázdném pruhu.

Model je možné v budoucnu rozšířit o další způsob komunikace, zvýšit délku sledovaného úseku a přidat experimenty zaměřené například na šíření signálu v závislosti na latenci přenosu a rychlostí vozidel, případně přidat vyhodnocení dalších dopravních situací.

6 Bibliografie

- [1] ARAUJO, Frederico, J. VALENTE a Rym ZALILA-WENKSTERN. Modeling Agent-Based Traffic Simulation Properties in Alloy. In: *Proceedings of the 2012 Symposium on Agent Directed Simulation*. San Diego, CA, USA: Society for Computer Simulation International, 2012, s. 1-8. ISBN 978-1-61839-783-6.
- [2] BAZGHANDI, Ali. Techniques, Advantages and Problems of Agent Based Modeling for Traffic Simulation. *International Journal of Computer Science Issues* [online]. 1. 2012, **2012**(3), 115-119 [cit. 2021-12-28]. ISSN 1694-0814. Dostupné z: <https://www.ijcsi.org/papers/IJCSI-9-1-3-115-119.pdf>
- [3] MACAL, C a M NORTH. Tutorial on agent-based modelling and simulation. *Journal of Simulation* [online]. 2017, **4**(3), 151-162 [cit. 2021-11-09]. ISSN 1747-7778. Dostupné z: doi:10.1057/jos.2010.3
- [4] RUSSELL, Stuart a Peter NORVIG. *Artificial intelligence: a modern approach*. 3rd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2010. Prentice Hall series in artificial intelligence. ISBN 978-0-13-604259-4.
- [5] ZBOŘIL, František. *Plánování a komunikace v multiagentních systémech*. Brno, 2004, 92 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Doc. Dr. Ing. Petr Hanáček.
- [6] REISMÜLLEROVÁ, Jindřiška. *Multiagentní systém umožňující agentům utkat se v jednoduché hře*. Západočeská univerzita v Plzni Fakulta aplikovaných věd Katedra informatiky a výpočetní techniky, 2020. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Jakub Sido.
- [7] CICORTAS, Alexandru a Norbert SOMOSI. *Multi-Agent System Model for Urban Traffic Simulation* [online]. 2005 [cit. 2021-11-10]. West University of Timisoara.

- [8] PARUCHURI, Praveen, Alok Reddy PULLALAREVU a Kamalakar KARLAPALEM. Multi agent simulation of unorganized traffic. In: *Proceedings of the first international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems part 1 - AAMAS '02* [online]. New York, New York, USA: ACM Press, 2002, s. 176- [cit. 2022-04-10]. ISBN 1581134800. Dostupné z: doi:10.1145/544741.544786
- [9] BLATNIG, Sarah. *Microscopic traffic simulation with intelligent agents: simulation of human driving behaviour*. Saarbrücken: VDM Verlag Dr. Müller, 2009. ISBN 978-3-639-22415-3.
- [10] KAMENICKÝ, Jiří. *Dopravní nehodovost a její důsledky v ČR v dlouhodobém pohledu* [online]. Praha: Český statistický úřad, 2014 [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/documents/10180/20534694/32025414a.pdf/57d484eb-1939-47ad-8fef-f38d6dd2c19e?version=1.0>
- [11] CAILLOU, Philippe, Benoit GAUDOU, Arnaud GRIGNARD, Chi Quang TRUONG a Patrick TAILLANDIER. A Simple-to-Use BDI Architecture for Agent-Based Modeling and Simulation. In: JAGER, Wander, Rineke VERBRUGGE, Andreas FLACHE, Gert DE ROO, Lex HOOGDUIN a Charlotte HEMELRIJK, ed. *Advances in Social Simulation 2015* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2017, s. 15-28 [cit. 2021-12-28]. Advances in Intelligent Systems and Computing. ISBN 978-3-319-47252-2. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-47253-9_2
- [12] ŘEZÁČ, Miloslav, Jiří TICHÝ a Václav ŠKVAIN. *Dopravní inženýrství*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2010. ISBN 978-80-7204-730-7.
- [13] LEDUC, Guillaume. Road Traffic Data: Collection Methods and Applications. *Working Papers on Energy Transport and Climate Change*. 2008.
- [14] GUERRERO-IBÁÑEZ, Juan, Sherali ZEADALLY a Juan CONTRERAS-CASTILLO. Sensor Technologies for Intelligent Transportation Systems. *Sensors* [online]. 2018, **18**(4) [cit. 2022-04-10]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s18041212

- [15] SAARIKIVI, Pirkko, Pär EKSTRÖM, Torbjörn GUSTAVSSON a Stephanie MÜLLER. *State of the Art of Floating Car Measurements* [online]. In: . 2011 [cit. 2022-04-10].
- [16] JANECEK, Andreas, Karin A. HUMMEL, Danilo VALERIO, Fabio RICCIATO a Helmut HLAVACS. Cellular data meet vehicular traffic theory. In: *Proceedings of the 2012 ACM Conference on Ubiquitous Computing - UbiComp '12* [online]. New York, New York, USA: ACM Press, 2012, s. 361- [cit. 2022-04-10]. ISBN 9781450312240. Dostupné z: doi:10.1145/2370216.2370272
- [17] TURNER, Shawn M., William L. EISELE, Robert J. BENZ a Douglas J. HOLDENER. TEXAS TRANSPORTATION INSTITUTE. *Travel time data collection handbook*. 1998. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.21949/1404545>
- [18] SAMAD, Tariq a Anuradha ANNASWAMY, ed. *The Impact of Control Technology: Overview, Success Stories, and Research Challenges* [online]. 1st Edition. IEEE Control Systems Society, 2011 [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: <http://ieeecs.org/impact-control-technology-1st-edition>
- [19] ROSSETTI, Rosaldo J. F. *A BDI-based approach for the assessment of driver's decision-making in commuter scenarios*. Porto Alegre, 2002.
- [20] HARDING, John, Gregory POWELL, Rebecca YOON, Charlene DOYLE, Dana SADE, Mike LUKUC, Jim SIMONS a Jing WANG. *Vehicle-to-Vehicle Communications: Readiness of V2V Technology for Application*. Washington, D.C: National Highway Traffic Safety Administration, 2014, 327 s. DOT HS 812 014. Dostupné také z: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/27999>
- [21] GREIBE, Poul. *Braking distance, friction and behaviour: Findings, analyses and recommendations based on braking trials*. Lyngby (Denmark): Trafitec, 2007. Dostupné také z: <http://www.trafitec.dk/sites/default/files/publications/braking%20distance%20-%20friction%20and%20driver%20behaviour.pdf>

- [22] GHEORGHIU, Razvan Andrei, Valentin IORDACHE, Marius MINEA a Angel Ciprian CORMOS. Bluetooth latency analysis for vehicular communications in a Wi-Fi noisy environment. In: *2017 40th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)* [online]. IEEE, 2017, s. 148-151 [cit. 2022-12-04]. ISBN 978-1-5090-3982-1. Dostupné z: doi:10.1109/TSP.2017.8075956
- [23] Výsledky celostátního sčítání dopravy 2020. In: *Ministerstvo dopravy ČR* [online]. [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: <https://mdcr.cz/Media/Media-a-tiskove-zpravy/Vysledky-celostatniho-scitani-dopravy-2020>

7 Seznam použitých symbolů a zkratek

ABS – Anti-lock Brake System

ATM – Asynchronous Transfer Mode

MPLS – MultiProtocol Label Switching

CAN – Controller-Area Network

DSRC – Dedicated Short Range Communication

FCD – Floating Car Data

ITS – Intelligent Transportation Systems

LIDAR – LIght Detection And Ranging

RADAR – Radio Detection And Ranging

RDS – Radio Data System

TMS – Traffic Message Channel

V2I – Vehicle To Infrastructure

V2V – Vehicle to Vehicle

8 Seznam grafů

Graf 1: Informace o provozu	42
Graf 2: Sledované globální údaje v simulaci.....	42
Graf 3: Rozdělení agresivity napříč populací	43
Graf 4: Porovnání zpětného a dopředného šíření pro dosah 15 m a zatížení 180 aut/min	46
Graf 5: Vývoj poměru inf. vozidel při dosahu 60 m a hustotě dopravy 60 aut/min.....	47
Graf 6: Srovnání zpětného šíření zprávy pro různé hustoty dopravy	48
Graf 7: Dopředné šíření s aktivním bufferem – dosah 15 m, hustota 180 aut/min	51
Graf 8: Šíření s aktivním bufferem – dosah 15 m, hustota 80 aut/min.....	51
Graf 9: Zrychlení šíření zprávy u V2I komunikace (90 m, 40 aut za minutu)	54
Graf 10: Vliv vysílačů na směr šíření zprávy (60 m, 60 aut za minutu)	55
Graf 11: Přednostní právo jízdy bez komunikace	59
Graf 12: Přednostní právo jízdy s V2V komunikací	60
Graf 13: Přednostní právo jízdy s V2V i V2I komunikací	61

9 Seznam obrázků

Obrázek 1 Diagram procesu přemýšlení řidiče [11].....	17
Obrázek 2: Příklady senzorů ve vozidle [14]	20
Obrázek 3: Princip pozemní rádiové komunikace [17]	23
Obrázek 4: Plány cíle GoalNavigateTo	33
Obrázek 5: Stavový diagram cíle GoalChangeLane.....	35
Obrázek 6: Stavový diagram cíle GoalMoveToSlowerLane.....	35
Obrázek 7: Stavový diagram cíle GoalClearLane	36
Obrázek 8: Životní cyklus agenta.....	37
Obrázek 9: Cyklus změny rychlosti.....	39
Obrázek 10: Zpracování zpráv	40
Obrázek 11: Schéma chování detektoru	41

10 Seznam Schémat

Schéma 1: Princip šíření zprávy	45
Schéma 2: Princip komunikace s protijedoucím vozidlem za využití bufferu	53
Schéma 3: Princip využití V2I komunikace	54

11 Seznam tabulek

Tabulka 1: Výsledky měření.....	46
Tabulka 2: Naměřené hodnoty	47
Tabulka 3: Naměřené hodnoty	48
Tabulka 4: Srovnání základního šíření s bufferem.....	50
Tabulka 5: Srovnání komunikace s protijedoucím vozidlem	52
Tabulka 6: Porovnání šíření zpráv za využití protijedoucího vozidla a bufferu	53
Tabulka 7: Test V2I komunikace	55
Tabulka 8: Výsledky kombinace všech metod komunikace	56
Tabulka 9: Poměr informovaných vozidel	57
Tabulka 10: Rychlost šíření zprávy	57
Tabulka 10: Srovnání experimentu s právem přednostní jízdy	61

12 Přílohy

- Příloha A – Software – implementace modelu pro nástroj Anylogic
- Příloha B – Třída AbstractRoad
- Příloha C – Třída Goal
- Příloha D – Podmínky přijetí cíle GoalChangeLane
- Příloha E – PerceptionEvent
- Příloha F – Zpracování události
- Příloha G – Výpočet rychlosti
- Příloha H – Třída Message

Příloha B – Třída AbstractRoad

```
public class AbstractRoad implements Serializable {  
  
    private HashMap<Integer, AbstractRoadLane> lanes;  
    private double speedLimit;  
  
    public AbstractRoad(double limit, AbstractRoadLane... paths) {  
        lanes = new HashMap<>();  
        for (int i = 0; i < paths.length; i++) {  
            lanes.put(i, paths[i]);  
        }  
        speedLimit = limit;  
    }  
  
    public double getSpeedLimit() {  
        return speedLimit;  
    }  
  
    public boolean containsLane(AbstractRoadLane p) {  
        return lanes.values().contains(p);  
    }  
  
    public int getLaneIndex(AbstractRoadLane lane) {  
        for (Map.Entry<Integer, AbstractRoadLane> e: lanes.entrySet()) {  
            if (e.getValue().equals(lane))  
                return e.getKey();  
        }  
        return -1;  
    }  
  
    public AbstractRoadLane getLane(int index) {  
        return lanes.get(index);  
    }  
  
    public double getCarDistanceFromStart(int laneIndex, Car c) {  
        Path lane = lanes.get(laneIndex).getLane();  
        if (lane == null) return -1;  
  
        return lane.getNetwork().getDistance(lane.getStartPoint(), c.getXYZ());  
    }  
}
```

Příloha C – Kód Goal

```
public abstract class Goal implements Serializable {
    private GoalStatus status;
    protected Car car;

    public GoalStatus getStatus() {return status;}
    public void setStatus(GoalStatus s) {status = s;}
    public abstract boolean isPlanFinished();
    public abstract boolean isPreconditionMet();
    public abstract void selectPlan();
    public abstract boolean isPlanInstantaneous();
    public abstract void executePlan();
    public abstract String getName();

    public Goal(Car c) {
        status = GoalStatus.AVAILABLE;
        car = c;
    }

    @Override
    public String toString() {
        return super.toString();
    }
}
```

Příloha D – Podmínky přijetí cíle GoalChangeLane

```
public boolean isPreconditionMet() {

    if ( !car.carFront.isConnected()
        || car.currentRoad == null
        || !car.isNextLaneAvailable()
        || car.needToStop
        || car.distanceFromStartOfRoad < 10
        || car.currentLaneIndex + 1 == car.laneIndexToClear
    ) return false;
    Car c = car.carFront.getConnectedAgent();

    boolean speedCheck1 =
        car.frontCarSpeed <= car.currentSpeed - car.SPEED_DIF_RATIO
        && car.getCustomSpeedLimit() > car.currentSpeed;
    boolean stopCheck = car.frontCarSpeed == 0 && !car.needToStop;

    return speedCheck1 || stopCheck;
}
```

Příloha E – PerceptionEvent

```
public class PerceptionEvent implements Serializable {

    static enum Type{
        FRONT_RIGHT_W_CHANGE_LANE,
        FRONT_W_CHANGE_LANE
    }

    private Object data;
    private Type type;

    public Type getType() {return type;}
    public Object getData() {return data;}

    public PerceptionEvent(Type t, Object data) {
        this.data = data;
        this.type = t;
    }
}
```

Příloha F – Zpracování události

```
double t = time(TimeUnits.SECOND);
double k;

while (!perceptionEvents.isEmpty() && (k = perceptionEvents.firstKey()) < t+reactionTime){
    processEvent(perceptionEvents.remove(k));
}
```

Příloha G – Výpočet rychlosti

```
double futureSpeed = getSpeed(SpeedUnits.MPS)
    + dUpdateTime * acceleration;

if (acceleration > 0) {
    futureSpeed = min(speedGoal, futureSpeed);
} else {
    futureSpeed = max(futureSpeed, speedGoal);
}

if (futureSpeed == 0) {
    stop();
}
setSpeed(futureSpeed, SpeedUnits.MPS);
currentSpeed = futureSpeed;

if (!isMoving() && nextNode != null && futureSpeed != 0)
    moveToNextNode();
```

Příloha H – Třída Message

```
abstract public class Message<DataType> implements Serializable {  
  
    abstract void handleMessage(Car c);  
  
    private DataType data;  
    private Car sender;  
    private boolean responseNeeded;  
  
    public DataType getData() {return data;}  
    public Car getSender() {return sender;}  
    public boolean isResponseNeeded() {return responseNeeded;}  
  
    public Message(DataType data, Car sender, boolean responseNeeded) {  
  
        this.data = data;  
        this.sender = sender;  
        this.responseNeeded = responseNeeded;  
    }  
}
```