

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 429

ISSN 1213-418X

Petr Holcner

MODELOVÁNÍ A SIMULACE DOPRAVNÍHO PROUDU

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

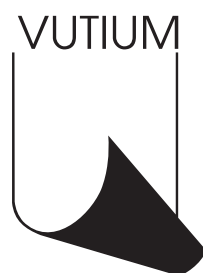
Ing. Petr Holcner, Ph.D.

MODELOVÁNÍ A SIMULACE DOPRAVNÍHO PROUDU

MODELLING AND SIMULATION OF TRAFFIC FLOW

TEZE HABILITAČNÍ PRÁCE

Vědní obor: Konstrukce a dopravní stavby



BRNO 2012

KLÍČOVÁ SLOVA

dopravní proud, teorie dopravního proudu, kongesce, spontánní kongesce, fundamentální diagram, hustota, rychlost, simulace dopravního proudu, mikroskopický model, makroskopický model, pravděpodobnostní model, Nagel–Schreckenbergův model, nelineární jevy, GPS měření, simulace křižovatky, dvoupruhový model, předjíždění

KEY WORDS

traffic flow, traffic flow theory, congestion, spontaneous congestion, fundamental diagram, density, velocity, simulation of traffic flow, microscopic model, macroscopic model, stochastic model, Nagel–Schreckenberg model, nonlinear phenomena, GPS measurement, cross-roads simulation, two lane model, overtaking

Místo uložení originálu habilitační práce
Archív děkanátu Fakulty stavební VUT v Brně

© Petr Holcner, 2012
ISBN 978-80-214-4590-1
ISSN 1213-418X

OBSAH

PŘEDSTAVENÍ AUTORA	4
1 ÚVOD	7
2 VÝVOJ DOPRAVY	7
2.1 Vývoj automobilizace, růst intenzit	8
2.2 Inteligentní dopravní systémy	8
3 ZÁKLADNÍ VELIČINY DOPRAVNÍHO PROUDU A STACIONÁRNÍ HYPOTÉZA.....	9
3.1 Fundamentální diagramy	10
3.2 Stacionární modely homogenního dopravního proudu	12
4 MODELOVÁNÍ DOPRAVNÍHO PROUDU.....	12
4.1 Rovnice kontinuity, makroskopické modely	13
4.2 Mikroskopické modely	14
5 MĚŘENÍ POHYBU VOZIDEL POMOCÍ SATELITNÍCH METOD.....	16
6 IDM SIMULACE DOPRAVNÍHO PROUDU	19
6.1 Zobrazení simulací	19
6.2 Hustota, rychlost a intenzita při simulaci	20
6.3 Oprávněnost použití cyklických podmínek	21
6.4 Nelineární jevy	21
7 POROVNÁNÍ IDM S VYBRANÝMI MODELÝ	22
8 SIMULACE PRŮJEZDU KŘIŽOVATKOU	23
8.1 Intenzita a kapacita křižovatky	23
8.2 Rozjezdy jednotlivých vozidel	24
8.3 Řízení vozidel před vjezdem do křižovatky	25
9 SIMULACE ZMĚN JÍZDNÍCH PRUHŮ.....	26
10 ZÁVĚR	29
10.1 Obecné výsledky	30
10.2 Teoretické přínosy práce	30
10.3 Praktické přínosy	31
10.4 Další směřování výzkumu	31
SEZNAM LITERATURY	32
SEZNAM LITERATURY	33
ABSTRACT	37

PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Ing. Petr Holcner, Ph.D.

Narozen: 29. 09. 1961 v Brně
Kontakt: Ústav pozemních komunikací
Fakulta stavební VUT v Brně
Veveří 95
602 00 Brno
holcner.p@fce.vutbr.cz



Vzdělání

1975 – 1979 Gymnázium Slovanské nám., Brno
1979 – 1984 Fakulta stavební VUT v Brně
Státní zkouška složena 27. 09. 1984

Diplomová práce:

Křižovatka tzv. „Průmyslového polokruhu“ umožňující napojení ÚNO v Brně
Horních Heršpicích

Od 2001 doktorské studium
Fakulta stavební VUT v Brně
obor 36-06-09 Teorie konstrukcí

Praxe

1984 – 1988 vývojový pracovník Silniční vývoj Brno
1988 – 1995 odborný asistent – FAST VUT
1995 – 1996 redaktor zpravodajství ČT Brno
od 1996 odborný asistent – FAST VUT

Odborné zaměření

- modelování dopravního proudu, nelineární dynamické systémy a deterministický chaos v dopravním proudu
- návrh trasy a projektování
- dopravní bezpečnost, zklidňování, životní prostředí ve městech

Pedagogická činnost

Bakalářské a magisterské studium:

Přednášky předmětů

- Dopravní stavby pro obor „E“ (1993 až 1997)
- 0M2 Silnice a dálnice I. (do r. 2006)

- 0M3 Silnice a dálnice II. (do r. 2007)
- BM01 Pozemní komunikace I. (od r. 2006 doposud)
- 0M5 a 0M6 Městské komunikace (r.1997 až 2000)
- 5M3 a 5M4 Vybrané statě z pozemních komunikací I. a II. (do r. 2008)
- CM53 Doprava ve městech (r.1998 až 2000)
- CM02 a CM04 Dopravní inženýrství (od r. 2008 doposud)
- diplomové semináře (trvale)
- CM55 Moderní trendy v dopravním inženýrství (od r. 2008 doposud)

Cvičení předmětů

- Dopravní stavby pro obory „V“ a „E“ (1993 až 1997)
- 0M2 Silnice a dálnice I. (do r. 2006)
- 0M3 Silnice a dálnice II. (do r. 2007)
- BM01 Pozemní komunikace I. (od r. 2006 doposud)
- 0M5 a 0M6 Městské komunikace (r.1997 až 2000)
- 5M3 a 5M4 Vybrané statě z pozemních komunikací I. a II. (do r. 2008)
- CM53 Doprava ve městech (r.1998 až 2000)
- CM02 a CM04 Dopravní inženýrství (od r. 2008 doposud)
- diplomové semináře (trvale)
- CM55 Moderní trendy v dopravním inženýrství (od r. 2008 doposud)

Doktorské studium– přednášky a semináře předmětů (od r. 2007)

- školitel studentů doktorského studia (od r. 2007 doposud)
- DM62 Teorie dopravních staveb (od r. 2008 doposud)
- DM54 Teorie dopravního proudu (r. 2007)
- DM63 Životní prostředí a projektování pozemních komunikací (r. 2007)

Přehled aktivit

- COST 616 European Concerted Action on Mobile Sources of Urban Air Pollution, European Commission, člen Management Committee od 1996 do 2002 a zástupce České republiky - výsledky: aktivní účast na organizaci mezinárodní spolupráce, workshopy Kodaň a Neapol, samostatný výzkum v oblasti vztahu urbanistické a dopravní struktury
- DR TIGER, Dissemination of Results of the TIGER Project – Tempus Phare Compact Measures Grant, koordinátor
- Koordinátor sekce „Dopravní proud“ výzkumného záměru VUT „Netradiční metody studia komplexních a neurčitých systémů“, MSM 261100009, 1998–2004
- Spoluřešitel výzkumného projektu Black Box – Elektronické záznamové zařízení
- Spoluřešitel výzkumného projektu INFRAST – Projektování silnic a dálnic s ohledem na ITS systémy
- Člen pedagogické oborové rady pro obor Konstrukce a dopravní stavby
- Ministrem dopravy ČR jmenovaný člen skupiny odborníků pro posouzení SOKP, D3 a R55

Vybrané publikace autora

- [1] Holcner, P., The relation of the urban structure and the traffic network, 4th International Conference on Safety and Environment in the 21st century, Tel Aviv, 1997
- [2] Holcner, P. The Urban Transport Networks in Cities, TRANSCOM 3. European conference of young research and science workers in transport and telecommunications – Žilinská univerzita, Žilina, 1999
- [3] Holcner, P., Krajčovič, M. Environmental Impact of the Road Transportation, 12. regionální středoevropská konference IUAPPA a 4. Mezinárodní konference “Hodnocení vlivů na životní prostředí, Praha, 2000
- [4] Holcner, P. Fraktálová analýza dopravního proudu, 5. odborná konference doktorského studia, ISBN 80-7204-265-3, Brno, 2003
- [5] Holcner, P. Pozemní komunikace I., modul BM01–M01 a M02, studijní opory FAST VUT, 2005
- [6] Holcner, P., Jůza, P. Black Box - Elektronické záznamové zařízení, výzkumná zpráva, 2005
- [7] Holcner, P., Macur, J., Apeltauer, T., Kyselý, M. Modely dopravního proudu, Silniční obzor 10, 2005, s. 255 - 260
- [8] Holcner, P., Macur, J., Apeltauer, T., Kyselý, M. Simulace dopravního proudu, Silniční obzor 11, 2005, s. 286 - 291
- [9] Holcner, P., Macur, J., Apeltauer, T., Kyselý, M. Celulární automaty v dopravních simulacích, Silniční obzor 1, 2006, s. 14 - 19
- [10] Holcner, P., Macur, J., Apeltauer, T., Kyselý, M., Přesné měření pohybu vozidel pomocí satelitních metod, Silniční obzor 2006
- [11] Holcner, P., Macur, J., Apeltauer, T., Kyselý, M., Non-linear effects in traffic simulations, Societatea Academica Matei-Teiu Botez, Iasi, Romania, 2007, p. 26–39
- [12] Holcner, P., Macur, J., Apeltauer, T., Pattern Formation in Traffic Microscopic Model, Traffic and Granular Flow 07, Springer Verlag GmbH, ISBN 3540770739, 2007, p.249–254
- [13] Holcner, P., Macur, J., Apeltauer, T., Bureš, J., Měření dopravního proudu pomocí GPS, Seminář s mezinárodní účastí: GPS - diferenční systémy a RTK, ECON publishing, s.r.o., Brno, 2008, s. 58–66
- [14] Holcner, P., Macur, J., Apeltauer, T., Traffic Flow Simulation and Anti-Congestion Control, Transport Systems Telematics, Silesian University of Technology, Katowice, 2008, p. 353–363
- [15] Holcner, P., Ověření Wiedemannova modelu dopravního proudu, Stavební obzor 9, p. 270–272, ISSN 1210-4027, vydávají Fakulty stavební ČVUT, VUT, VŠB, Praha, 2009
- [16] Holcner, P., Bezpečná vzdálenost mezi vozidly a simulace dopravního proudu, Stavební obzor 8, p 251–255, ISSN 1210-4027, vydávají Fakulty stavební ČVUT, VUT, VŠB, Praha, 2009
- [17] Holcner, P.; Macur, J.; Apeltauer, T., Bureš, J., Určování trajektorie z akcelerometrického měření, Silnice a železnice, ISSN 1801-822X, KONSTRUKCE Media, Ostrava, 2010
- [18] Holcner, P.; Macur, J.; Apeltauer, T., Simulations of two lane traffic model with chaotic behaviour, příspěvek na konferenci SPSM 2011 – Stochastic and Physical Monitoring Systems, ISBN 978-80-01-04916-7, Czech Technical University in Prague, Prague, 2011
- [19] Holcner, P., Všetečka, M., Apeltauer, J., Novák, J., Cíle regulace statické dopravy, Silniční obzor, ISSN 0322-7154, Česká silniční společnost, Praha, 2012

1 ÚVOD

Předložená habilitační práce je výsledkem dlouhodobého výzkumu dopravního proudu na pracovišti Ústavu pozemních komunikací a Ústavu automatizace inženýrských úloh a shrnuje výsledky především v oblasti mikroskopických modelů. Ty jsou implementovány do vlastního simulačního software, což zajišťuje úplný přehled a kontrolu nad simulacemi a možnost úpravy simulačních režimů a sledovaných výstupů podle potřeby. Hlavním cílem je sledování generických vlastností dopravního proudu. Předpokládá se, že některé jevy v dopravním proudu mají všeobecnou platnost a nezávisí na konkrétním modelu. Při tomto výzkumu postupně vzniká soubor softwarových prostředků umožňující podrobné zkoumání chování jednotlivých vozidel a vyhledávání stavových charakteristik vhodných pro popis celého systému. Vytvořené prostředky pro výzkum a výsledky těchto prací jsou jedinečné přinejmenším v České republice, v odborné literatuře nebylo nalezeno podobně obsáhlé zpracování této tematiky. Za úspěch lze považovat i přesné měření vozidel v dopravním proudu metodami GPS, které poskytlo cenná data. Obdobné (a rozsáhlejší) měření je zaznamenáno a popsáno v literatuře, proběhlo v Japonsku, data z něj však nejsou dostupná.

Správné pochopení jevů v dopravním proudu je nezbytným předpokladem pro jeho racionální řízení a ovlivňování. Na rozdíl od všeobecně přijímané představy ustáleného dopravního proudu, ve kterém jsou odchylky způsobeny náhodnými procesy, předkládaná práce ukazuje, že v důsledku nelinearit v systému vozidel se dopravní proud neustálí v širokém spektru vyšších hustot ani pro identická vozidla. Dokonce i z homogenního počátečního stavu spontánně vznikají kongesce. Kolísání rychlosti a hustoty dopravního proudu se tedy musí považovat za generické vlastnosti systému.

Práce zkoumá relevanci standardních stacionárních popisů dopravního proudu, dále makroskopických a mikroskopických modelů a celulárních automatů. Vlastní modelování a počítačová simulace se uskutečnila na tzv. IDM modelu (Intelligent Driver Model).

Abychom ověřili platnost modelů a jejich parametrů, prováděli jsme měření dvou až tří vozidel za pohybu pomocí satelitního měření (GPS) fázovým měřením metodou Real Time Kinematic (RTK) s přesností 0,01 m a četností 10 měření za sekundu. Naměřená data jsme porovnali s výsledky modelu za stejných podmínek a nelineární regresí jsme ověřili parametry modelu.

Hlavní část práce se zabývá simulacemi a měřením základních charakteristik dopravního proudu na modelu. Prokázala se přítomnost nelineárních jevů, především možnost existence odlišných stabilních stavů při totožné průměrné hustotě a při libovolně blízkých počátečních podmínkách. Citlivostní analýzou se prokázal význam jednotlivých parametrů zkoumaného modelu. Ze simulovaných profilových měření je zřejmé, že běžné chápání fundamentálního diagramu jako jednoznačného vztahu mezi hustotou a intenzitou je třeba korigovat.

Ověřený IDM model byl použit pro simulaci průjezdu vozidla křižovatkou, prokázalo se, že řízení dopravního proudu před křižovatkou skýtá možnosti pro pozitivní ovlivnění výkonnosti křižovatky.

Zásadním posunem využití modelu je implementace do dvoupruhového simulačního prostředí. V tomto uspořádání se prokazuje vliv stochastického uspořádání dynamických vlastností vozidel.

2 VÝVOJ DOPRAVY

Zkoumání dopravního proudu je aktuálním a zajímavým problémem a může vést k rychlým a účinným praktickým aplikacím. Základní důvody zvýšeného zájmu o teorii dopravního proudu jsou tyto:

- Všeobecně rostoucí dopravní intenzity zvyšují zatížení dopravní sítě do nepříznivých hodnot a posouvají využití dopravních cest směrem k maximálním kapacitám. Vyrůstá požadavek na účinné řízení a ovlivňování dopravního proudu a to není možné bez poznání jeho zákonitostí.
- Zvyšuje se dostupnost přiměřeně výkonné výpočetní techniky, která umožňuje simulaci v reálném čase a zobrazení výsledků v pochopitelné a názorné podobě.
- Hardwarový pokrok směřuje k tzv. „inteligentním dopravním (telematickým) systémům“, je nutné vytvořit pro ně funkční a spolehlivý software založený na důkladném poznání jevů v dopravním proudu.
- Automatizované řízení se začíná prosazovat už i do jednotlivých vozidel, např. systémy ACC (Adaptive Cruise Control), ADR (Automatic Distance Regulation), inteligentní tempomat, což se blíží podmínkám počítačové simulace převedené do reality.
- Dopravní proud (podobně jako jiné nelineární dynamické systémy) je jev definovaný jednoduchými pravidly a přitom složitý a pestrý.

2.1 VÝVOJ AUTOMOBILIZACE, RŮST INTENZIT

V současnosti se v České republice využívá síť pozemních komunikací v délce přes 55 000 km (podrobněji v tabulce 2.1). Při stoupajících intenzitách hlavně na dálnicích a silnicích I. třídy se charakter provozu vzdaluje *volnému dopravnímu proudu* a zvyšuje se podíl provozu se *stupněm vytížení* blízkým jedné, kdy se jednotlivá vozidla v dopravním proudu intenzivně ovlivňují. Rozsah sítě pozemních komunikací je podle ŘSD následující:

Tabulka 2.1

SILNIČNÍ A DÁLNIČNÍ SÍŤ ČR k 1.7. 2011	dálnice	rychlostní komunikace	I. třída	II. třída	III. třída	celkem
délka komunikací [km]	633	329	5843	14 660	348	55 583

Významným impulsem byl vstup ČR do Evropské unie 1. května 2004. To znamenalo zjednodušení pohybu přes hranice především pro nákladní kamionovou dopravu. Při současném zavedení výkonového mýta v sousedním Rakousku to znamenalo náhlý a trvalý nárůst intenzit. Dobře je to patrné při porovnání map *zatížení sítě pozemních komunikací v ČR v roce 2000 a 2005*, kde bylo nutné pro zachování přehlednosti zmenšit dvojnásobně měřítko intenzit z 0,5 mm na 0,25 mm pro 2000 voz/den. Nárůst se týká především dálniční sítě, kde jsou běžné nárůsty intenzit o 60 %.

Při *stupni vytížení* komunikací blízkém jedné $a_v \rightarrow 1$ se dopravní proud nachází v oblasti nelineárního dynamického chování a je nestabilní. Charakteristiky dopravního proudu mohou při stejných vnějších parametrech nabývat různých hodnot. I minimální podněty mohou vést k zásadní změně stavu dopravního proudu. Předpisy pro projektování a běžná regulační doporučení nebo opatření pro zvýšení kapacity většinou předpokládají lineární závislosti nebo pracují pouze s empirickými hodnotami. Lepší poznání dějů v dopravním proudu může poskytnout nástroje pro cílené a účinné ovlivňování.

2.2 INTELIGENTNÍ DOPRAVNÍ SYSTÉMY

Inteligentní dopravní systémy a technologie (*ITS* a *ITT*), někdy nazývané dopravně telematické systémy, do jisté míry nahradí intuitivní, náhodné, různorodé a ne přesně definované chování člověka přesnými algoritmy (respektive modely chování), jejichž důsledky pro dopravní proud a pro celou dopravní síť zatím neznáme.

Projekt *ITS v podmínkách dopravně-telekomunikačního prostředí ČR* definuje telematiku takto:
„Telematika je systémově inženýrský obor, zabývající se tvorbou a účelným využitím informačního prostředí pro homeostatické procesy (kompenzace rušivých vlivů pro zachování silných procesů dle definovaných kritérií, např. komfort, ekonomika, atd.) územních celků, až po globální síťová odvětví.“

Existují i četné další definice, ale většina se shoduje, dopravní telematické systémy vykonávají tři základní funkce:

1. sběr informací týkajících se dopravy
2. zpracování těchto informací
3. distribuci těchto informací účastníkům dopravního procesu

Základní cíle jsou tyto:

Snižování dopravní nehodovosti, ochrana životního prostředí a jeho monitoring, zvýšení účinnosti řízení dopravy, zvýšení komfortu jízdy.

Samo slovo telematika se vysvětluje jako složenina dvou slov – *telekomunikace* a *informatika*. Některé aplikace předpokládají přesun části kompetencí a zodpovědnosti z řidiče na automatizované řídicí systémy, v každém případě je podstatou dopravní telematiky distribuce informací, které mají dopravní proud přímo ovlivňovat. Modelování a simulace umožňují lépe poznat děje v dopravním proudu, ověřovat zásahy do něj a předikovat vývoj.

3 ZÁKLADNÍ VELIČINY DOPRAVNÍHO PROUDU A STACIONÁRNÍ HYPOTÉZA

Stav dopravního proudu v místě x a v čase t se popisuje třemi základními veličinami: *hustotou* dopravního proudu $\rho(x,t)$ (počet vozidel na délkovou jednotku – obvykle na kilometr), *rychlostí* $u(x,t)$ (většinou km/h) a *intenzitou* dopravního proudu $q(x,t)$ (počet vozidel, která projedou zkoumaným profilem za jednotku času – většinou za hodinu). Hledání a popis vztahů mezi těmito třemi veličinami je základem teorie dopravního proudu. Při ustáleném dopravním proudu platí:

$$q = u \cdot \rho \quad (3.1)$$

Přitom rychlost dopravního proudu je závislá na hustotě dopravního proudu:

$$u = u(\rho) \quad (3.2)$$

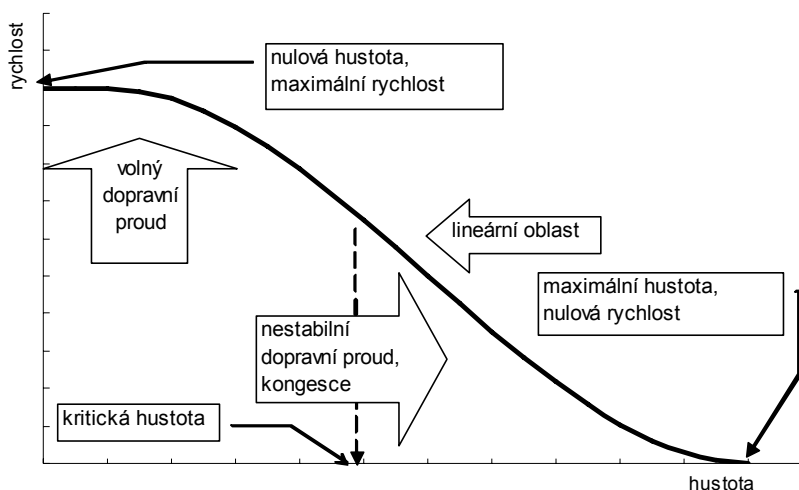
a tedy:

$$q(\rho) = u(\rho) \cdot \rho \quad (3.3)$$

Kromě této základní závislosti je dopravní proud závislý na mnoha dalších okolnostech. Vně vozidla to jsou návrhové parametry komunikace, její okamžitý stav, počasí, denní, týdenní nebo roční doba apod. Dále to jsou okolnosti týkající se jednotlivých vozidel, např. typ a stav vozidla, osobní vlastnosti a stav řidiče a také různé náhodné jevy. Podle výše uvedeného popisu dopravního proudu to znamená, že se podle okolností mění vztah (3.2) – závislost rychlosti dopravního proudu na hustotě. Závislost rychlosti na hustotě je základním vztahem, který nejčastěji explicitně přímo definuje jednotlivé modely dopravního proudu nebo je jeho implicitní součástí. Všechny realistické modely dopravního proudu respektují omezení, která jsou patrná z obrázku ukazujícího obecnou nelineární závislost rychlosti na hustotě.

Nejjednodušší a základní model představuje dopravní proud v jednom jízdním pruhu, ve kterém si vozidla uchovávají své pořadí (nepředjíždějí se) popsany rovnicí (3.1) resp. (3.3). Vozidla nejsou ovlivňována vnějšími ani vnitřními okolnostmi. V rámci předepsaném základní rovnicí existuje množství modelů, které se odlišují tím, jaká je závislost rychlosti na hustotě

v rovnici (3.2). Tato závislost zásadně ovlivňuje chování zvoleného modelu a je předmětem zkoumání, které nepřináší jednoznačný výsledek. Shoda však existuje v základních předpokladech, které jsou vysvětleny dále v textu a jsou ilustrovány v obr. 3.1:

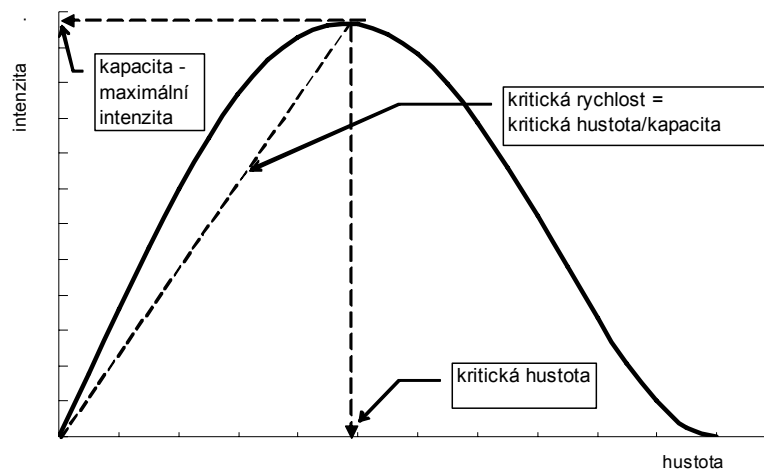


Obr. 3.1 Obecná nelineární závislost rychlosti na hustotě.

- Maximální rychlost (požadovaná rychlost, rychlostní limit, volná rychlost, ...) se dosahuje při hustotě blízké nule. Intenzita je v takovém případě nízká, blíží se nule. Dopravní proud se nachází ve stavu nazývaném volný dopravní proud.
- Maximální hustota je limitována konečným počtem vozidel, který lze umístit na délkovou jednotku vzhledem k nenulové délce vozidel. Kromě toho se započítává i minimální odstup, který mezi sebou vozidla udržují. Při maximální hustotě se dopravní proud zastaví nebo má rychlost blízkou nule. Vzhledem k tomu je intenzita nulová nebo blízká nule. Dopravní proud je ve stavu zácpy (traffic jam), vozidla stojí, pokud se pohybují, tak pouze popojížděním (stop and go).
- Mezi těmito dvěma krajními hustotami rychlost v závislosti na hustotě klesá, většinou se v souladu s empirií uvažuje, že klesá monotónně a spojitě.
- Někde v intervalu od nulové do maximální hustoty existuje optimální hustota z hlediska maximální dosažitelné intenzity (v dopravně inženýrské praxi se hovoří o kapacitě jízdního pruhu). Tato hustota se nazývá kritická.

3.1 FUNDAMENTÁLNÍ DIAGRAMY

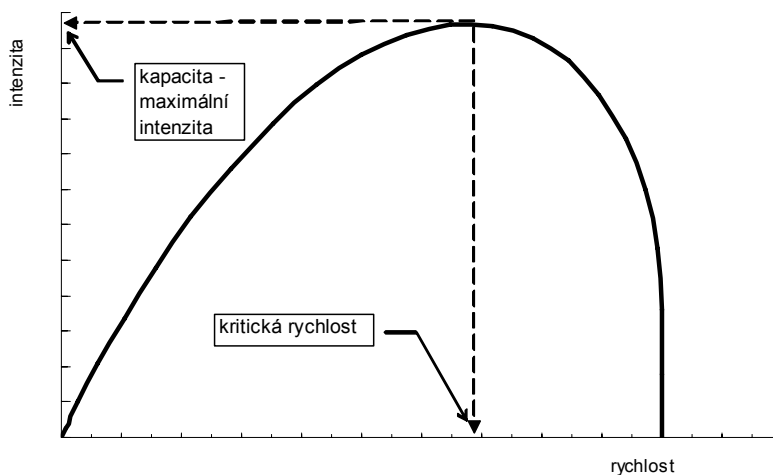
Fundamentální diagramy jsou běžně používaným prostředkem pro popis modelu dopravního proudu. Z hlediska definice modelu je primární vztah hustota – rychlost. Z něho je odvozen vztah hustota – intenzita (viz obr. 3.2). Vzhledem k výše uvedeným podmínkám pro závislost rychlosti na hustotě dopravního proudu je intenzita nulová při nulové hustotě (a maximální rychlosti) a rovněž při maximální hustotě (rychlost je nulová). Pojmem fundamentální diagram bývá většinou označován právě tento vztah, který ukazuje intenzitu, kterou je možno dosáhnout na silnici při dané hustotě. Intenzita, respektive kapacita, je nejdůležitější pro posouzení komunikace. Tato dvojice grafů bývá doplněna závislostí intenzity na rychlosti dopravního proudu (obr. 3.3).



Obr. 3.2 Obecný fundamentální diagram, který zobrazuje vztah mezi hustotou a rychlostí dopravního proudu. Při tzv. kritické hustotě se dosahuje maximální intenzity (kapacity). Směrnice přímky spojující počátek s libovolným bodem na křivce je rychlostí příslušnou pro tuto hustotu a intenzitu. Zde je vykresleno pro maximální intenzitu – kapacitu. Fundamentální diagram je odvozen ze vztahu hustoty a rychlosti z předcházejícího obr. 3.1.

Při popisu dopravního proudu fundamentálními diagramy tohoto typu se většinou implicitně přijímají tyto předpoklady:

- Dopravní proud má tendenci dospět do ustáleného stavu, který odpovídá fundamentálnímu diagramu.
- Pokud měříme v reálném dopravním proudu dostatečně dlouhou dobu, zjistíme hodnoty odpovídající fundamentálnímu diagramu.
- Případné odchylky hustoty, intenzity a rychlosti, které vždy naměříme (pro kratší intervaly měření jsou odchylky větší), mají příčinu pouze v odlišných charakteristikách vozidel (technické parametry vozidla, schopnosti, momentální psychický stav a svobodná vůle řidiče,...) Tyto odlišné charakteristiky lze do modelu zavést statisticky. Tím se model stane úplným.



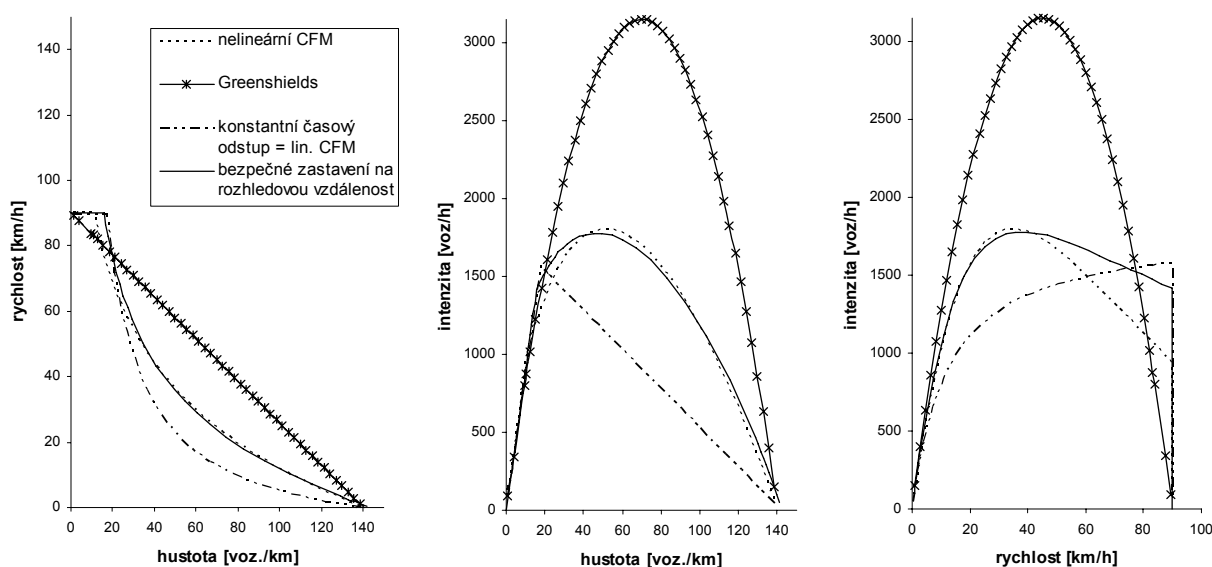
Obr. 3.3 Dalším diagramem používaným pro popis dopravního proudu je závislost intenzity na rychlosti. Diagram je přímo odvozen ze závislosti rychlosti na hustotě uvedené v obr. 3.1.

Data naměřená v reálném dopravním proudu se od teoretických diagramů odlišují jednak fluktuacemi (v závislosti na zvoleném měřicím intervalu), ale i principiálně jiným průběhem. Často lze identifikovat v oblastech nad kritickou hustotou výskyt dvou nebo více odlišitelných stavů. K „homogenizaci“ dopravního proudu, při které by se všechna vozidla pohybovala stejnou rychlostí a ve stejných odstupech, často nedochází ani za nízkých ani za vysokých hustot.

3.2 STACIONÁRNÍ MODELY HOMOGENNÍHO DOPRAVNÍHO PROUDU

Výše uvedené implicitní předpoklady umožňují formulovat celou řadu modelů pracujících se *stacionární hypotézou*. Podle ní se rychlostní pole $u(\rho)$ rychle ustálí na konstantní hodnotě shodné pro všechna vozidla a totéž platí pro hustotu, respektive pro vzdálenosti mezi vozidly. Systém se dále nevyvíjí v čase. Hypotéza se nezabývá mechanismem ustálení, i když by patrně nebyl tak triviální, jako je triviální samotný předpoklad ustálení. Jak empirické, tak simulační výsledky naznačují, že stacionární hypotéza je příliš silný zjednodušující předpoklad, který není v souladu s realitou. Přesto se velmi často používá například v těchto modelech, které jsou podrobněji popsány v habilitační práci:

- Greenshieldsův model
- model konstantního časového odstup, který je totožný s lineárním CFM (Car Following Model)
- nelineární CFM
- model pro bezpečné zastavení na rozhledovou vzdálenost



Obr. 3.4 Porovnání fundamentálních diagramů výše uvedených modelů dopravního proudu. Při stejných okrajových podmínkách (maximální rychlost a maximální hustota) jsou průběhy odlišné.

Vyšetřování dopravního proudu s použitím fundamentálních diagramů, jak je uvedeno výše, hledá vztah mezi rychlostí a hustotou (respektive vzdáleností mezi vozidly). Implicitním předpokladem je ustálení dopravního proudu. Nevyšetřuje se způsob, jakým reagují vozidla na skutečnost, že hustota (vzdálenost mezi vozidly) neodpovídá rychlosti dopravního proudu (nebo naopak rychlost neodpovídá hustotě), tedy, jakým způsobem systém dospěje do stacionárního stavu. To však má velký význam pro děje v dopravním proudu.

4 MODELOVÁNÍ DOPRAVNÍHO PROUDU

Používají se dva zásadně odlišné způsoby modelování proudu.

Makroskopický přístup nahlíží na dopravní proud jako na kontinuum definované pomocí obecných předpokladů. Ty mohou být odvozeny dedukcí z okrajových podmínek, naměřených hodnot v reálném proudu nebo mohou být založeny na analogiích s fyzikálními transportními jevy – např. prouděním kapalin či plynů.

Druhý přístup považuje dopravní proud za systém skládající se z jednotlivých prvků (vozidel). Každé vozidlo je definováno svými vlastnostmi, z nichž klíčovou je závislost akcelerace (resp. decelerace) na stavu blízkého okolí (v nejjednodušším případě relativní rychlost a odstup od předcházejícího vozidla). Některé používané algoritmy se pokoušejí vystihnout pozorované a známé vlastnosti reálného proudu, jiné se pokoušejí vyjít z vlastností reálných vozidel (jejich dynamiky a fyziologických a psychologických schopností řidiče). Modely vycházející z předpokladů o jednotlivých vozidlech se nazývají *mikroskopické*.

4.1 ROVNICE KONTINUITY, MAKROSKOPICKÉ MODEL Y

Závislost rychlosti dopravního proudu na hustotě je základem *makroskopického popisu* dopravního proudu. Obecně musíme předpokládat (v souladu s empirií), že hustota, rychlost a intenzita jsou lokální veličiny, které se mění v závislosti na čase a na poloze. Přitom jsou však svázány *zákonem zachování počtu vozidel*, ze kterého vyplývá rovnice kontinuity:

$$\frac{\partial \rho(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial q(x,t)}{\partial x} = 0 \quad (4.1)$$

Tato parciální diferenciální rovnice (*rovnice kontinuity*) vyjadřuje vztah mezi hustotou a intenzitou dopravního proudu v libovolném místě x a v libovolném čase t . Typicky se používá rovněž při vyšetřování proudění kapalin nebo plynů.

Použijeme-li pro závislost rychlosti na hustotě lineární Greenshieldsův vztah, dostaneme po úpravě známou *Burgersovu rovnici* dopravního proudu:

$$\frac{\partial f(x,t)}{\partial t} + f(x,t) \frac{\partial f(x,t)}{\partial x} = D \frac{\partial^2 f(x,t)}{\partial x^2} \quad (4.2)$$

kde lokální hustota dopravního proudu je jednoduše závislá na funkci $f(x,t)$.

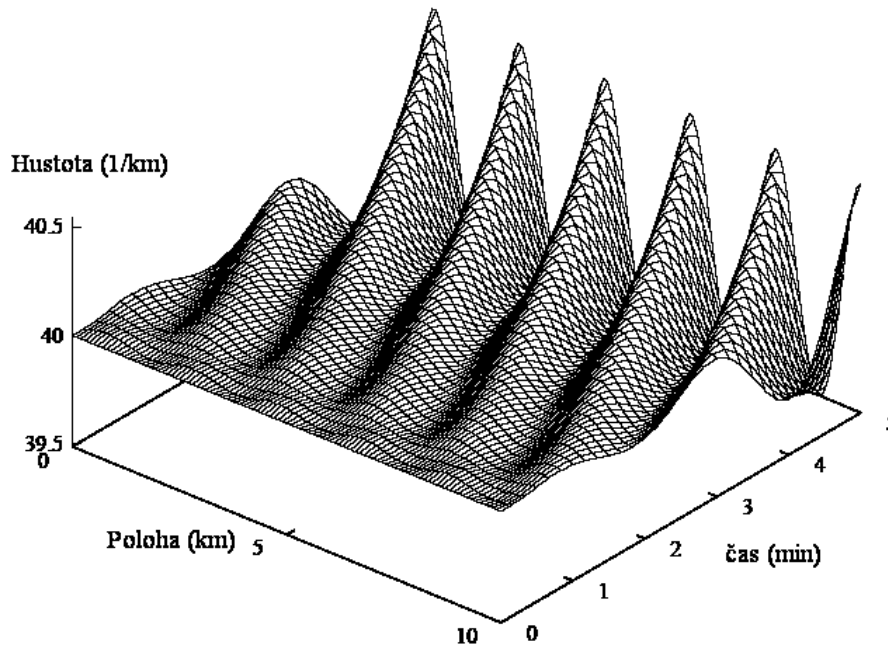
Payne obohatil rovnice o další „konvekční“ člen, který vyplývá z mikroskopického modelu, Phillips navrhl transportní model rozvinutím Prigoginova modelu vycházejícího z klasické Boltzmannovy kinetické teorie. I v současné době jsou rozvíjeny další velmi sofistikované makroskopické modely, které by měly postihnout pozorované jevy v dopravním proudu a zároveň byly dostatečně numericky stabilní tak, aby bylo možné predikovat jeho alespoň bezprostřední vývoj. Přidávají se další členy představující např. analogii k viskozitě nebo vyjadřující vzájemnou interakci vozidel, která nemá v hydrodynamice obdoby.

Většinu dnes používaných modelů lze vyjádřit obecným vztahem mezi rychlostním polem, lokálním dopravním „tlakem“ a hustotou dopravního proudu.

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial t} + \underbrace{u(x,t) \frac{\partial u(x,t)}{\partial x}}_{\text{transport}} + \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x}}_{\text{tlak}} = \underbrace{\frac{1}{\tau} (u_e - u)}_{\text{relaxace}} \quad (4.3)$$

Jednotlivé konkrétní modely pak definují různým způsobem zejména funkci dopravního tlaku $P(\rho)$ a rovnovážnou rychlost při dané hustotě $u(\rho)$.

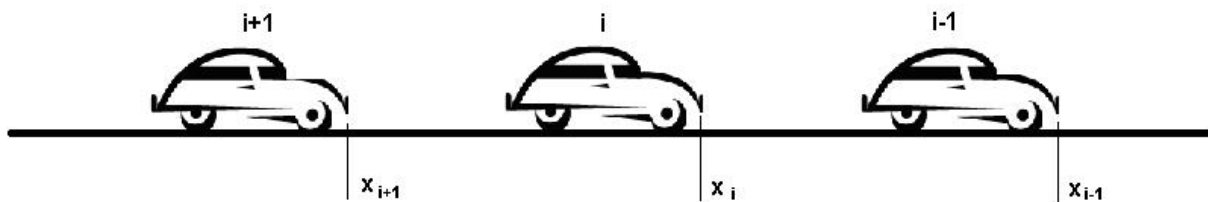
Výhodu makroskopického přístupu spatřují jeho zastánci zejména v možnosti popsat jednou diferenciální rovnicí (nebo jejich soustavou) všechny možnosti vývoje dopravního proudu za všech počátečních podmínek a parametrů. Je však sporné, zda je předpoklad možnosti takového sjednocení legitimní – analytická složitost a spekulativnost celého postupu se zdá být také vysokou daní za estetiku klasické teorie.



Obr. 4.1 Pro širokou třídu modelů podle vycházejících z Burgersovy rovnice je homogenní proud pro dostatečně vysoké hustoty nestabilní. Spontánní vznik vln stop and go je řešením makroskopického modelu, jak uvádí např. Oguchi. Je patrný spontánní vznik kongescí. S rostoucím časem se zvětšují lokální maxima hustoty a zároveň se tyto kongesce pohybují zpět, proti směru pohybu dopravního proudu.

4.2 MIKROSKOPICKÉ MODELY

V dopravních simulacích se dnes nejčastěji používá třída mikroskopických modelů, která je založena na popisu chování jednotlivých vozidel (resp. jejich řidičů) v dopravním proudu. To umožňuje pracovat nejen s vozidly s identickými vlastnostmi, ale předpis pro jejich reakci na okolní podmínky se může měnit zvoleným náhodným nebo předepsaným způsobem.



Obr. 4.2 Schéma označování vozidel v dopravním proudu

Reakcí je změna rychlosti (respektive zrychlení) zkoumaného n -tého vozidla v závislosti především na jeho rychlosti, na polohách okolních vozidel (na vzdálenosti od nich) a na jejich rychlostech (na rozdílu rychlostí):

$$\ddot{x}_i(t) = F(\dots, \dot{x}_{i+1}, \dot{x}_i, \dot{x}_{i-1}, \dots, x_{i+1}, x_i, x_{i-1}, \dots) \quad (4.4)$$

Nejrozšířenějším typem mikroskopických modelů jsou tzv. *modely sledu vozidel* (Car Following Models – CFM). Popisují chování i -tého vozidla v závislosti na vozidle předcházejícím.

Základní rozdělení CFM modelů je dáno tím, zda předepisují vozidlu rychlost nebo akceleraci vozidla v závislosti na nejbližším okolí. V následujícím textu zmiňujeme oba typy CFM modelů, přitom akcelerační modely se ukazují jako úspěšnější.

Modely optimální akcelerace:

- Původní CFM modely
- Psycho–fyziologické modely Wiedemannův a Fritzscheho s nespojitým průběhem akcelerace
- Model IDM (Intelligent Driver Model)

Modely optimální rychlosti:

- Model OVM
- Gippsův model

Pro spolehlivější přiblížení reálným dějům skýtají modely optimální akcelerace nespornou výhodu v tom, že umožňují kontrolu akcelerace tak, aby se udržela v realistických hodnotách. Modely optimální rychlosti v každém výpočetním kroku určují optimální rychlost, její změna mezi jednotlivými kroky však není nijak omezena a dochází i k překročení fyzikálních mezí nebo rychlému střídání kladné a záporné akcelerace. Původní modely CFM, ačkoli jsou to modely akcelerační, neudržují akceleraci v reálných mezích za všech podmínek. Psycho–fyziologické modely vědomě zavádějí nespojitý průběh zrychlení, což se ukazuje jako problematické při simulaci s identickými vozidly za cyklických podmínek. Z uvedených modelů se jako nejvýhodnější pro simulace jeví model IDM, který ve všech režimech produkoval akceleraci v realistických a spojitých hodnotách s bezkolizním průběhem simulace. Rovněž se osvědčil při simulacích jízdy za reálnými změřenými vozidly.

IDM model byl zvolen za základ simulací. Akceleraci určuje součtem akceleračního a deceleračního členu takto:

$$a_i = a_{iacc} + a_{idec} \quad (4.5)$$

Přitom:

$$a_{iacc} = a_{i0} \left[1 - \left(\frac{v_i}{v_{i0}} \right)^\delta \right] \quad (4.6)$$

$$a_{idec} = -a_{i0} \left(\frac{\Delta s_{iopt}}{\Delta s_i} \right)^2 \quad (4.7)$$

$$\Delta s_{iopt} = s_{i0} + v_i T_i + \frac{v_i \Delta v_i}{2\sqrt{a_{i0} b_{i0}}} \quad (4.8)$$

Takto navržený model splňuje obecně formulované požadavky na model dopravního proudu:

- bezkoliznost prováděných simulací v celém spektru možných parametrů a počátečních podmínek,
- fyzikálně rozumné hodnoty rychlostí a zrychlení vozidel v průběhu simulace,
- asymetričnost modelu – průběh akcelerace odlišný od decelerace (obvykle je přípustná razantnější decelerace např. v případě hrozící kolize),
- vznik globálních stavů odpovídajících reálnému pozorování – nelinearita modelu (vlny *stop and go*, spontánní vznik kongescí při nadkritických hustotách, hystereze intenzity dopravního proudu při nadkritické a podkritické hustotě apod.).

5 MĚŘENÍ POHYBU VOZIDEL POMOCÍ SATELITNÍCH METOD

Pro simulaci dopravního proudu je zapotřebí ověřit navržený model vzhledem k reálným datům a nastavit jeho parametry tak, aby odpovídaly realitě. Nejčastěji dostupná data pocházejí z profilového měření, kde jsou k dispozici průměrné hodnoty rychlosti, intenzity a hustoty dopravního proudu (za zvolený časový interval). Ke kalibraci statických makroskopických modelů mohou být tyto údaje použity, ale pro mikroskopický dynamický model tímto způsobem relevantní data získat nelze.



Obr. 5.1 Antény GPS jsou umístěny na nosičích na střeše vozidel. Vlastní přístroje jsou umístěny ve vozidle. Vozidla jsou na fotografii zachycena při klidovém měření minimální vzdálenosti mezi vozidly (kalibraci). Pro měření se používala až tři vozidla a čtyři aparatury GPS – jedna jako referenční v blízkosti silnice.

Základem dynamického modelu je chování jednotlivého vozidla v závislosti na jeho blízkém okolí. Lze oprávněně předpokládat, že akcelerace vozidla je závislá zejména na vlastní rychlosti vozidla $v(t)$, rozdílu rychlostí zkoumaného a předcházejícího vozidla $\Delta v(t)$ a na vzdálenosti $\Delta x(t)$ (mezeře) mezi vozidly:

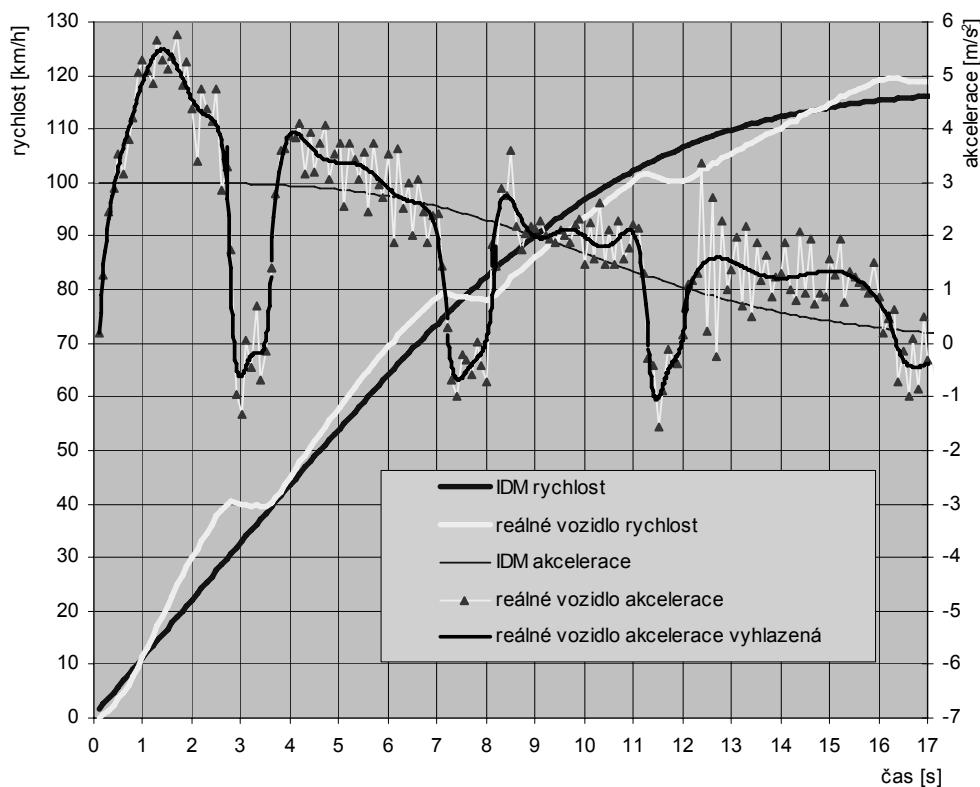
$$a(t) = a(v(t), \Delta v(t), \Delta x(t)) \quad (5.1)$$

Pro posouzení modelu tedy potřebujeme průběžná reálná data nejen o rychlosti obou vozidel, ale i o jejich poloze v prostoru, resp. o jejich vzájemné vzdálenosti. Je zřejmé, že taková data lze získat pouze měřením na jedoucích vozidlech, pro spolehlivou synchronizaci a univerzalitu jsme použili metodu RTK pro GPS měření s frekvencí 10 měření za sekundu a přesností 0,01 m. Průběh rychlosti a akcelerace při rozjezdu se snahou o maximální akceleraci je zachycen v obr. 5.2.

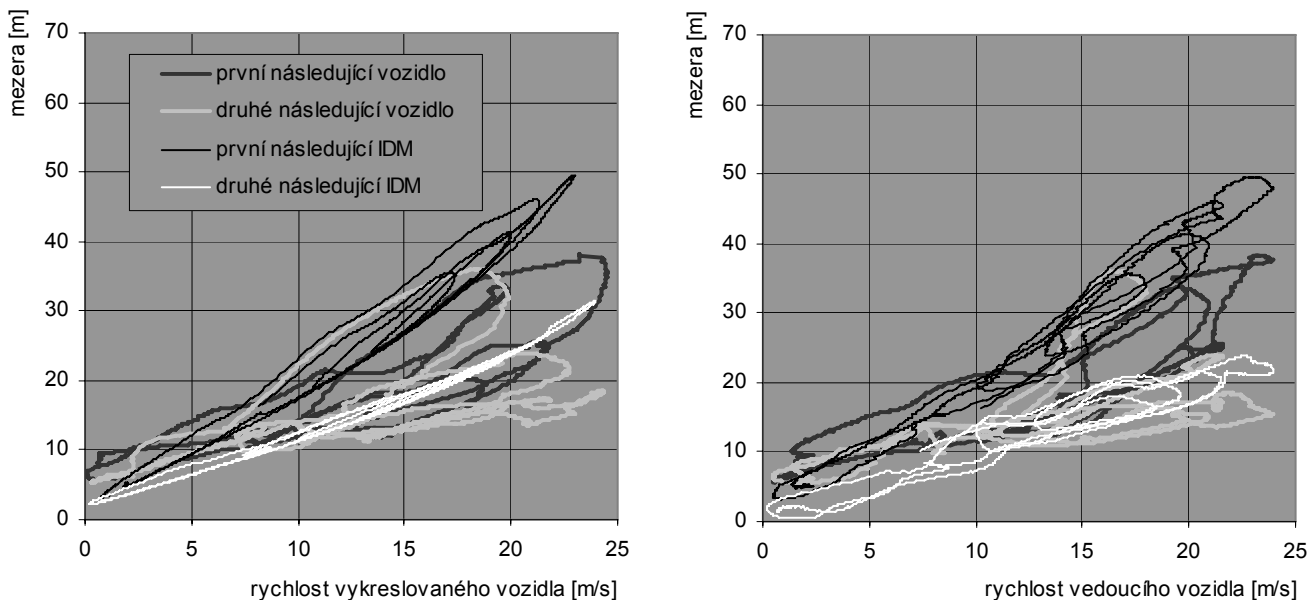
Zavedli jsme další způsoby zobrazení naměřených výsledků, které umožňují novou interpretaci. Jsou to:

1. Závislost vzdálenosti mezi vozidly na rychlosti vozidel (viz obr. 5.3). To odpovídá základnímu postulátu teorie dopravního proudu, který konstatuje závislost rychlosti dopravního proudu na hustotě dopravního proudu (inverze vzdálenosti mezi vozidly) a odtud odvozuje fundamentální diagram (závislost intenzity na hustotě). Použité zobrazení *rychlost – mezeře* potvrzuje existenci předpokládaného vztahu, ale je patrné, že nedochází k ustálení.
2. Závislost změřené vzdálenosti vozidel a rozdílu rychlosti vozidel (viz obr. 5.4) ukazuje náznorně přetrvávající a stále přítomné „oscilace“ vozidel v dopravním proudu kolem pozice,

kterou považují za optimální pro danou rychlost. Zároveň tohoto zobrazení používají *psycho-fyziologické* modely (Wiedemann, Fritzsche) pro určení režimu vozidla. Naše měření potvrzují popisovaný charakter chování vozidel v jízdním proudu (viz obr. 5.4).

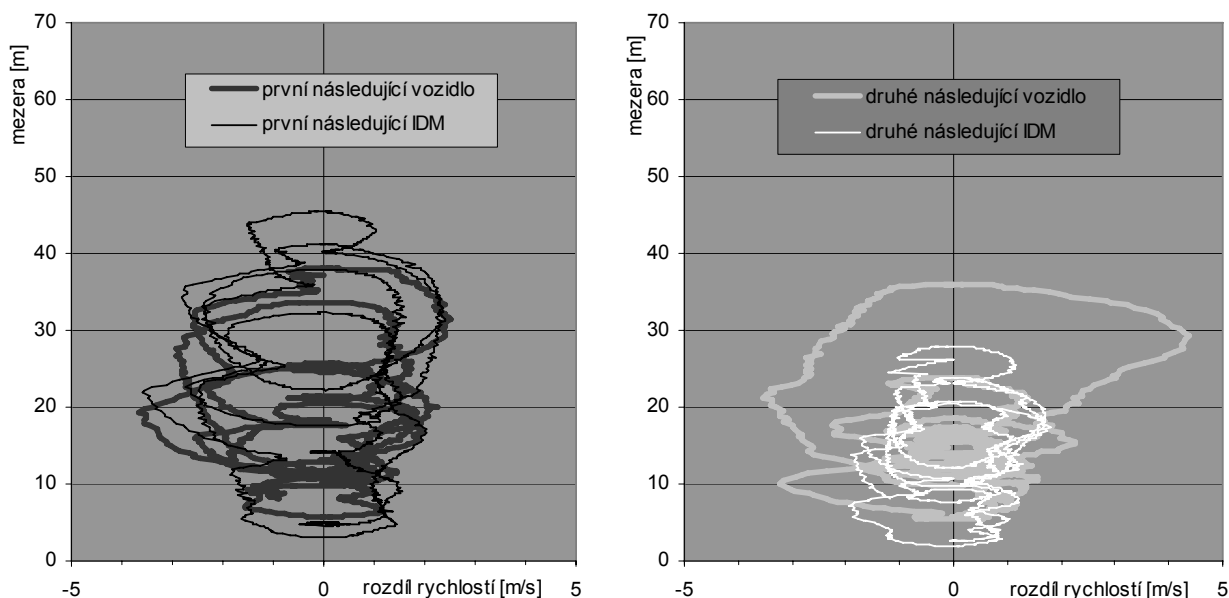


Obr. 5.2 Z naměřených poloh vozidel se dopočítal postupně rychlost a akcelerace. V tomto obrázku je záznam měření maximální akcelerace a porovnání s IDM modelem.



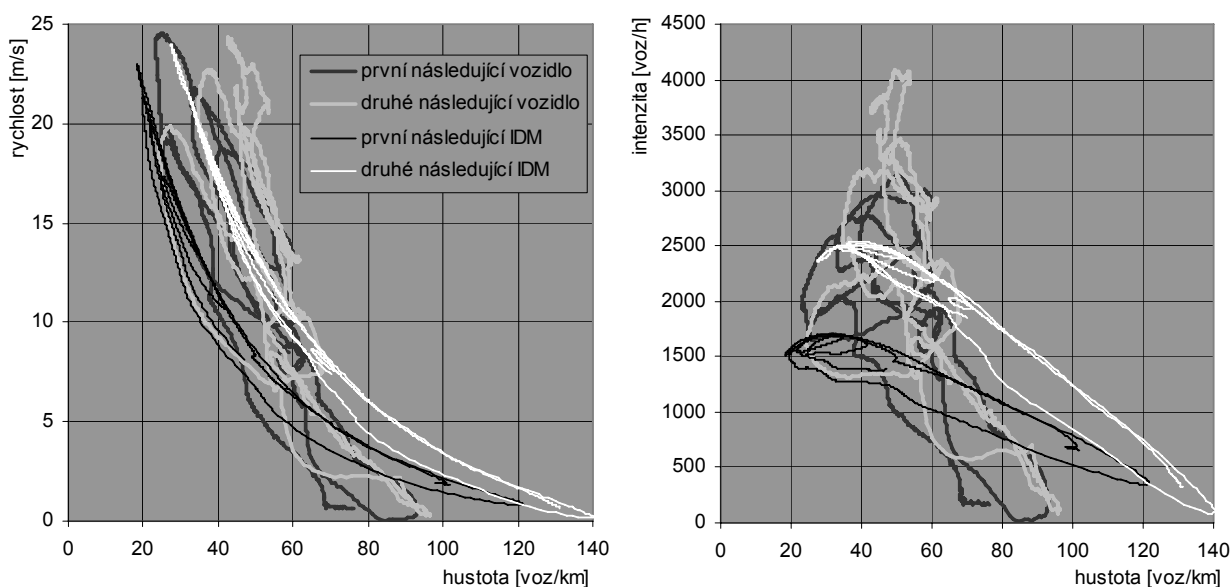
Obr. 5.3 Závislost mezery mezi vozidly na rychlosti měřeného vozidla nebo na rychlosti vedoucího vozidla. Data pocházejí ze stejné 170 sekundové měřicí sekvence. Křivky kreslené tenče jsou výsledkem výpočtu modelu IDM kalibrovaného tak, aby odpovídal reálnému vozidlu.

Z dalších obrázků je patrná závislost vzdálenosti mezi vozidly na rychlosti, v prvním je vykreslena mezeru pro rychlost hodnoceného vozidla. Ve druhém obrázku je velikost mezery vynášena v závislosti na rychlosti zde nezobrazovaného vedoucího vozidla, což odpovídá Wagnerově metodice vyhodnocení. Při Wagnerově způsobu zobrazení poněkud zaniká skutečnost, že modelované vozidlo se chová plynulým, racionálním způsobem, který vyhledává správnou kombinaci rychlosti a mezery mezi vozidly přesněji, než řidič.



Obr. 5.4 Závislost mezery mezi vozidly na relativní rychlosti vozidel (graf $dV-dS$). V každém obrázku jsou silně vykresleny změřené hodnoty a tenké hodnoty spočítané pro modelované vozidlo podle IDM.

Standardním způsobem zobrazení používaným pro popis dopravního proudu je závislost rychlosti na hustotě. Tato závislost je vlastně definiční závislostí modelu dopravního proudu.



Obr. 5.5 Závislost lokální rychlosti na lokální hustotě a lokálně počítaný fundamentální diagram pro měřená vozidla a simulovaná vozidla.

Fundamentální diagram je počítaný a vykreslovaný vždy pro rychlost a lokální hustotu jednoho vozidla. Zde je patrný největší nesoulad mezi reálnými vozidly a mezi modelem IDM. Spočívá především ve schopnosti modelu udržovat velmi malé rychlosti při vysoké hustotě. Reálná vozidla

toho nejsou schopná, při poklesu rychlosti k hodnotám kolem $2,5 [m/s]$ zastavují, i když by bylo teoreticky možné udržovat jízdní proud při nižších rychlostech. Protože jsou parametry modelovaných vozidel kalibrovány tak, aby odpovídaly realitě v celkovém výsledku, je kompenzována nižší výkonnost reálných vozidel při vysokých hustotách nižší výkonností modelu při nízkých hustotách. To je velmi dobře patrné především ve fundamentálním diagramu *hustota–intenzita*.

V následujících obrázcích jsou vykresleny diagramy *relativní rychlost (rozdíl rychlostí) – meze- ra mezi vozidly*, obrázky zobrazují stejnou, již dříve použitou 170 sekundovou měřicí sekvenci. V prvním obrázku jsou pouze dvě měřená následující vozidla, ve druhém obrázku jsou navíc spočítána a vykreslena dvě simulovaná vozidla za vozidly měřenými.

6 IDM SIMULACE DOPRAVNÍHO PROUDU

Pro vlastní simulaci bylo vytvořeno programové prostředí v jazyce Java kvůli jeho snadné dostupnosti, jednoduchosti a portabilitě v prostředí internetu. Každé vozidlo je představováno objektem s vlastními parametry a stavovými veličinami a systém vozidel je představován tzv. vázaným seznamem tak, aby bylo možné dynamicky měnit počet vozidel v systému.

Jádrem výpočtu je určení akcelerace podle vztahů (4.5) až (4.8). Ta se počítá pro každé simulované vozidlo v každém kroku v závislosti na stavu předchozího a počítaného vozidla. Výpočet se opakuje po časovém kroku, jehož velikost musí na jedné straně zaručit dostatečnou přesnost výpočtu a stabilitu simulovaného dopravního proudu, na druhé straně musí umožňovat dostatečnou rychlost výpočtu. Jako přiměřený kompromis se osvědčil časový krok v rozsahu $0,005$ až $0,05$ s pro různé typy výpočtů.

Každé vozidlo je charakterizováno čtveřicí parametrů: a_{Max} , T_{Opt} , v_{Max} , a_{Min} . Pro každé vozidlo je nutno udržovat informace o jeho stavu, tj. o poloze a o rychlosti.

Simulace bere do úvahy, že reálný řidič vozidla není schopný reagovat na stav okolí okamžitě. Proto je v modelu zavedeno zpoždění reakce. Akcelerace určená podle (4.8) je uložena v datové struktuře typu pole a je použita pro další výpočet rychlosti a polohy vozidla po n výpočetních krocích o délce h , kde součin $n \times h$ určuje reakční dobu (dobu zpoždění).

Jádro výpočtu je použito pro různé způsoby zobrazení charakteristik dopravního proudu a pro různé typy datových výstupů.

6.1 ZOBRAZENÍ SIMULACÍ

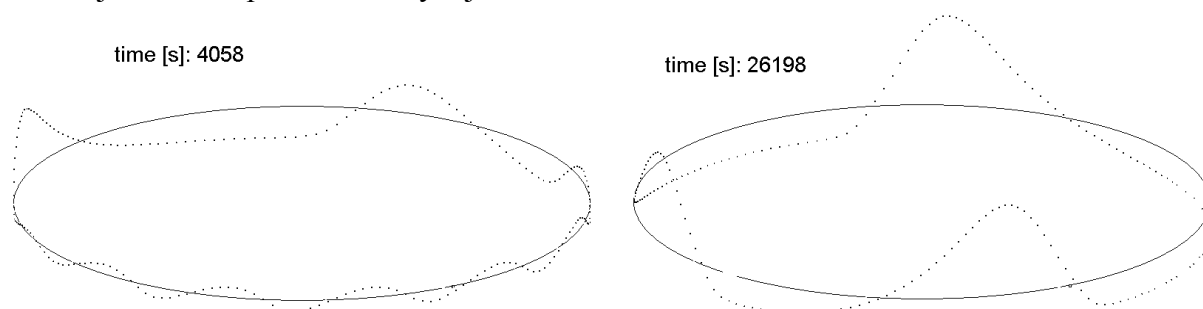
Řešení přijaté pro simulaci spočívá v zavedení *cyklických okrajových podmínek*, kdy stav „vedoucího“ vozidla ve zkoumaném vzorku z dopravního proudu je odvozen ze stavu „posledního“ vozidla. Praktickou realizaci lze popsat jako uzavřenou kruhovou dráhu o dostatečně velkém poloměru, na které se pohybuje konečný počet samostatných vozidel.

Poloměr kruhové dráhy při simulaci je 1 000 m, celková délka dráhy je více než 6,28 km a lze tedy předpokládat, že chování systému není příliš zkresleno korelací prvního a posledního vozidla. Počet vozidel je volitelný pro zkoumání různých hustot dopravního proudu. Pro vyšetřování hustot až do hodnoty 100 vozidel/km bylo nicméně nutné simulovat pohyb i více než 600 vozidel. Rychlost výpočtu samozřejmě klesá s rostoucím počtem vozidel, nicméně i při maximálních počtech vozidel probíhal výpočet rozumnou rychlostí při použitém časovém kroku.

Příklad jedné z používaných animací je v obrázku. Testovací okruh je zobrazen jako elipsa, jednotlivá vozidla jsou vykreslena body, jejichž výška nad (pod) elipsou je dána inverzí vzdálenosti od předchozího vozidla (lokální hustotou).

Minimální rychlost vozidla je $8,4$ m/s ($30,2$ km/h), maximální rychlost je $14,8$ m/s ($53,2$ km/h), průměrná rychlost každého vozidla při projetí jednoho okruhu je $11,9$ m/s ($42,9$ km/h).

Zajímavé je zobrazení vývoje hustotního pole vozidel v čase: dráhu rozvineme do úsečky, v níž zaznamenejeme polohu každého vozidla jedním bodem. Po zvoleném časovém intervalu (počtu kroků h) obdobně vyneseme další řádek hustotního pole. Po dostatečně dlouhém intervalu vznikne vzor dávající dobrou představu o vývoji rozložení vozidel v celé dráze.



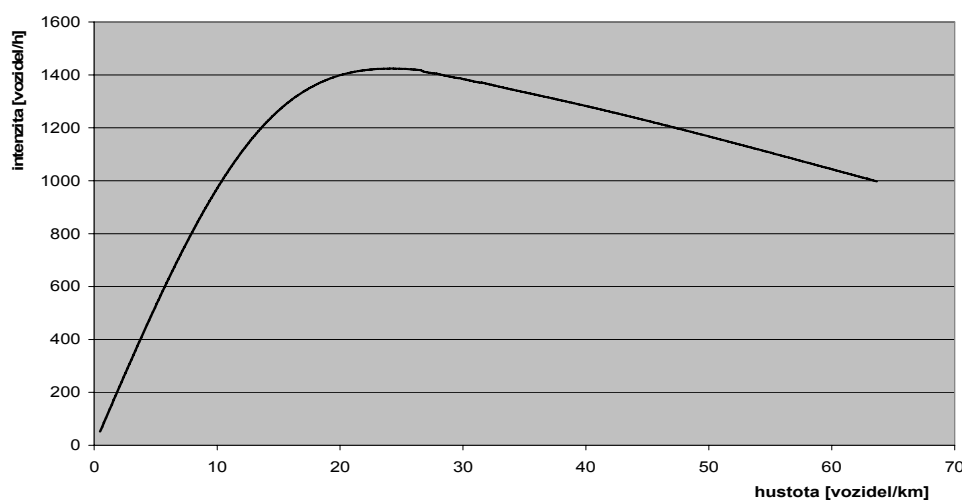
Obr. 6.1 Snímky z animace rozložení hustoty. Plná elipsa vyjadřuje úroveň průměrné hustoty, pro jednotlivé pozice vozidel jsou vyneseny lokální hustoty. Nad elipsou jsou vidět spontánně vznikající lokální kongesce. Na okruhu se pohybuje 200 identických vozidel, na začátku experimentu byla vozidla rovnoměrně rozmístěna s výjimkou jedné mezery zvětšené o 60 m. Systém se z úvodního stavu vyvíjí přes vznik několika nevýrazných kongescí (první snímek) až k ustálenému stavu se třemi stabilními výraznými kongescemi. Ty se pohybují konstantní rychlostí proti dopravnímu proudu.

Pro zjištění rychlosti kongescí (analogie grupové rychlosti vln v disperzním prostředí) jsme použili polohu „těžiště“ útvaru zobrazujícího hustotu, které se ve stacionárním stavu pohybuje synchronně s hustotními fluktuacemi (kongescemi):

$$X = l \cdot \arctg \frac{\sum \Delta x_i \sin(x_i / l)}{\sum \Delta x_i \cos(x_i / l)} \quad (6.1)$$

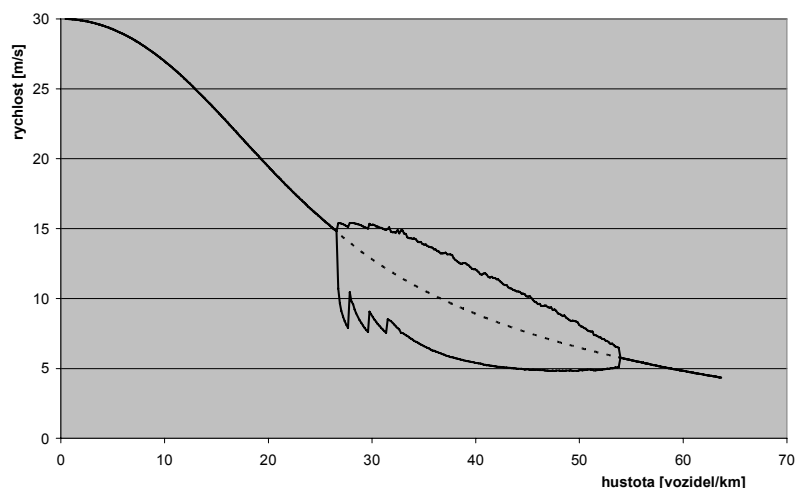
kde l je délka dráhy, x_i a Δx_i poloha a odstup i -tého vozidla v proudu.

6.2 HUSTOTA, RYCHLOST A INTENZITA PŘI SIMULACI



Obr. 6.2 Závislost simulované intenzity dopravního proudu na průměrné hustotě – fundamentální diagram.

Základními charakteristikami dopravního proudu jsou závislost rychlosti a intenzity na hustotě dopravního proudu, v této kapitole je tím méněna střední hustota dopravního proudu na simulovaném okruhu. Z následujících obrázků je patrný kvantitativní souhlas s experimentálními hodnotami maximální intenzity, avšak pokles intenzity při vyšších hustotách je v reálném proudu



Obr. 6.3 Závislost střední, maximální(horní větev) a minimální (dolní větev) rychlosti vozidla na průměrné hustotě.

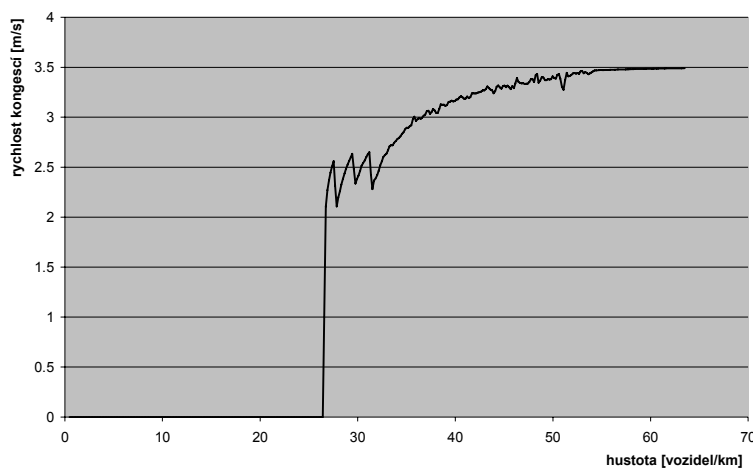
dramatičtější. Při hustotách vyšších než 27 voz/km dochází ke spontánnímu vzniku kongescí, což se projevuje existencí různých rychlostí pro různá vozidla, v obrázku je vykresleno maximum a minimum hodnot dosahovaných na okruhu. Rychlost kongescí v ustáleném stavu je vždy záporná. Rychlost kongescí je závislá na hustotě a mění se skokem při změně počtu kongescí.

6.3 OPRÁVNĚNOST POUŽITÍ CYKlickÝCH PODMÍNEK

Při simulaci se zavedl předpoklad *cyklických okrajových podmínek*, což odstranilo nutnost při pokusných simulacích definovat uměle chování vozidel v okolí simulovaného vozidla. Všechny děje pozorované v *cyklickém modelu* vycházejí z autonomního chování všech simulovaných vozidel. Při simulaci se pouze definují výchozí podmínky a vlastnosti jednotlivých vozidel, další vývoj probíhá bez zásahu zvenčí. Lze se domnívat, že při dostatečně velkém poloměru a délce okruhu pro simulaci budou děje kvalitativně i kvantitativně shodné s ději na dostatečně dlouhé přímé dráze při stejné hustotě. Simulace na různě dlouhých okruzích to prokázaly, kvalitativní charakteristiky se s rostoucí délkou nemění. Dále se ukázalo, že pro poloměry větší než 4 000 m dochází i k ustálení kvantitativních parametrů (viz obr.6.5).

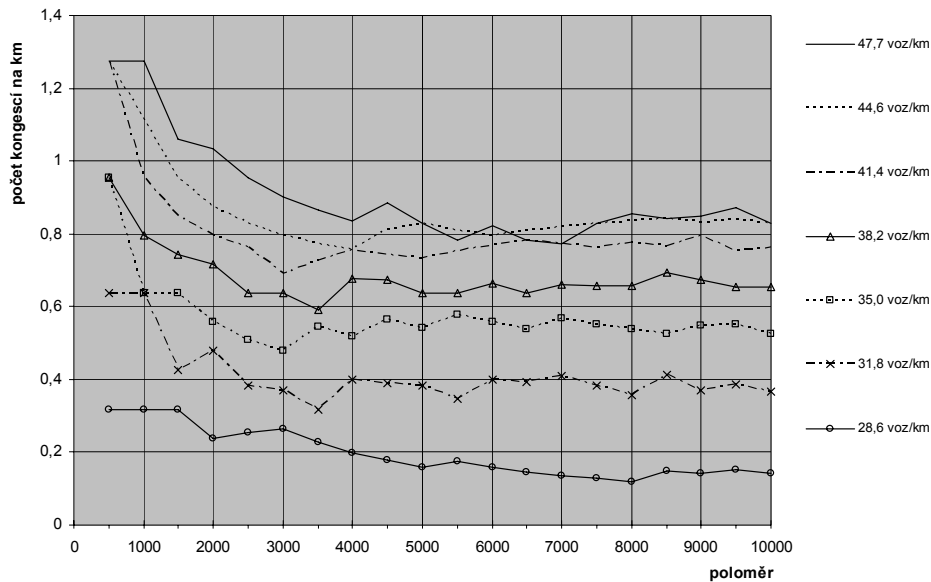
6.4 NELINEÁRNÍ JEVY

Základní simulační experiment byl proveden na systému s maximálním počtem 400 vozidel, tj. s hustotou 63,7 vozidel/km. Ustálení proudu bylo indikováno ustálením střední kvadratické od-



Obr. 6.4 Závislost rychlosti kongescí v ustáleném stavu na střední hustotě.

chytky odstupů od průměrné hodnoty. Za ustálení byl považován rozdíl mezi jednotlivými cykly (průjezdem referenčního vozidla počátkem) menší než 10^{-5} . Po každém ustálení bylo ze systému odstraněno jedno vozidlo se zachováním stávajícího stavu ostatních vozidel. Vzniklá mezera byla rychle zaplněna, přesto však vzniklá nerovnováha postačovala na přeskok systému do blízkých stavů s různým počtem kongescí. Pro srovnání byl proveden experiment, kdy po každé změně počtu vozidel byl nastaven nový počáteční stav s vozidly v klidu homogenně rozloženými podél jízdní dráhy.



Obr. 6.5 Závislost četnosti kongescí na poloměru a délce simulačního okruhu pro různé hustoty.

7 POROVNÁNÍ IDM S VYBRANÝMI MODELY

Mírou úspěšnosti modelu je jeho schopnost věrohodně simulovat reálné děje. Základní požadavky na model jsou ve zkratce bezkoliznost, dodržení fyzikálně rozumných akcelerací, asymetričnost akcelerace a decelerace, nelinearita modelu. Vzhledem k dlouhodobým a poměrně dobrým zkušenostem s modelem IDM a vzhledem k jeho úspěšné implementaci do simulačního software, byl tento zvolen jako základ porovnání s dalšími modely dopravního proudu.

Zkoumaly se tři modely používané v komerčním software a popsané v odborné literatuře – Wiedemannův, Fritzscheho jako zástupci *akceleračních psycho-fyziologických* modelů a Gippsův model – *rychlostní*. Přitom se modely porovnávaly s hodnotami naměřenými na reálných vozidlech, dále se porovnávalo jejich chování s modelem IDM, podrobily se testu dojíždění simulovaného vozidla jedoucím konstantní rychlostí a nakonec byly implementovány do simulačního software pro kruhovou dráhu při *cyklických okrajových* podmínkách. Za základní prostředek porovnání modelů byl zvolen $dV-dS$ diagram, který má dobrou vypovídací hodnotu a je zároveň základem *psycho-fyziologických* modelů.

Ačkoli se zkoumané modely Wiedemannův, Fritzscheho a Gippsův s úspěchem používají v komerčních produktech, ukázalo se, že při popisu chování jednotlivých vozidel nejsou spolehlivé a věrohodné. Dochází u nich k nerealistickým fluktuacím akcelerací. Při implementaci do simulačního software s cyklickými okrajovými podmínkami nezaručují stabilní a bezkolizní průběh simulace. Pro první dva uvedené modely (jsou oba psycho-fyziologického typu) je to způsobeno nespojitou změnou akcelerace při přechodu mezi režimy. Třetí model je typu *optimal velocity*, což se projevuje opět nespojitým průběhem akcelerace, která jen nutná pro změnu rychlosti mezi jednotlivými výpočetními kroky. Navíc v některých situacích se dostává akcelerace několikanásobně přes realistické meze.

8 SIMULACE PRŮJEZDU KŘÍŽOVATKOU

Další naprogramovanou aplikací IDM modelu je simulace průjezdu vozidla světelně řízenou křižovatkou. Cílem této aplikace je ověřit základní chování dopravního proudu při jeho zastavování a rozjíždění za podmínek, které odpovídají pruhu pro přímý směr na křižovatce. Vozidla odjíždějící z křižovatky nejsou ovlivňována ničím jiným, než pouze sebou samými. Takové uspořádání na křižovatce je poměrně vzácné, ale umožňuje sledovat vlastnosti jízdního proudu ovlivněného pouze světelnou signalizací bez ovlivnění přípojnými dopravními proudy či zdržením na výjezdu z křižovatky. Pro kalibraci modelu byla nalezena reálná křižovatka, jejíž jeden křižovatkový pruh odpovídá uvedeným požadavkům – v Bystrci v lokalitě Kníničská nedaleko čerpací stanice a obchodního domu OBI.



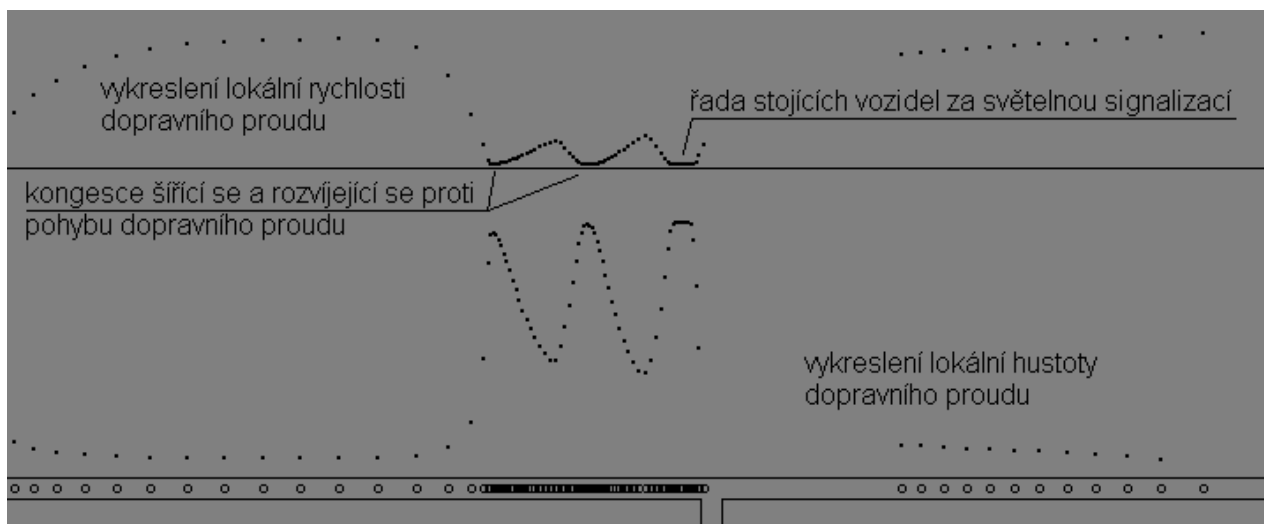
Obr. 8.1 Křižovatka Kníničská v Bystrci byla použita pro kalibraci modelu a ověření dopravního proudu řízeného světelným signalizačním zařízením.

8.1 INTENZITA A KAPACITA KŘÍŽOVATKY

Měření provedená na křižovatce se porovnávala se simulacemi při různém nastavení parametrů a podmínek. Model umožnil dosáhnout dobré shody s realitou. Reprodukoval rovněž jevy známé z reálného provozu – nesynchronní popojíždění vozidel, zastavování v řadě vozidel za křižovatkou při zeleném signálu apod. Prokázala se možnost ovlivnění výkonnosti křižovatky vhodnými jednoduchými změnami provozního režimu.

Na následujícím obrázku jsou zobrazena jednotlivá vozidla v jízdním pruhu. Pro každé z nich se pak samostatně vykreslují okamžité charakteristiky – lokální hustota, rychlost a případně intenzita. Na nich je patrný spontánní vznik vln v řadě vozidel před křižovatkou a lze na nich vysvětlit změny výkonnosti křižovatky. Méně výkonný režim nastane ve chvíli, kdy se vytvoří za červenou signalizací řada stojících vozidel. Intenzitu v době zelené fáze se pak po nějakou dobu drží na nulové hodnotě nebo blízko nule, na rozdíl od výkonnějšího režimu. Důsledkem potom je, že během zelené fáze projede méně vozidel, ve zkoumaném případě je pokles dvacetiprocentní.

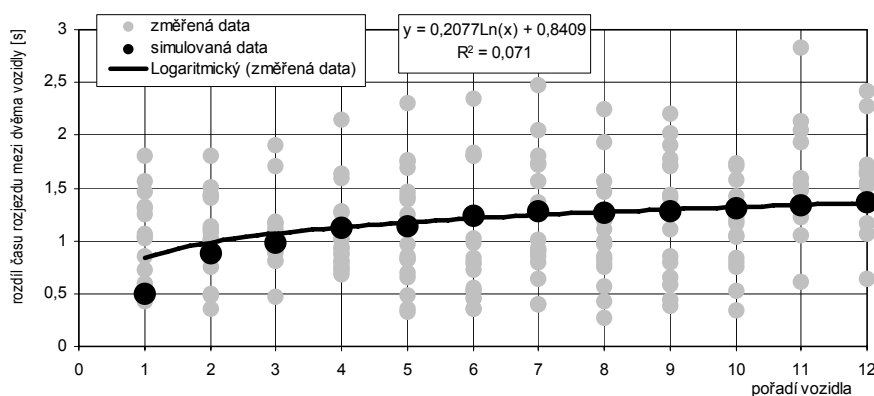
Při výše popsaném nastavení modelu se ukazuje, že maximální počet průjezdů je 15 vozidel během zelené fáze, to znamená kapacitu křižovatkového pruhu 900 voz/h. Pokud je intenzita na vjezdu vyšší, dochází k přechodu na méně výkonného režimu. Přitom pro interval mezi vozidly vkládanými do systému kratším než 3,85 s k tomu dochází okamžitě. V rozmezí intervalu 3,86 až 4,00 s dojde ke vzniku dostatečné fronty až po několika cyklech.



Obr. 8.2 Obrázek zachycuje přechod do nepríznivějšího provozního režimu. Počet průjezdů na zelenou poprvé klesl na 12 vozidel během zelené v jednom cyklu a zvyšuje se počet vozidel, která musí zastavit na červenou. Protože intenzita příjezdů vozidel je konstantní a pokles intenzity odjíždějících vozidel je trvalý, začne se prodlužovat řada vozidel za signalizací. Kongesce se šíří proti směru pohybu dopravního proudu. Tomuto stavu předcházela stav, kdy vozidla nemusela zcela zastavit a v jednom cyklu projíždělo na zelenou 15 vozidel.

8.2 ROZJEZDY JEDNOTLIVÝCH VOZIDEL

Dalším způsobem verifikace modelu je analýza chování jednotlivých vozidel. Na reálné křižovatce se měřily časy rozjezdů jednotlivých vozidel. Pro tyto účely se pořídil videozáznam, časy rozjezdů se pak měřily a přímo zaznamenávaly do počítače pomocí jednoduchého volně šířeného software, videozáznam umožňoval kontrolu, případně opakované měření. Výsledky jsou graficky zobrazeny v níže uvedeném obrázku. Jsou zde vyneseny rozdíly časů startu dvou za sebou následujících vozidel.



Obr. 8.3 Časový interval mezi rozjezdy vozidel, která stojí v řadě za sebou. Naměřená data vykazují velký rozptyl. Je jimi proložena regresní logaritmická křivka naznačující trend mírného růstu časového intervalu pro vozidla vzdálenější od začátku řady stojících vozidel. Determinační index je však velmi malý, nelze brát tento trend za spolehlivě prokázaný, $R^2=0.071$. V grafu jsou zobrazeny rovněž intervaly rozjezdů simulovaných vozidel. Simulovaná vozidla prokazují velmi podobný trend.

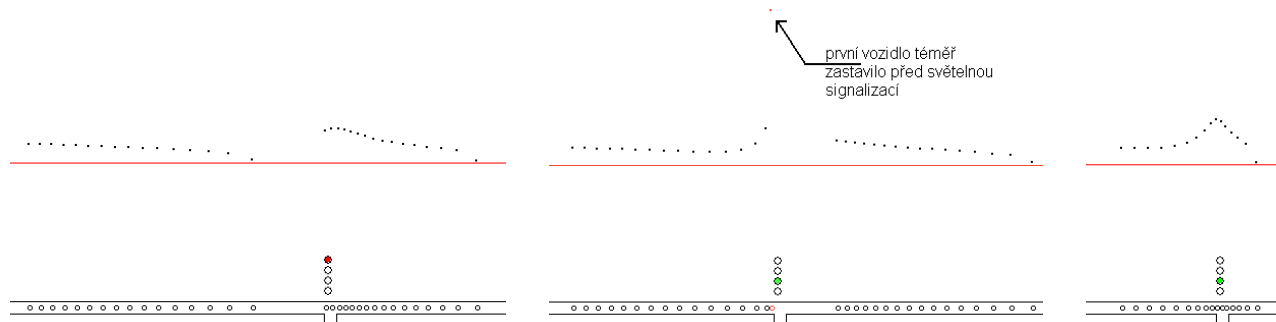
Je patrné, že naměřené časové intervaly mezi následujícími vozidly mají velký rozptyl, řidiči reagují velmi různorodě. Je to dáno především jejich okamžitým psychickým stavem – pozorností

a zájmem na rychlém opuštění křižovatky a jejich schopnostmi, rovněž se projevují charakteristiky a možnosti vozidla. Nepozorností lze vysvětlovat velmi vysoké naměřené hodnoty nad 2,0 s. Velmi nízké naměřené hodnoty časového rozdílu až pod 0,5 s lze vysvětlit tím, že řidiči se řídí, na rozdíl od uvažovaného modelu, nejen předchozím vozidlem, ale světelná signalizace je pro ně impulsem ke zvýšení pozornosti a na rozjezd se připravují patrně i podle vyhodnoceného pohybu nejméně druhého předchozího vozidla.

Odpovídající měření se provedlo i na simulačním modelu. Jak je patrné z grafu, ukázala se dobrá shoda mezi měřením a simulací, zajímavým poznatkem je tendence růstu časového intervalu mezi rozjezdy vozidel pro vozidla s vyšším pořadím ve frontě za křižovatkou. Naměřené hodnoty v reálné křižovatce však nelze brát za zcela průkazné vzhledem k velkému rozptylu naměřených hodnot.

8.3 ŘÍZENÍ VOZIDEL PŘED VJEZDEM DO KŘÍŽOVATKY

Zjištění o existenci dvou režimů (kap. 8.1) simulované křižovatky vede přirozeně k úvahám, jak udržet dění v příznivějším, výkonnějším režimu. Zjevně je žádoucí vozidla ovlivnit tak, aby nedocházelo před světelnou signalizací ke vzniku řady stojících vozidel. Zároveň je však nutné, aby se hustota dopravního proudu neklesla pod kritickou hodnotu, za kterou klesá lokální intenzita, respektive roste časový interval mezi vozidly v dopravním proudu. Možným řešením by byla regulace rychlosti vozidel tak, aby se zpозdila a nemusela zastavit. Přitom by se dopravní proud měl dostat do režimu s maximální hustotou a ve stavu blízkém tomuto optimu by měl projíždět křižovatkou. To řešení by však bylo závislé na znalosti stavu signalizace a zároveň by bylo nutné buď distribuovat tuto informaci ke každému vozidlu, které by pak počítalo vhodnou rychlost, nebo by se musely distribuovat odlišné instrukce řidiči každé vozidlo.



Obr. 8.4 Průjezd regulovaného dopravního proudu přes světelnou signalizaci. Vozidla jsou vypouštěna do simulace ve skupinách synchronizovaných s pravidelným cyklem světelné signalizace. V levém obrázku je zachycen příjezd skupiny k signalizaci v červené fázi. Zředité vzdálenosti mezi vozidly se přetvoří opět do vyšší hustoty. Ta je zachycena v prostředním obrázku pro vozidla v čele fronty, pro úspěch regulace je potřebné, aby rychlost neklesla na nulu. V té chvíli nastává zelená fáze. Na obrázku vpravo je patrné, že vyšší hustota zformovaná červenou přetrvává mezi vozidly projíždějícími křižovatkou. Takto regulovaný proud projížděl křižovatkou bez jejího zahlcení při intenzitě na vjezdu 960 voz./h, na jednu zelenou fázi takto projelo 16 vozidel, jak je patrné na obrázku. Bez regulace při intenzitách na vjezdu docházelo k zahlcení při intenzitách na vjezdu 900 voz./h a více a počet vozidel schopných projet během zelené fáze byl 12. Bez regulace je tedy kapacita křižovatky o 25 % nižší.

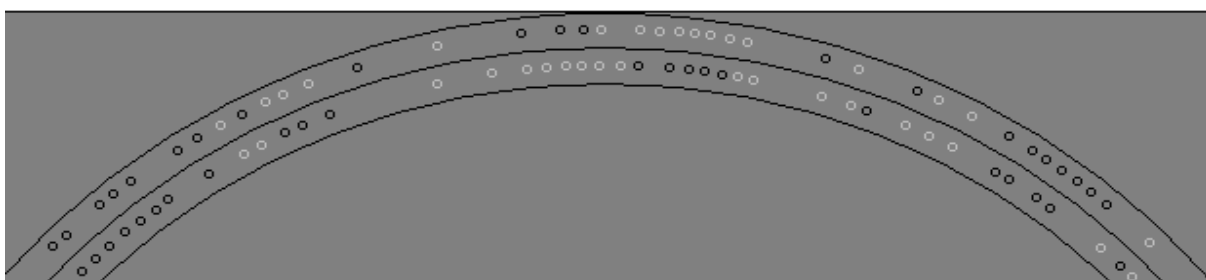
Jinou, reálně běžně využívanou možností je synchronizace světelné signalizace s předcházející signalizací na těžce komunikaci. Při simulaci jsme použili obdobný postup, kdy jsme zvolili odlišný způsob vkládání vozidel do simulační soustavy. Vozidla neshodily v pravidelných intervalech po celou dobu běhu simulace, ale byla sdružena do skupin, jejichž velikost odpovídala předpokládané výkonnosti křižovatky – tedy počtu vozidel, která mohou projet během jedné zelené fáze. Dříve se ukázalo, že bez regulace přijíždějících vozidel je to maximálně 15 vozidel na jednu zele-

nou fázi. Pokud by se dal tento počet udržet i při intenzitě příjíždějících vozidel 900 voz/h (kdy v neregulovaném provozu došlo k zahlcení křižovatky), byl by to úspěch navrhovaného zásahu. Ve skupině byla vozidla vložena v krátkých intervalech, blízkých limitu simulačního modelu při shodných parametrech s dřívějším pokusem – 1,95 s. Výsledná intenzita příjíždějících vozidel byla rovněž stejná shodná, mezi skupinami vozidel tak byly vytvořeny mezery. Podařilo se najít nastavení, při kterých se výkonnost křižovatky udržela na hodnotách až o třetinu vyšších, než v neregulovaném režimu.

9 SIMULACE ZMĚN JÍZDNÍCH PRUHŮ

Ve vícepruhových modelech přináší možnost změny pruhu další vlastnosti, které mají odraz v globálních vlastnostech dopravního proudu. V současné době nejsou algoritmy používané při modelování změny pruhu nijak standardizovány (situace je ještě horší než v případech mikromodelů jednopruhového dopravního proudu). Na základě modelu IDM jsme navrhli dvoupruhový model CLOAM (Change Lane Optimal Acceleration Model), který určuje akceleraci na základě tří hodnot:

- IDM zrychlení a s ohledem na předcházející vozidlo
- IDM zrychlení a_{prev} s ohledem na předcházející vozidlo ve vedlejším pruhu
- IDM zrychlení a_{next} vozidla ve vedlejším pruhu bezprostředně za uvažovaným vozidlem



Obr. 9.1 Úsek ze simulovaného okruhu (poloměr 2000 m) pro vozidla (celkový počet 350) ve dvou pruzích. Při této simulaci byla vozidla na startu náhodně rozmístěna do obou pruhů. Rychle se vytvořily shluky vozidel, dochází k předjíždění, v této fázi ještě nevznikly rozsáhlejší kongesce. Černě vykreslená vozidla mají okamžitou akceleraci kladnou, světle šedá zápornou.

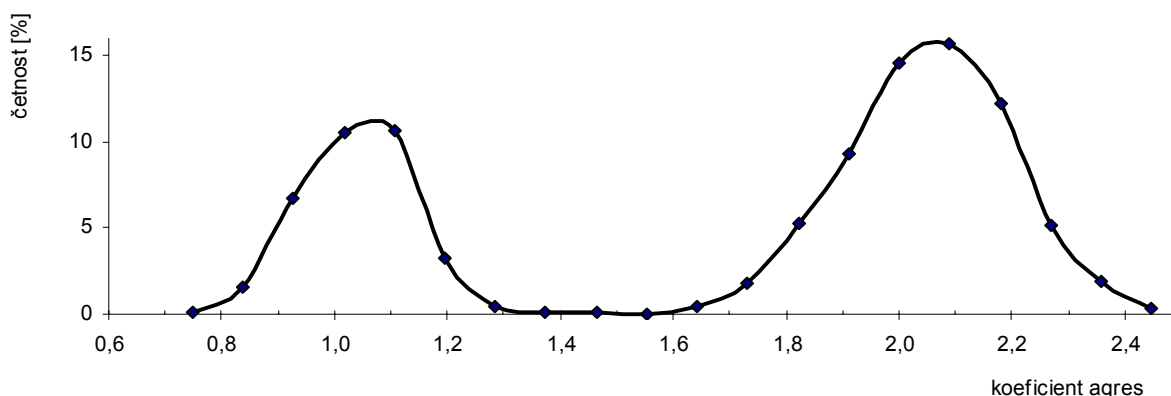
Použitý algoritmus je koncipován pro rovnocenné pruhu (odpovídá dálnicím v USA nebo u nás komunikacím na území obce). V případě dálničního modelu s preferencí pravého pruhu lze narušit symetrii například tak, že návrat do pravého pruhu je vyhodnocen jako výhodnější i v případě, že akcelerace poklesne o hodnotu do velikosti uvedené difference. Pak je však nutné zahrnout také zákaz „podjíždění“. Vhodná by v tomto případě byla také stimulace řidiče v levém pruhu zařadit se zpátky tak, aby neomezoval za ním jedoucí vozidla.

Pro identické parametry vozidel nejsou výsledky příliš ilustrativní, po ustálení dostáváme v každém případě stav beze změn pruhů, identický se dvěma jednopruhovými modely. Mnohem pestřejší výsledky simulace dostaneme v případě neidentických vozidel. Pro snazší analýzu jsme zavedli jediný parametr pro charakteristiku vozidla (bezrozměrný koeficient agresivity $agres$), který určuje prostřednictvím lineárního vztahu všechny ostatní vlastnosti (maximální rychlost, zrychlení, deceleraci i reakční dobu). Koeficient agresivity leží v intervalu $(-1,1)$ a jeho rozdělení je normální (Gaussovské). Každá dynamická vlastnost vozidla v je pak určena vztahem

$$v = v_{min}(agres + 2) \quad (9.1)$$

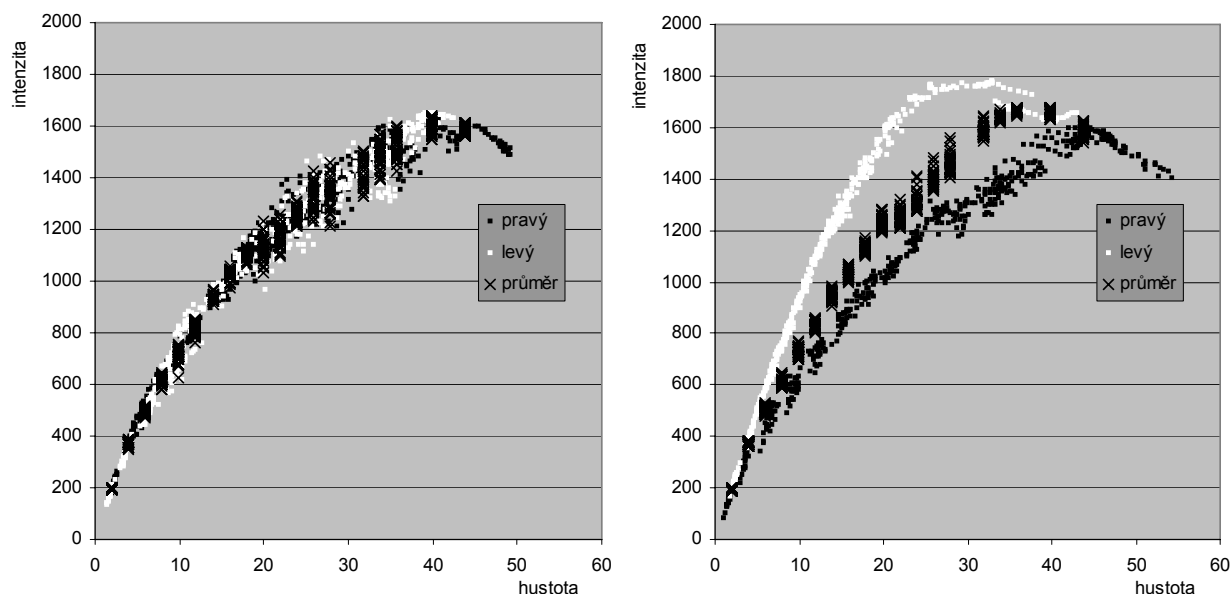
Hodnotu vlastnosti v_{min} jsme obvykle nastavili na polovinu hodnoty, kterou jsme používali v jednopruhovém modelu. Interval rozmítání veličiny v je pak 50–150 %. Pomocí rozptylu koefi-

cientu agresivity lze řídit rozdělení vlastností vozidel od identických až po jejich rovnoměrné rozdělení v uvedeném rozmítacím intervalu. Typicky jsme volili rozptyl $\sigma=1$. Jízdní pruhy jsou opět rovnocenné.



Obr. 9.2 Příklad používaného náhodného rozložení při simulacích s dvěma kategoriemi vozidel. Dynamické vlastnosti vozidla jsou definovány koeficientem agres, kterým se násobí základní hodnoty maximální rychlosti, akcelerace, decelerace a optimálního časového odstu. Pro pomalá vozidla se předpokládá menší rozptyl dynamických vlastností.

Další zkoumanou situací je použití dvou skupin vozidel – pomalých a rychlých (ekvivalent osobních a nákladních vozidel), kde každá skupina má opět náhodné parametry s Gaussovským rozdělením podle obrázku 9.2.

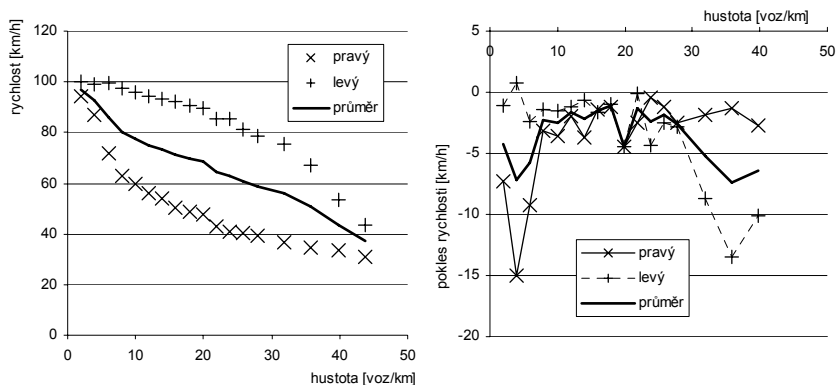


Obr. 9.3 Fundamentální diagramy pro levý a pravý pruh při dvou kategoriích vozidel – vlevo start se symetrickým rozmístěním pomalých vozidel, vpravo pomalá vozidla na startu pouze v pravém pruhu. Fundamentální diagramy pro levý a pravý pruh jsou doplněny průměrnými hodnotami intenzit (vykresleno křížkem). Ty jsou vztaženy k celkové průměrné hustotě na obou pruzích. Hustoty v jednotlivých pruzích se však mění a vyvíjejí odlišně (zvláště pro případ asymetrického startu – pravý obrázek).

Děje v dopravním proudu se zkoumají standardní metodou fundamentálních diagramů – závislosti intenzity na hustotě dopravního proudu (viz obr. 9.3).

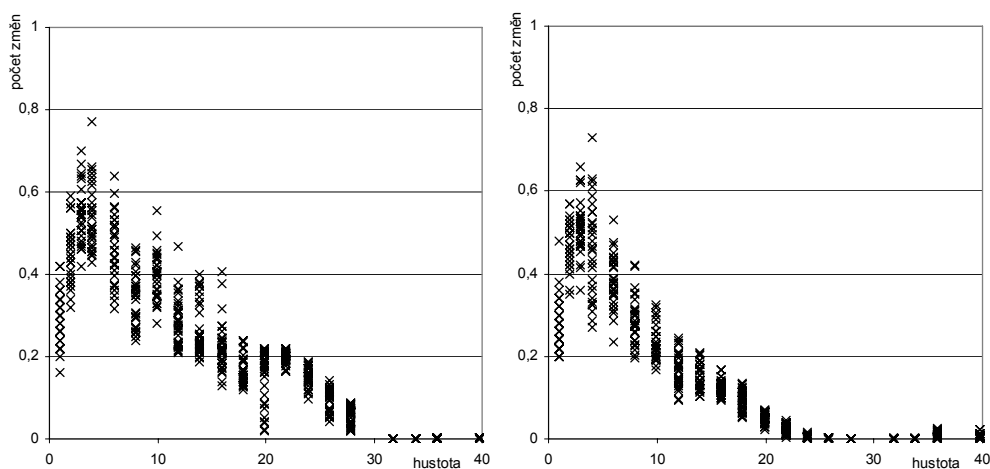
Prokázal se význam třídění vozidel na pomalejší a rychlejší (buď spontánní nebo definovaný při startu). Fundamentální diagramy pak mají jiný průběh. Vysoká intenzita neznamená přínos pro komfort (rychlost) pohybu. Při vysokých hustotách nad 40 voz/km se projevuje v pomalém pruhu silný efekt *stop & go* velkým kolísáním intenzity při zastavení části dopravního proudu.

Výstižný je i průběh rychlosti a změny rychlosti dopravního proudu v závislosti na hustotě podle obr 9.4. Při hustotě 20 voz/km má závislost neplynulý průběh a v souvislosti s tím je patrná mírná ztráta kapacita kvůli nižší rychlosti.



Obr. 9.4 Závislost rychlosti na celkové hustotě – vlevo, pokles rychlosti v absolutní hodnotě pro měnící se hustotu – vpravo.

Při experimentech se ukázala potřeba prověřit četnost změn pruhů (předjízděcích manévrů), jako názorné se ukázalo vykreslení průměrného počtu změn pruhů za časovou jednotku pro jedno vozidlo (obr. 9.5). Ukázala se i pravděpodobná souvislost této charakteristiky s dosahovanými



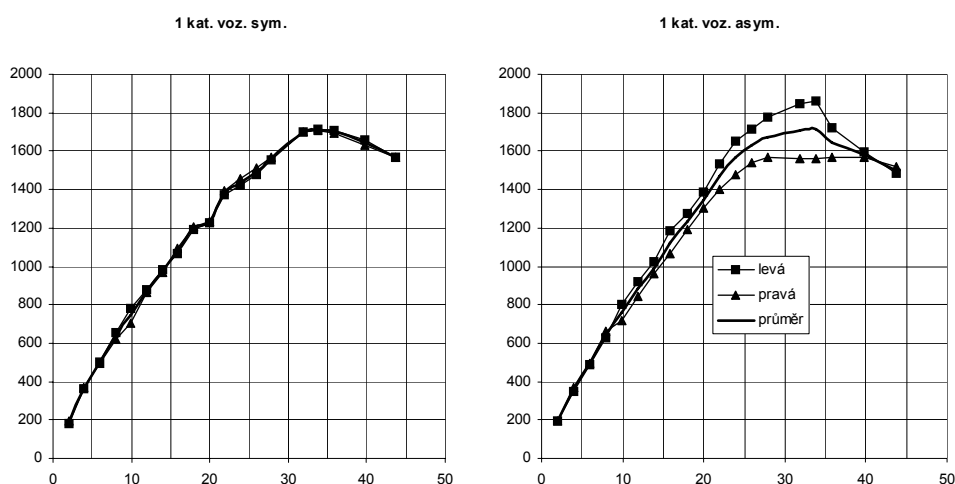
Obr. 9.5 Četnost změn jízdního pruhu vyjádřená v průměrném počtu změn pro jedno vozidlo za jednu minutu. Levý obrázek platí pro start s vozidly rovnoměrně rozmístěnými v obou pruzích, pravý pro start všech vozidel v jednom pruhu. Hustota je brána jako průměrná hodnota z obou pruhů. Počty předjíždění jsou při různých měřeních obecně různé, pro každou hodnotu hustoty je vyneseno 30 měření.

Při symetrickém startu nedojde k roztrídění pomalých a rychlých vozidel, pomalá se pak vyskytují v obou pruzích, což vede k většímu počtu změn jízdních pruhů při hustotách od 5 do 30 voz/km. Při hustotě 20 se mění trend klesajícího počtu změn jízdních pruhů. Při těžce hustotě dochází se mění průběh závislosti rychlosti na hustotě a ve fundamentálním diagramu je patrné kolísání hustot a intenzit v čase.

Při startu s vozidly v pravém pruhu se vozidla částečně vytřídí na rychlejší a pomalejší. Při pokusech za nízkých hustot do 5 voz/km jsou počty změn podobné jako při symetrickém startu. Při vyšších hustotách 50 až 30 voz/km jsou počty změn menší, ustávají při asi 25 voz/km. Naopak při vysokých hustotách kolem 35 voz/km se vytříděná vozidla dostávají do stavu *stop & go* a vzniklé mezery jsou příčinou změn jízdních pruhů za velmi nízkých rychlostí.

intenzitami, nikoli však v předpokládané triviální podobě. Většinou se uvažuje s tím, že možnost předjížděcích manévrů má pozitivní vliv na kapacitu, zde se však projevila jiná souvislost. Zde je větší počet předjížděcích manévrů průvodním jevem větší tendence ke spontánnímu vzniku kongescí (hodnota 20 voz/km byla kritická i pro jednoruhový model) a k omezení intenzity.

Obrázek 9.6 ukazuje fundamentální diagramy pro měření zobrazené v obr. 9.3, ale ukazuje průměrné hodnoty za celou dobu měření (1 h). V tomto zobrazení (v levém obr.) se projevuje nespojitý růst intenzit při hustotách kolem 20 voz/km, který se často opakoval při experimentech. Při zobrazení hodnot průměrovaných přes délku okruhu tento výsledek zanikl v „mračnu“ výsledků. Hledání příčin vedlo k odhalení poklesu rychlosti dopravního proudu při této hustotě a k souvislosti se spontánním vznikem kongescí pro identická vozidla v jednoruhovém systému. Lze předpokládat, že tato hustota je kritická a kongesční stav je při ní preferovaný a stabilnější. Přitom vznik kongescí vede ke snížení výkonu komunikace. Podle provedených experimentů je kritická hustota pro neidentická vozidla nižší (okolo 20 voz/km) než pro identická vozidla (okolo 27 voz/km). Důvodem je patrně právě nehomogenita proudu a významná role pomalejších vozidel při vzniku fluktuací.



Obr. 9.6 Fundamentální diagramy vykreslené pro průměrné hodnoty za celý pokus. Toto zobrazení umožňuje identifikovat v levém grafu při hustotách blízkých 20 voz/km nepravidelný vývoj intenzity v závislosti na hustotě, který se opakoval i při četných dalších pokusech. V levém obrázku 9.5 tomu odpovídá rovněž při této hustotě neplynulý vývoj počtu předjíždění. Na pravé straně je výsledek jiného uspořádání, jeden z mála pokusů, který tuto nepravidelnost neměl – tomu odpovídá plynulý vývoj předjíždění v 9.5 napravo.

10 ZÁVĚR

Uvedená práce se zabývá zejména základními generickými vlastnostmi dopravního proudu z hlediska jeho detailního časového vývoje v závislosti na hustotě. Ukázalo se, že simulační metody mohou přispět k vyjasnění některých nelineárních mechanismů, které ovlivňují dopravní proud zejména při vyšších hustotách. Jedná se zejména o spontánní vznik kongescí, jejich počet, rychlost pohybu, stabilitu a přechodové děje při ustalování počátečního nerovnovážného stavu.

Porovnání některých komerčně využívaných modelů dopravního proudu s IDM modelem, s naměřenými reálnými hodnotami a ověření na některých simulovaných situacích rozšířilo přehled o jejich vlastnostech a možnostech.

10.1 OBECNÉ VÝSLEDKY

Byly provedeny simulace, které lze rozdělit pro posouzení výsledků na dvě části. První se zabývá jednoruhovým modelem, převážně s identickými vozidly. Ve druhé se simulace provádějí na dvoupruhovém modelu, převážně s vozidly s náhodnými dynamickými vlastnostmi. V první části je základním přínosem prokázání spontánního vzniku kongescí s tím, že homogenní vlastnosti nevedou za všech okolností k homogennímu chování. Ve druhé části se prokazuje, že generické jevy prokázané pro identická vozidla jsou významné i pro dopravní proud s neidentickými vozidly a mají zásadní vliv na chování dopravního proudu.

Základem úspěšné analýzy je věrohodný a dobře ověřený mikroskopický model. V práci jsme se soustředili zejména na všeobecně respektovaný model IDM, který jsme se pokusili verifikovat i přímým měřením. Výsledky simulací dále ukázaly, že je v podstatě nemožné použít pro získání stejných závěrů makroskopický přístup, který v případě výskytu nelinearit naráží na nepřekonatelné analytické potíže. Z citlivostní analýzy je také patrné, že závislost generických vlastností systému na zvoleném modelu a jeho konkrétní parametrizaci nemusí být příliš silná. V teorii dynamických systémů se např. ukazuje, že obecné nelineární projevy se obvykle vyskytují ve velmi široké třídě možných nelineárních systémů.

- Můžeme tedy oprávněně usuzovat, že spontánní kongesce v dopravním proudu mohou skutečně vznikat a jsou značně stabilní – dopravní proud vykazuje samoorganizační schopnosti navzdory variabilním vlastnostem vozidel a řidičů.
- Při zvyšování hustoty vznikají skokem nové kongesce, přičemž se rovněž mění jejich grupová rychlost. Z tohoto úhlu pohledu můžeme vznik nové kongesce považovat za projev uvolnění vnitřního „pnutí“ v dopravním proudu způsobeném nadkritickou hustotou.
- Nelinearita modelu vede při vyšších hustotách k většímu počtu stabilních stavů a souvisejícím hysterezním projevům, kdy je kongesce stabilní přesto, že při dané hustotě může existovat i homogenní dopravní proud. Závislost kvalitativně odlišného chování proudu na počátečních podmínkách dále naznačuje, že v určitých intervalech hustot existují možnosti takového řízení proudu, kdy lze redukovat počet kongescí, aniž by klesala propustnost a intenzita.
- Při určitých hustotách může docházet k chaotickému vývoji dopravního proudu, který je kromě snížení intenzity nežádoucí zejména z hlediska bezpečnosti: nepredikovatelný vývoj vede k vyšším nárokům na pozornost řidičů a vyššímu riziku kolizí.
- Při simulacích na dvou pruzích s neidentickými vozidly se prokázal zásadní vliv pomalých vozidel i při jejich malém zastoupení. Významný je důsledek jejich synchronizace v obou pruzích. Identifikace mechanismů zpomalení dopravního proudu a snížení intenzity umožní účinné zásahy a řízení.
- Porovnání různých modelů dopravního proudu, které jsou implementovány do používaných komerčních software upřesňuje možnosti jejich využití a věrohodnost jejich výsledků.
- Nezanedbatelná je rovněž ekonomická a ekologická stránka – při výskytu kongescí může navzdory stejné průměrné intenzitě docházet k vyšší spotřebě pohonných hmot a vyšší úrovni exhalací.

10.2 TEORETICKÉ PŘÍNOSY PRÁCE

Pomocí vyvinutého simulačního programového vybavení byla provedena řada původních simulačních experimentů, které umožnily detailní časoprostorové sledování vývoje dopravního proudu. Řada kvantitativních závěrů je v dobrém souladu s výsledky získanými z reálných mě-

ření. Vyvinutou metodu lze pak použít pro rychlou analýzu a predikci konkrétních dopravních situací (zúžení profilů, omezení rychlosti, intervalového řízení průjezdu apod.). Místo obtížného nastavování stochastických okrajových podmínek byla s úspěchem použita metoda cyklických okrajových podmínek (Born-Kálmán) užívaných zejména v teorii periodických povrchových a prostorových struktur.

Dále byly aplikovány geodetické metody satelitního určování polohy na měření stavových veličin plovoucího vozidla. Ukázalo se, že metody RTK vedou k velmi dobrým výsledkům umožňujícím sledování odstupů a okamžité rychlosti vozidel tak, aby bylo možné srovnat výsledky simulačních experimentů s reálnou situací.

Dále se ukázalo, že vyhodnocení okamžitých statistických vlastností celého systému dostupné při simulačním experimentu přináší přesnější a rychlejší výsledky než profilový typ měření.

10.3 PRAKTICKÉ PŘÍNOSY

Pochopení dějů v dopravním proudu je podmínkou pro možnost úspěšně řídit, ovládat a usměrňovat dění v dopravní síti. Zjištění, že v dopravním proudu mohou existovat při stejné hustotě různé stavy oddělené zřetelným fázovým přechodem dává naději, že vhodným řízením lze udržet dopravní síť ve výkonnějším stavu a zabránit tak dopravním zácpám a ztrátám z nich plynoucím. Dopravní proud je děj, který je silně omezený už i samotnou podmínkou kontinuity a interakcí jednotlivých vozidel. Přitom v něm existuje jistý prostor pro projev vlastní vůle řidičů, dále obsahuje významnou náhodnou složku, ale zůstává v něm i prostor pro záměrné a cílené ovlivňování a řízení zvenčí.

V současné době zažíváme nástup informačních technologií do dopravních systémů provázený na jedné straně hromadným sběrem dat, na druhé straně šířením informací v různé podobě. Důsledkem bude ovlivnění dopravního proudu – spontánní nebo cílené. V situaci, kdy se dopravní zatížení silniční a dálniční sítě zvyšuje, je tím víc potřebné umět odhadnout důsledky zásahů do dopravního proudu. Možnost modelovat jevy v dopravním proudu je předpokladem pro účinné zásahy v různých oblastech:

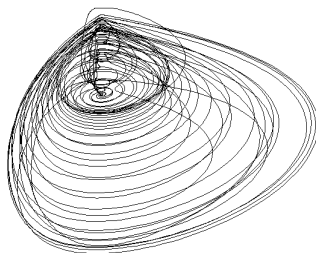
- Na základě průběžného profilového měření dopravního proudu lze predikovat vývoj dopravního proudu na jednotlivých dopravních trasách a šířit informace o dopravní situaci dostupnými cestami – proměnné dopravní značení, rádio, dopravní zpravodajství do mobilních telefonů, internet, ...
- Totéž lze provádět i plošně v dopravní síti. Je možné i přímé řízení dopravních proudů světelnou signalizací.
- Je možné modelovat jevy v místech se změněnými parametry (snížení počtu jízdnic pruhů, dopravní omezení, křižovatky, ...) a v blízkém okolí s cílem najít optimální řešení pro danou dopravní situaci.
- Simulace umožní ověřit důsledky nových „inteligentních technologií“ ve vozidlech (např. inteligentní tempomat) pro dopravní proud.
- Aplikace by měly směřovat k větší plynulosti dopravního proudu, což by mělo přinášet pozitivní efekt v bezpečnosti i v ekonomice provozu.

10.4 DALŠÍ SMĚŘOVÁNÍ VÝZKUMU

Model IDM se mezi používanými modely jeví jako úspěšný, je opakovaně ověřený různými autory a je všeobecně respektovaný. I tato práce prokázala, že simulace je poměrně věrohodná a zároveň se tento model dá dobře implementovat. Není však jediný a není zcela dokonalý. Používaný simulační aparát je použitelný i pro jiné případné modely. Prověření některých jiných modelů uká-

zalo, že jsou poněkud problematické pro zkoumání lokálních dějů v dopravním proudu, i když jejich výsledky v oblasti modelování intenzit jsou respektovány a používány v praxi. Do budoucna lze doporučit tyto další kroky:

- Ve shodě se zahraniční vědeckou komunitou pokračovat v hledání optimálního modelu.
- Pro zvolený model IDM upřesňovat parametry a ověřovat je měřeními v reálném proudu za různých podmínek.
- Pokračovat ve zkoumání dějů na křižovatkách, rozšířit model na složitější křižovatkové pohyby. Prvním krokem by měl být návrh algoritmu pro dva spojující se dopravní proudy na stykové křižovatce a jeho rozšíření na model okružní křižovatky. Dalším možným krokem je model světelně řízené průsečné křižovatky.
- Na dvoupruhovém modelu dopravního proudu je žádoucí rozšířit doposud provedené experimenty o ověření vlivu afinity k jednotlivým pruhům.



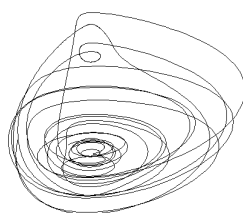
SEZNAM LITERATURY

- [1] Bond, C., Coeficients for Savitzky-Golay Filters, Engineering Notebook, Vol.1 no.14, <http://www.crbond.com/papers.htm>
- [2] Brockfeld, E., Wagner, P., Calibration and Validation of Microscopic Traffic Flow Models, Traffic and Granular Flow 03, ISBN 3-540-25814-0 Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005
- [3] Burgers, J.M., 1948, A mathematical model illustrating the theory of turbulence, Adv. Appl. Mechanics
- [4] Centrum dopravního výzkumu, Osobní doprava v číslech, http://www.cdv.cz/text/vz/vz1/pvz1_3.pdf
- [5] Centrum technické normalizace, <http://www.silmos.cz>
- [6] Česká technická norma ČSN 73 6101 Projektování silnic a dálnic, 2004, Český normalizační institut
- [7] Dahl, O.J. Dijkstra, E.W., Structured Programming, Academic Press, London, 1972
- [8] Drew, D.R., Deterministic Aspects of Freeway, Operations and Control. Highway Research Record, 99, pp. 48-58, 1965
- [9] Edie, L.C., Transportation Research Part B 28, 66, 1961
- [10] Forster, D., Nelson, D.R., Stephen, M.J., 1977, Phys. Rev. A 16, 732
- [11] Fritzsche, H.T., A model for traffic simulation, Transportation Engineering, Contribution 5: 317–321, 1994
- [12] Gazis, D.C., Herman, R., Potts, R.B., Car following theory of steady state traffic flow. Operations Research 7, pp. 499–505, 1959
- [13] Gipps, P. G., A behavioural car-following model for computer simulation, Transportation Research, vol. 15B, pp 105-111, 1981
- [14] Greenshields, B.D., A Study of Traffic Capacity, 1935, Highway Research Board, Proceedings, Vol. 14: 448-477
- [15] Haberman, R., 1998, Mathematical Models, Society for Industrial and Applied Mathematics
- [16] Helbing, D. Fundamentals of Traffic Flow, Phys. Rev. E55, 3735-3738, 1997
- [17] Helbing, D., Hennecke, A., Shvetsov, V., Treiber, M., 2000, Micro- and Macrosimulation of Freeway Traffic, Physical Review Letters 82
- [18] Helbing, D., Verkehrsdynamik. Neue physikalische Modellierungskonzepte, Springer, Berlin, 2000
- [19] Herman, R., Montroll, E.W., Potts, R.B., Rothery, R.W., Traffic dynamics: analysis of stability in car following, Operations Research 7, pp. 86–106, 1959
- [20] Herman, R., Montroll, E.W., Potts, R.B., Rothery, R.W., Traffic dynamics: analysis of stability in car following, Operations Research 7, pp. 86–106, 1959
- [21] Highway Capacity Manual 2000, Transportation Research Board
- [22] Hoefs, D.H., Entwicklung einer Messmethode über den Bewegungsablauf des Kolonnenverkehrs, Universität (TH) Karlsruhe, 1972
- [23] Hoefs, D.H., Untersuchung des Fahrverhaltens in Fahrzeugkolonnen. Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 140, Bonn, 1972
- [24] Holcner, P., 2004, Nelineární jevy v dopravním proudu, teze disertační práce FAST VUT, Brno

- [25] Holcner, P., Apeltauer, T., Kyselý, M., Macur, J., Modely dopravního proudu, Silniční obzor 10/2005
- [26] Holcner, P., Apeltauer, T., Kyselý, M., Macur, J., Modely dopravního proudu, Silniční obzor č.10, 2005
- [27] Holcner, P., Apeltauer, T., Kyselý, M., Macur, J., Simulace dopravního proudu, Silniční obzor č. 11/2005
- [28] Holcner, P., Apeltauer, T., Kyselý, M., Macur, J., Simulace dopravního proudu, Silniční obzor, 2005
- [29] Hubbert, M. K., Energy from Fossil Fuels, Science, Vol. 109, 1949
- [30] Chandler, R.E., Herman, R. and Montroll, E.W., Traffic dynamics: studies in car following, Operations Research 6, 165 (1958)
- [31] Ismagilov, R., Whitesides, G., Autonomous Movement and Self-Assembly, WILEY-VCH Verlag GmbH, Weinheim, 2002
- [32] Kalašová, A., Úvod do dopravnej telematiky, sborník ITS, Bratislava, 2007
- [33] Kálman, R. E., A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, Journal of Basic Engineering 82 (Series D) 35–45, ASME, March 1960
- [34] Karlický, P., Slabý, P., Teorie dopravního proudu, ČVUT v Praze, 1983
- [35] Kerner, B. S., The Physics of Traffic, Springer, New York, 2004
- [36] Kerner, B.S., The Physics of Traffic, Springer, 2004
- [37] Kikuchi, M., Nakayama, A., Nishinari, K., Sugiyama, Y. Tadaki, S., Yukawa, S., 2002, Long-Term Data from Japanese Expressway, Traffic and Granular Flow 01, ISBN 3-540-40255-1 Springer-Verlag
- [38] Kindler, E., Simulace a modelování, Ostravská univerzita, 2001
- [39] Knospe, W., Santen, L., Schadschneider, A., Schreckenberg, M., Microscopic Modelling of Synchronized Traffic, Traffic and Granular Flow 01, ISBN 3-540-40255-1 Springer-Verlag
- [40] Lighthill, M. J., and G. B. Whitham, 1955, Proc. Roy. Soc. London, Ser. A 229
- [41] Maybeck, P.S., Stochastic models, estimation and control, vol. 1, Academic Press – A Subsidiary of Harcourt Brace Jovanovich Publisher, 1979
- [42] Medelská, V., Frešo, P.: Teória dopravného prúdu, SVŠT Bratislava, 1990
- [43] Michaels, R.M., Perceptual factors in car following, In Proceedings of the Second International Symposium on the Theory of Road Traffic Flow, 1963
- [44] Montroll, E.W., Acceleration and clustering tendency of vehicular traffic, In Proceedings of the Symposium on Theory of Traffic Flow, Research Laboratories, General Motors (pp. 147–157), New York: Elsevier, 1959
- [45] Neumann von, J., Morgenstern, O., Theory of games and economic behavior, Princeton University Press, 1944
- [46] Neumann von, J., The computer and the brain, New Heaven, Yale University Press, 1958
- [47] Newell, G.F., Operations Research 9, 209 (1961)
- [48] Oguchi, T., The Nature of Occurrence of Queued Flow at Capacity Bottleneck of Ordinary Section, 2002, Observational Aspects of Japanese Highway Traffic, Traffic and Granular Flow 01, ISBN 3-540-40255-1 Springer-Verlag
- [49] Olstam, J.J., Tapani, A., Comparison of car-following models, LiTHITN-R-2004-5, Department of Science and Technology (ITN), 2004
- [50] P. Tesař, Úvod do GPS, 2005

- [51] Payne, H. J., 1979, *Research Directions in Computer Control of Urban Traffic Systems*, American Society of Civil Engineers, New York
- [52] Pelánek, R., *Modelování a simulace komplexních systémů*, Nakladatelství Masarykovy univerzity, 2011, ISBN: 978-80-210-5318-2
- [53] Phillips, W. F., 1979, *Transpn. Plan. Technol.* 5
- [54] Pípa, M., Spadnou černé skříňky z nebes na silnici?, *Silniční obzor* č.12/2005
- [55] Prigogine, I., Herman, R., 1971, *Kinetic Theory of Vehicular Traffic* (Elsevier, New York)
- [56] Příbyl, P., Elektronické mýtné se stává realitou, *Silniční obzor* č. 7-8/2005
- [57] Příbyl, P., Špalek, J., Co je a co není dopravní telematika. Úvaha o (nad)užívání tohoto pojmu, *ITS – 4. rozměr mobility*, Praha, 2007, ISBN 978-80-239-9311-0
- [58] Příbyl, P., Svítek, M., *Inteligentní dopravní systémy*, Technická literatura BEN, Praha, 2001
- [59] Savitzky, A., Golay, M.J.E., Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures, *Analytical Chemistry*, Vol. 36, No. 8, 1964
- [60] Shannon, R.E., *Systems Simulation: The Art and Science*, Prentice Hall, 1975
- [61] Schlosser, T., *Inteligentné dopravné systémy*, Jaga Group, Bratislava, 2001
- [62] Schreckenberg, M., Schadschneider, A., Car-oriented mean-field theory for traffic flow models, *Journal of Physics A: Mathematical and General* 30 L69-L75, 1997
- [63] Schreckenberg, M., Schadschneider, A., Cellular automaton models and traffic flow, *Journal of Physics A: Mathematical and General* 26 L679-L683, 1993
- [64] Schutz, G., and E. Domany, 1993, *J. Stat. Phys.* 72
- [65] Simon, H., *The sciences of the artificial.*, Addison-Wesley Pub. Co., 1995
- [66] Singer, J., *The mind, the brain, and complex adaptive systems*, MIT Press, 1996
- [67] Sugiyama, Y. et al., Observation. Theory and Experiment for Freeway Traffic as Physics of Many-Body System, *Traffic and Granular Flow 01*, ISBN 3-540-40255-1 Springer-Verlag
- [68] Svítek, M. a kol., *ITS v podmínkách dopravně-telekomunikačního prostředí ČR*, <http://www.lt.fd.cvut.cz/its/>, Praha, 2005
- [69] Šimek, J., <http://www.energybulletin.cz/>
- [70] Todosiev, E. P., *The Action Point Model of the Driver Vehicle System*, Report No. 202A-3. Ohio State University, Engineering Experiment Station, Columbus, Ohio, 1963
- [71] Todosiev, E.P., Barbora, L.C., *Traffic Engineering*, 34:17–20, 1963/64
- [72] Wagner, P., *Empirical Description of Car-Following*, *Traffic and Granular Flow 03*, ISBN 3-540-25814-0 Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005
- [73] Whitham, G. B., 1974, *Linear and Nonlinear Waves*, Wiley, New York
- [74] Whitham, G. B., 1979, *Lectures on Wave Propagation* (Springer, Berlin)
- [75] Wiedemann, R., Reiter, U., *Microscopic Traffic Simulation: the simulation system MISSION, background and actual state*, Project ICARUS (V1052) Final Report, Brussels, CEC. 2: Appendix A., 1992
- [76] Wiedemann, R., *Simulation des Strassenverkehrsflusses*, Universität Karlsruhe, 1974
- [77] Wiener, N., *The Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series*, John Wiley & Sons, Inc., New York, N.Y., 1949
- [78] Wilson, R.E., *An Analysis of Gipps' Car Following Model of Highway Traffic*, *IMA J Appl Math*, 2000
- [79] Wolfram, S., *Cellular Automata and Complexity*, Westview Press, 1994

- [80] Yukawa, S., Kikuchi, M., Nakayama, A., Nishinari, K., Sugiyama, Y., Tadaki, S., Observational Aspects of Japanese Highway Traffic, Traffic and Granular Flow 01, ISBN 3-540-40255-1 Springer-Verlag, 2002
- [81] Příloha 4, ITS v podmínkách dopravně-telekomunikačního prostředí ČR, Praha, 2005
- [82] Ředitelství silnic a dálnic, <http://www.rsd.cz/>
- [83] Sdružení pro dopravní telematiku České republiky, Terminologický slovník telematiky, Praha, 2006
- [84] <http://www.hubbartpeak.com>
- [85] Ústav dopravního inženýrství hl. města Prahy, <http://www.udipraha.cz/rocenky/rocenka03/texty/dttkap02.htm>



ABSTRACT

Modelling and computer simulation is the essential method for research of vehicles behaviour in the traffic flow. Correct understanding of the traffic flow phenomena is the inevitable prerequisite for its reasonable control and influencing. This thesis gives proof that the traffic flow is not steady in a wide range of densities (even for identical vehicles) as an implication of non-linearity, which is in contradiction to the generally accepted stationary scheme with stochastic only divergences. The simulation of traffic flow model shows spontaneous formation of congestion even for homogenous start of the model. Speed and density fluctuation in a traffic flow must be interpreted as a generic feature of the system.

The inaugural dissertation examines the relevance of standard stationary traffic flow models, furthermore macroscopic and microscopic models and cellular automata. The modelling and computer simulation was executed with IDM model (Intelligent Driver Model).

We carried out an observation of two moving vehicles by satellite measurement (GPS) to prove the legitimacy of the model and relevance of its parameters. We used the phase measuring and the Real Time Kinematic method (RTK) with the accuracy 0.01 m and with the frequency of 10 measurements in 1 second. We compared this data with model computations for the same conditions and verified the model parameters by non-linear regression.

The general section of the dissertation deals with simulations and with the basic characteristics of the modelled traffic flow. The existence of non-linear phenomena – particularly the existence of possible different stable states under the same density and very close starting conditions – was proved.

Sensitivity analysis demonstrated the significance of the model parameters. Simulated cross-section observations indicate that the conventional conception of the fundamental diagram as an unambiguous relation between density and intensity must be revised.

The proved model IDM was used as an etalon for comparison with some models (Wiedemann, Fritzsche, Gipps) used in commercial software as they are described in scientific literature. This investigation demonstrated some problems with stability of models with discontinuous acceleration, though the intensity characteristics produced are quite realistic.

The research progressed towards a two-lane model with symmetric lane changing characteristics and a new overtaking algorithm has been developed. It considers standard IDM acceleration, IDM acceleration crosswise to the next lane vehicle and IDM deceleration induced in the next lane by lane changing manoeuvre.

An application for simulation of vehicles motion on crossroads with traffic lights was developed. It proved varied speeds, densities and intensities of local traffic flow characteristics with a chance of efficient flow control.

The proof of non-linear phenomena both in real traffic flow and in simulations is the essential result of the research.