TRANSPORTA UN SAKARU INSTITŪTS

Mihails Savrasovs

JAUNAS PIEEJAS IZSTRĀDE TRANSPORTA PLŪSMU MODELĒŠANAI UN ANALĪZEI MEZOSKOPISKĀ LĪMENĪ

DEVELOPMENT OF NEW APPROACH FOR SIMULATION AND ANALYSIS OF TRAFFIC FLOWS ON MESOSCOPIC LEVEL

РАЗРАБОТКА НОВОГО ПОДХОДА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ НА МЕЗОСКОПИЧЕСКОМ УРОВНЕ

Promocijas darba kopsavilkums
izvirzīts inženierzinātņu doktora zinātniska grāda iegūšanai Inženierzinātņu nozares apakšnozare "Transporta un loģistikas zinātne"

Summary of the promotion work
to obtain the scientific degree of Doctor of Science in Engineering (Dr.sc.ing.)
Scientific area "Transport and Logistics"

Автореферат диссертационной работы
на соискание учёной степени доктора инженерных наук (Dr.sc.ing.)
Направление " Транспорт и логистика"

Zinātniskais vadītājs
Dr. habil. sc. ing., profesors
Jurijs Tolujevs

RĪGA – 2013

UDK 656:519
S 26

Transporta un sakaru institūts
Transport and Telecommunication Institute

Savrasovs M.

Jaunas pieejas izstrāde transporta plūsmu modelēšanai un analīzei mezoskopiskā līmenī: Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: Transporta un sakaru institūts, 2013.

Development of new approach for simulation and analysis of traffic flows on mesoscopic level: Summary of the promotion work. Riga: Transport and Telecommunication Institute, 2013.

Разработка нового подхода для моделирования и анализа транспортных потоков на мезоскопическом уровне: Автореферат диссертационной работы. Рига: Институт транспорта и связи, 2013.

Iesniegtajā materiālā saglabāts autora stils un noformējums.

In the submission kept the author's style and design.

В представленном материале сохранен авторский стиль и оформление.

ISBN 978-9984-818-56-6

© M. Savrasovs, 2013
© Transporta un sakaru institūts, 2013

PROMOCIJAS DARBS IESNIEGTS TRANSPORTA UN SAKARU INSTITŪTĀ INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA ZINĀTNISKĀ GRĀDA IEGŪŠANAI (Dr.sc.ing.)

OFICIĀLIE RECENZENTI:

Dr.habil.sc.ing., Jurijs Merkurjevs,
profesors, Rīgas tehniska universitate,
Latvija.

Dr.ing., Klaus Richter,
profesors, Otto von Guericke University of Magdeburg,
Vacija.

Dr.sc.ing., Egils Ginters,
profesors, Vidzemes Augstskola,
Latvija.

Promocijas darba aizstāvēšana notiks 2013. gadā 3. oktobrī pulksten 16:00 Transporta un sakaru institūta promocijas padomē pēc adreses: Lomonosova 1 aud. 130, Rīga, Latvija, tālr. (+371) 67100617, fakss: (+371) 67100535.

APSTIPRINĀJUMS

Es apliecinu, ka esmu beidzis šo pētniecisko darbu, kas tiek iesniegts izskatīšanai Transporta un sakaru institūtā, lai iegūtu inženierzinātņu doktora grādu (Dr.sc.ing). Šis promocijas darbs nav ticis iepriekš izskatīts nevienā citā universitātē vai institūtā zinātniskā grāda iegūšanai.

2013.gada 3. oktobrī M. Savrasovs

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, satur ievadu, 5 nodaļas, secinājumus, 59 attēlus, 26 tabulas, 134 lapas un 7 pielikumus. Izmantotās literatūras sarakstā ir 103 avoti.

ESF
EIROPAS SOCIĀLAIS FONDS

This work has been partly supported by the European Social Fund.
Project Nr. 2009/0159/1DP/1.1.2.1.2/09/IPIA/VIAA/006
(The support in Realisation of the Doctoral Programme "Telematics and Logistics" of the transport and Telecommunication Institute).

SATURS

VISPĀRĪGS DARBA APRAKSTS 6
Ievads 6
Pētījuma motivācija 6
Promocijas darba mērķis un uzdevumi 7
Pētījuma objekts un priekšmets 7
Tēmas izpētes pakāpe 7
Pētījuma hipotēzes 9
Pētījuma metodes 9
Darba zinātniskā novitāte 9
Darba praktiskā vērtība 9
Tēzes aizstāvēšanai 10
Zinātniskās konferences un semināri 10
Publikācijas 11
Darba struktūra 11
DARBA NODAĻU KOPSAVILKUMS 13
1. nodaļa (Satiksmes analīzes rīku pārskats) 13
2. nodaļa (Imitācijas pieeju salīdzinošā analīze) 16
3. nodaļa (Mezoskopiskās DR satiksmes imitācijas modeļa koncepcijas izstrāde) 23
4. nodaļa (Izstrādātās pieejas salīdzināšana ar mikroimitaciju. Situāciju izpēte.) 29
5.nodaļa (Pilsētas transporta koridora mezoskopiskā imitācija) 33
GALVENIE DARBA REZULTĀTI 38

ANOTĀCIJA

Mihaila Savrasova promocijas darbs „Jaunas pieejas izstrāde transporta plūsmu modelēšanai un analīzei mezoskopiskā līmenī". Darba zinātniskais vadītājs habilitētais inženierzinātņu doktors, profesors Jurijs Tolujevs.

Darbā ir aprakstīti mezoskopiskā modeļa transporta plūsmu izstrādes rezultāti, izpēte un pielietošana, kas ir realizēts uz „Discrete Rate" imitācijas modelēšanas pieejas bāzes.

Izvēlētas tēmas aktualitāte ir saistīta ar nepārtrauktu transporta līdzekļu skaita pieaugumu uz ceļiem un, līdz ar to – ekonomiskie zaudējumi, ekoloģiskās situācijas pasliktināšana pilsētās un nelaimes gadījumu pieaugums.

Viena no šīs problēmas atrisināšanas iespējam ir tā sauktās ilgtspējīgas transporta sistēmas izveidošana. Starp ilgtspējīgas transporta sistēmas izveidošanas instrumentiem ir imitācijas modelēšana. Imitācijas modelēšana šajā gadījumā ir instruments, kurš ļauj optimizēt esošo transporta sistēmu un padarīt jaunu transporta sistēmas elementu ieviešanu par pamatotu.

Darbā detalizēti ir apskatīta imitācijas modelēšanas loma transporta satiksmes sfērā un ir identificēti tālāki šā instrumenta attīstības posmi transporta plūsmu analīzē. Turklāt darbā ir veikts esošo transporta plūsmu analīzes instrumentu apskats un detalizēti izskatīti imitācijas modelēšanas instrumenti: mikroskopiskie modeļi, mezoskopiskie modeļi un makroskopiskie modeļi.

Detalizēti ir izpētīti šobrīd eksistējošie mezoskopiskie modeļi, pie tam ir atzīmēts to galvenais trūkums – realizācija slēgtā programmatūrā, kas apgrūtina to izmantošanu praksē. Jauna izstrādāta mezoskopiska modeļa pamatā ir „Discrete Rate" imitācijas modelēšanas pieeja, kura šobrīd tiek izmantota materiālu plūsmu modelēšanai loģistikas sfērā. Darbā sīki ir aprakstīti pieejas pamatprincipi un ir parādīta tā atšķirība no zināmām klasiskām pieejam. Uz eksistējošas koncepcijas bāzes ir piedāvāti un formulēti divi modeļi: nenoslogotam un noslogotam tīklam. Ir aprakstīti izstrādāto modeļu izmantošanas piemēri dažādiem transporta sistēmas objektiem. Uz piemēru bāzes ir sīki aprakstīts modeļa realizācijas algoritms, realizēta modeļa validācija un noteikti reāli parametri, nepieciešamie dotajām modeļa tipam.

VISPĀRĪGS DARBA APRAKSTS

Ievads

Kopš 1886. gada, kad tika patentēts pirmais transportlīdzekļa motors, transportlīdzekļu skaits uz ceļiem ir dramatiski palielinājies. Tas licis transporta plānotājiem un pētniekiem meklēt jaunas transporta infrastruktūras attīstības un optimizācijas metodes. Visbeidzot, ilgtspējīgas transporta sistēmas koncepcijas tika formulētas kā stratēģisks un sarežģīts lēmums, kas būtu jāpieņem. Ilgtspējīga transporta tīkla attīstība ir kompleksa problēma, kam jāaptver visi transporta sistēmas aspekti - no pastāvīgas satiksmes apjomu pētīšanas līdz jauno tehnoloģiju attīstībai tādās jomās kā benzīna ražošana un transportlīdzekļa motora modernizācija. Starp dažādiem rīkiem, kas tiek izmantoti, lai izstrādātu jaunas paaudzes transporta sistēmas, īpaša vieta ir esošās transporta infrastruktūras optimizācijai, striktai un paplašinātai jaunu infrastruktūras elementu ietekmes analīzei uz citu transporta infrastruktūras daļu. Parasti šis aspekts noved pie dažādas satiksmes plūsmas analīzes rīku izmantošanas. Starp esošajiem satiksmes analīzes rīkiem, imitācijas modelēšana ir viena no spēcīgākajiem līdzekļiem, lai atrisinātu uzdevumus, kas radušies esošās sistēmas projektēšanas un atjaunošanas procesā.

Pētījuma motivācija

Imitācijas modelēšana ir spēcīgs satiksmes sistēmas analīzes rīks. Esošajiem mikroskopiskās un makroskopiskās imitācijas modeļiem ir vairāki trūkumi. Esošie mikroskopiskās un makroskopiskās modelēšanas trūkumi motivē jauna tipa modeļu izveidošanu un pētīšanu, ko sauc par mezoskopiskiem. Šiem modeļiem vajadzētu likvidēt trūkumus, kas novērojami mikroskopiskos un makroskopiskos modeļos. Bet mezoskopiskās imitācijas jēdziena neskaidrība mudina daudzus zinātniekus un pētniekus izstrādāt dažādus atšķirīgus mezoskopiskos modeļus. Lielākā daļa no esošajiem mezoskopiskajiem modeļiem tiek izstrādāti teorētiski, bez jebkādas ieviešanas programmatūras veidā, vai tie tiek realizēti programmatūrā, kas nav pieejama pētniekiem un praktiķiem. Šie fakti motivē jaunas mezoskopiskās pieejas izstrādi satiksmes plūsmas imitācijai, kas būs pieejama potenciālajiem lietotājiem (pētniekiem un transporta plānotājiem).

Promocijas darba mērķis un uzdevumi

Promocijas darba mērķis ir: jauna veida modeļa izstrāde, izpēte un pielietošana mezoskopisko satiksmes modeļu klasē.

Attiecībā uz iepriekš minēto pētījuma mērķi, tiek izvirzīti šādi uzdevumi:

1. Izskatīt satiksmes sistēmas imitācijas modelēšanas problēmas.
2. Analizēt:
    a. pašlaik izmantotos satiksmes sistēmu imitācijas rīkus;
    b. esošās imitācijas pieejas un detalizētus mezoskopiskos satiksmes modeļus.
3. Piedāvāt un attīstīt jauna veida mezoskopiska satiksmes modeļa koncepciju.
4. Izstrādāt modeļus ar mākslīgiem un reālajiem datiem, paredzot skaitliskus piedāvātās mezoskopiskās pieejas piemērus.
5. Pārbaudīt jaunā veida satiksmes mezoskopiskā modeļa validitāti, izmantojot dažādus piemērus.
6. Parādīt piedāvātā modeļa priekšrocības un trūkumus.
7. Sniegt zinātniski pamatotus ieteikumus modeļa pielietošanai.

Pētījuma objekts un priekšmets

Pētījuma objekts ir satiksmes plūsma. Pētījuma priekšmets ir satiksmes plūsmas imitācijas modeļi.

Tēmas izpētes pakāpe

Satiksmes plūsmas imitācijas vēsture sākās 1955. gadā, kad D.L.Gerlough publicēja savu disertāciju: "Simulation of freeway traffic on a general-purpose discrete variable compute" Kalifornijas universitātē, Losandželosā. Kopš tā laika daudzi zinātnieki un praktiķi ir centušies attīstīt satiksmes simulācijas teoriju. Attiecībā uz mikroskopisko satiksmes plūsmas imitāciju, R.Wiedemann 1974.gadā publicēja "Wiedemann 74" modeļu aprakstu savā rakstā "Simulation des Straßenverkehrsflusses", P.G.Gipps 1970.gadā izstrādāja Gipps modeli; daži citu autoru tādu kā R.E.Chandler, D.C. Gazis, G.Lee, J.C.Bender, R.E.Fenton utt. darbi varētu arī tikt minēti. Šo zinātnieku pētījumi palīdzēja radīt satiksmes plūsmas imitācijas programmatūras pamatu. Tikmēr tika uzsākta makroskopisko modeļu izstrāde. Makroskopiskie satiksmes modeļi ņem vērā satiksmes plūsmas agregētas īpašības (ātrumu, plūsmu un blīvumu) un to savstarpējās

saistības. Pie makroskopiskas simulācijas jāmin sekojoši zinātnieki: M.J.Lighthill, G.B.Whitham, P.I.Richards, C.F.Daganzo, S.K.Godunov u.c. Šo simulācijas pieeju trūkumi motivē attīstīt citu satiksmes simulācijas modeļu klasi, kas tiek saukti par mezoskopiskiem. 1989. gadā, D.R. Leonard ierosināja modeli, ko dēvēja par CONTRAM. Modelis ietver transportlīdzekļu grupēšanu paketēs un to maršrutēšanu, izmantojot tīklu. Cits zinātnieks, M. Ben-Akiva 1996. gadā ierosināja mezoskopisko modeli DYNAMIT. Šis modelis sagrupēja transportlīdzekļus pēc šūnām, kas nosaka tādas īpašības kā ātrumu, blīvumu utt. Nedaudz agrāk, 1994. gadā, R. Jayakrishnan ierosināja rindas-servera pieejas izmantošanu satiksmes plūsmas imitācijai. Šī ideja kļuva populāra un 1998.gadā C.Gawron izveidoja modeli FASTLANE un vēlāk M. Mahut (2001. gadā) izveidoja modeli DTASQ. Šūnu automāta pielietošanu satiksmes plūsmas simulācijai veica B.W. Bush attīstot TRANSIMS. Pēdējais plaši pazīstamais pētījums, kas veltīts mezoskopiskajam modelim, tika publicēts 2004.gadā kā Wilco Burghout (Royal Institute of Technology, Stokholma, Zviedrija) doktora disertācija.

Iepriekš minēto literatūras avotu analīze ļauj izdarīt šādus secinājumus par mezoskopisko modeļu praktisko pielietošanu, motivējot autoru veikt pētījumu šajā jomā:

- mezoskopiskā satiksmes plūsmas imitācijas modelēšana ir ļoti perspektīvs modelēšanas veids, jo nav nepieciešamas augstas prasības ieejas datu kvalitātei un modeļa izstrādes un eksperimenta laiks ir ļoti īss, u.c.;
- terminam "mezoskopisks satiksmes modelis" vēl nav nekādu oficiālu definīciju (dažādi zinātnieki to interpretē atšķirīgi); tas ļauj izmantot dažādas modeļa izstrādes pieejas, bet arī rada neskaidrības zinātņu un tajā pašā laikā transporta plānotāju kopienā;
- mezoskopiskie modeļi galvenokārt tiek realizēti patentētā programmatūrā, ko izmanto valsts iestādes, vai tiek izstrādāti bez praktiskas aprobācijas. Tas noved pie mezoskopiskās simulācijas rīku trūkuma tirgū.

Par jauna veida mezoskopiskā satiksmes modeļa izstrādes pamatu tiek izmantota Discrete Rate (DR) imitācijas pieeja. DR pieejas jēdziens ir balstīts uz notikumu plānošanu, izmantojot gabala lineāros agregātus, ko 1973. gadā aprakstījis N.Buslenko. DR pieeju 2009. gadā Winter Simulation Conference izklāstīja D.Krahl, kurš arī īstenojis šo pieeju ExtendSim programmatūrā. Tikmēr, prof. J.Tolujevs savā pētījumā pierādījis DR koncepcijas izmantošanas iespēju loģistikas jomā.

Pētījuma hipotēzes

Pētījumā tiek izvirzītas šādas hipotēzes:

1. Discrete Rate (DR) pieeju varētu izmantot transporta plūsmas imitācijai mezoskopiskās detalizācijas līmenī.
2. Rezultāti, kas iegūti, pielietojot piedāvāto modeli, ir piemēroti turpmākai lēmumu pieņemšanai.

Pētījuma metodes

Promocijas darba pētījums balstās uz: sistēmas teoriju, statistiskas datu analīzes metodēm, mūsdienu imitācijas modelēšanas teoriju; zinātniskās literatūras analīzi, zinātniskajiem rakstiem, preses relīzēm, Eiropas Savienības Komisijas ziņojumiem, imitācijas vadlīnijām, iekšējās programmatūras instrukcijām, kā arī uz interneta avotiem. Datoratbalsts nepieciešamajiem pētījumiem bija: Microsoft Office Excel 2010, STATISTICA 8 pakotne, PTV VISION VISSIM mikroskopiskās simulācijas programmatūra, un simulācijas programmatūra ExtendSim 8.

Darba zinātniskā novitāte

Darba gaitā tika iegūti šādi, transporta inženierzinātnē jauni rezultāti:

1. Jaunas satiksmes plūsmas imitācijas pieejas attīstība, kas pamatota galvenokārt uz DR pieeju un ko autors dēvē par DRTRM (Discrete Rate Traffic Reference Model).
2. DRTRM metodoloģijas izstrāde satiksmes imitācijas pētniecībai un praktiskiem uzdevumiem.
3. Ir piedāvāta izstrādātas pieejas realizācija transporta plūsmu modelēšanai, kuri demonstrē, ka DRTRM modeļi var izmantot transporta plānotāji, kā ātru un efektīvu rīku, lēmumu pieņemšanas atbalsta procesā.
4. DRTRM validācijas rezultāti ļauj atzīt pieeju par ticamu.

Darba praktiskā vērtība

1. Metodoloģijas un algoritmu izstrāde DRTRM izmantošanai transporta programmatūrā.
2. Jaunā mezoskopiskā satiksmes imitācijas modeļa priekšrocību pamatojums, balstoties uz skaitliskiem piemēriem salīdzinot ar mikroskopiskajiem modeļiem.

3. Praktiskā DRTRM izmantošanas aprobācija konkrētiem pētījumiem:
    a. Projekts "Eiropas un Āzijas multimodālā koridora intelektuālās sistēmas modeļa izstrāde starptautiskajai loģistikas ķēdei Latvija – Baltkrievija (TransLaB)", ko izsludinājusi Latvijas Republikas izglītības un zinātnes ministrija (2007-2009).
    b. Latvijas Valsts pētījumu programma „Vietējo resursu (zemes dzīļu, meţa, pārtikas un transporta) ilgtspējīga izmantošana - jauni produkti un tehnoloģijas (NatRes)". Projekts Nr. 4. "Latvijas transporta sistēmas harmonizācijas ilgtermiņa programmas izstrāde (LaTRANS)".
4. Iegūtie rezultāti kļuva par pamatu daļai Transporta un sakaru institūta lekciju kursiem: programmas 4352503 "Transporta komerciālā ekspluatācija" kursā "Transporta modelēšana" un programmas 4534507 "Transports un loģistika" kursā "Imitācijas modelēšana transportā un loģistikā".

Tēzes aizstāvēšanai

Darbā aizstāvēšanai ir izvirzītas sekojošas tēzes:

1. Dažāda veida imitācijas modelēšanas formas būs plaši pielietotas nākotnē, kā lēmumu atbalsta sistēmas standarta elements, risinot plānošanas un vadības uzdevumus transporta sistēmās.
2. Discrete Rate procesu attēlošanas pieeja atļauj izveidot jaunu modeļu klasi (DRTRM - Discrete Rate Traffic Reference Model), paredzētas transporta plūsmu modelēšanai un analīzei mezoskopiska līmenī.
3. Piedāvātas mezoskopiskas pieejas izmantošana atļauj būtiski samazināt modeļa izstrādāšanas laiku, līdz ar to, samazinot modelēšanas izmaksas.
4. Demonstrēts, ka sakarību starp laika intervālu un automašīnu daudzumu, kuri nobrauca krustojumu noteiktā laika intervāla, var aprakstīt ar trešās pakāpes regresijas modeļi, kurš ir lineārs pēc parametriem.
5. Modelēšanas rezultāti iegūti ar piedāvātas mezoskopiskas pieejas izmantošanu, būtiski neatšķiras no mikromodelēšanas rezultātiem un var būt izmantoti lēmumu pieņemšanas atbalsta procedūrā.

Zinātniskās konferences un semināri

Galvenie pētījuma rezultāti tika prezentēti 9 zinātniskajās konferencēs un semināros: 25th European Conference on Modelling and

Simulation (Polija, Krakova, 2011); 1st International Conference on Road and Rail Infrastructure (Horvātija,Opatija, 2010); 23rd European Conference on Modelling and Simulation (Spānija, Madride, 2009); 2nd International Logistics PhD Students' Workshop (Vācija, Magdeburga, 2009); International Conference "Modelling of Business, Industrial and Transport Systems" (Latvija, Rīga, 2008); International Conferences "Reliability and Statistics in Transportation and Communication" (Latvija, Rīga, 2012, 2010, 2008, 2007).

Publikācijas

Pētījumu rezultāti tika publicēti 18 zinātniskajos izdevumos. Autora publikāciju sarakstu var atrast kopsavilkuma beigās.

Darba struktūra

Promocijas darbs sastāv no ievada, 5 nodaļām, slēdziena, atsauču saraksta un 7 pielikumiem. Darbam ir 134 lappuses un tās ietver 59 attēlus un 26 tabulas. Atsauču saraksts ietver 103 avotus. Darba struktūra ir šāda:
Ievads. Pētījuma objekts un temats tiek definēti, pamatojoties uz aktualitāti; tiek veikts zinātniskās literatūras pārskats, ņemot vērā jautājumus, kas saistīti ar formulēto pētījuma mērķi un uzdevumiem.

1. nodaļa. Satiksmes analīzes rīku pārskats. Tiek izpētīti un klasificēti satiksmes analīzes rīki, tiek analizēta imitācijas modelēšanas loma transporta jomā, un apkopotas satiksmes imitācijas analīzes rīku attīstības tendences. Tiek sniegts dažādu modeļu, kas klasificēti kā mezoskopiski, pārskats un analīze. Tie ir: CONTRAM, DYNAMIT, DYNASMART, FASTLANE, DTASQ, MEZZO, AMS un Šūnu Automāti.

2. nodaļa. Imitācijas pieejas salīdzinošā analīze. Tiek uzsvērta DR pieejas vieta starp pazīstamām klasiskām imitācijas modelēšanas pieejām, tādiem kā, diskrēta notikuma modelēšana, sistēmas dinamikas un aģentu modelēšana. Šo pieeju salīdzinājums tiek veikts vispārējā līmenī un detalizēti.

3.nodaļa. Mezoskopiskās DR satiksmes imitācijas modeļa koncepcijas izstrāde. Šajā nodaļā attēlots DRTRM mezoskopiskais modelis transporta plūsmu modelēšanai, kas uzskatīts par DR pieejas paplašināšanu. Tiek formulētas divas modeļa alternatīvas: viena pārslogotam un otra nepārslogotam tīklam. Abiem veikta matemātiskā formalizācija.

4.nodaļa. Izstrādātās pieejas salīdzināšana ar mikroimitaciju. Situāciju izpēte. Šajā nodaļā pierādīta DRTRM pieejas izmantošana viena, ar luksoforu regulēta krustojuma imitācijā, kā arī divu savstarpēji savienotu

krustojumu imitācija. Microsoft Excel un VBA tiek izmantoti abu modeļu kodēšanai. Imitācija ir balstīta uz mākslīgiem datiem, lai parādītu DRTRM pieejas pielietošanas ideju šāda veida imitācijai. Ir aprakstīti arī daži imitācijas rezultāti; imitācijas modeļa kodols ir parādīts tabulas formā. Galvenais šo piemēru mērķis ir detalizēti attēlot imitācijas algoritmu.

5. nodaļa Pilsētu transporta koridora mezoskopiskā imitācija. Pēdējā nodaļa demonstrē pilsētas transporta koridora imitāciju, izmantojot DRTRM pieeju. Pilsētas transporta koridors sastāv no 10 krustojumiem, un vairākus no tiem kontrolē luksofori. Imitācija ir balstīta uz faktiskajiem ieejas datiem, kas iegūti, veicot satiksmes plūsmas izpētes projektu Rīgas centrā 2011. gadā. Projekta ietvaros tika radīts mikroskopiskais modelis, kas ļauj pārbaudīt mezoskopiskā modeļa izejas datus salīdzinot ar jau apstiprinātu mikroskopisko modeli. Mezoskopiskais modelis tika izveidots ar ExtendSim imitācijas programmatūru. Īpaša uzmanība šajā nodaļā tiek pievērsta krustojuma šķērsošanas funkcijas veida noteikšanai, kas izmantota ierosinātā transporta plūsmu modelī.

Secinājumi. Tiek aprakstīts darba kopsavilkums, kā arī galvenie atklājumi un secinājumi.

Autora publikāciju saraksts, modeļu VBA kods, dažādas tabulas un attēli ir atrodami **Pielikumā**.

DARBA NODAĻU KOPSAVILKUMS

1. nodaļa (Satiksmes analīzes rīku pārskats)

Satiksmes analīzes rīki ir kolektīvs termins, ko izmanto, lai aprakstītu dažādas programmatūras analītiskās procedūras un metodikas, kas atbalsta dažādus satiksmes aspektus un transporta analīzi. Līdz šodienai, daudzas satiksmes analīzes metodes un rīkus ir izstrādājušas valsts aģentūras, pētniecības organizācijas un konsultanti. Satiksmes analīzes rīkus var iedalīt šādās kategorijās:

- **Skiču plānošanas rīki.** Skiču plānošanas metodes un rīki veido vispārēju novērtēšanu par pārvietošanās pieprasījumu un satiksmes darbībām, reaģējot uz pārvadājumu uzlabojumiem.
- **Pārvietošanās pieprasījuma modeļi.** Pārvietošanās pieprasījuma modeļiem ir īpašas analītiskās spējas, piemēram, prognozes par pārvietošanās pieprasījuma un galamērķa izvēli, režīmā izvēli, dienas laika izvēli ceļojumam, maršruta izvēli un satiksmes plūsmas attēlojumu autoceļu tīklā.
- **Analītiskie/noteicošie rīki (balstīti uz HCM).** Lielākā daļa analītisko/noteicošo rīku īsteno autoceļu kapacitātes rokasgrāmatas (HCM) procedūras. Šie rīki ātri prognozē plūsmas blīvumu, ātrumu, kavējumus un rindu veidošanos attiecībā uz dažādām pārvadājumu iekārtām, un ir apstiprināti ar datiem, laboratorijas pārbaudēm, vai maza mēroga eksperimentiem.
- **Satiksmes signālu optimizācijas rīki.** Tie ir galvenokārt paredzēti, lai attīstītu optimālu signāla pārslēgšanas un laika periodu noteikšanas modeļus izolētām, maģistrālām ielām vai signāla tīkliem. Tas var ietvert kapacitātes aprēķinus; cikla garumu sadalīšanas optimizāciju, ieskaitot kreisos pagriezienus; un koordinācijas/ofseta plānus.
- **Makroskopiskie imitācijas modeļi.** Makroskopiskie imitācijas modeļi ir balstīti uz satiksmes plūsmas, ātruma un blīvuma noteicošajām attiecībām. Makroskopiskā modeļa imitācija notiek izpētot sadaļu pēc sadaļas, nevis vērojot atsevišķus transportlīdzekļus.
- **Mikroskopiskie imitācijas modeļi.** Mikroskopiskie modeļi imitē atsevišķu transportlīdzekļu kustību, pamatojoties uz auto sekošanas un joslas maiņas teorijām. Raksturīgi, transportlīdzekļi ieiet transporta tīklā uz sadalījuma likuma bāzes (stohastisks process) un tiek uzskaitīti caur tīklu mazos laika intervālos (piemēram, 1 sekundi vai sekundes daļu).

- **Mezoskopiskie imitacijas modeļi.** Mezoskopiskie imitācijas modeļi apvieno gan mikroskopisko, gan makroskopisko imitācijas modeļu īpašības.

Tā kā šis pētījums galvenokārt ir veltīts imitācijas rīkiem, turpmāk tiks ņemti vērā tikai transporta plūsmu analīzes rīki, kuru pamatā ir imitācijas modelēšana.

Satiksmes sistēmas modeļus var klasificēt pēc dažādiem kritērijiem. Daži no tiem varētu būt šādi:

- pēc risinājuma: analītisks vai simulācija;
- pēc procesa attēlojuma: dinamisks vai statisks;
- pēc mainīgo skalas: nepārtraukta vai diskrēta;
- pēc procesa: stohastisks vai patstāvīgs;
- pēc laika maiņas pieejas: balstīts uz laika periodiem vai notikumiem; u.c.

Bet populārākā klasifikācija, kas tiek plaši izmantota, ir balstīta uz modeļa detalizācijas līmeņa. Pašlaik izšķir 4 līmeņus transporta modeļiem. Tie ir šādi: sub-mikroskopiskais modelis, mikroskopiskais modelis, makroskopiskais modelis un mezoskopiskais modelis. Gan mikroskopiskie, gan makroskopiskie modeļi tiek uzskatīti par klasiskiem, un šos modeļus ir vienkārši definēt. Darbā autors sniedz detalizētu šo modeļu analīzi.

Mezoskopiskie modeļi. Šie modeļi nav tik plaši izmantoti. Tas ir saistīts ar to, ka zinātnieki dažādi interpretē terminu "mezoskopiskā modelēšana". Daži pētnieki uzskata, ka mezoskopiskajai modelēšanai būtu jāintegrē gan mikroskopiskas, gan makroskopiskas līmeņa īpašības. Tie atbilst šādai definīcijai: "Mezoskopiskie modeļi apvieno gan mikroskopiskās, gan makroskopiskās imitācijas modeļu īpašības. Šie modeļi imitē atsevišķus transportlīdzekļus, bet apraksta to darbību un mijiedarbību, balstoties uz kopējām (makroskopiskajām) attiecībām". Vēl viena definīcija ir šāda: "Mezoskopiskie satiksmes plūsmas modeļi ietver makroskopisko rādītāju novērtējumu mikroskopiskā līmenī".

Ir vairāki imitācijas programmatūras produkti, kas tiek plaši izmantoti. Darbā autors sniedz detalizētu šo rīku analīzi. Daži no tiem ir kļuvuši par ieteicamiem rīkiem dažās valstīs, kā, piemēram, VISSIM/VISUM Vācijai, AIMSUN Spānijai, un PARAMICS Lielbritānijā.

Imitācija kā satiksmes analīzes rīks tagad ir ikdienas līdzeklis praktiķiem un pētniekiem.

Literatūrā, mezoskopisko satiksmes plūsmas modeļu definīcija un jēdzieni ir ļoti atšķirīgi, un dažiem modeļiem ir atšķirīgas modelēšanas koncepcijas. Šajā darbā ir aprakstīti daži simulācijas modeļi:

CONTRAM bija pirmais jebkad izstrādātais modelis, kas parādīja mezoskopiskās modelēšanas aspektus. Modeļa nosaukums nozīmē

"CONtinuous TRaffic Assignment Model". Tā struktūra ir balstīta uz saiknes tīklu, kur transportlīdzekļu saiknes uzvedību nosaka šī posma brīvās plūsmas ātrums vai ātruma / plūsmas attiecība.

DynaMIT (Dynamic Network Assignment for the Management of Information to Travellers) ir reālā laika dinamiska satiksmes pielietošanas programmatūra, kas nodrošina satiksmes prognozējamību un pārvietošanās padomus. Šī sistēma ir izstrādāta, 1990. gadā, ar mērķi, simulēt un prognozēt reālā laika satiksmes informācijas efekta ietekmi uz autovadītājiem.

DYNASMART, FASTLANE, DTASQ. Vēl viena ideja ir balstīta uz rindas-servera pieeju. Šī pieeja attēlo ceļu kā brauktuvi, kurā pastāv kustības daļa un daļa, kurā veidojas auto rindas. Joslas parasti netiek modelētas. Transportlīdzekļi ir attēloti individuāli, un tiem ir savs individuālais ātrums. Tajā pašā laikā, to uzvedība nav modelēta detalizēti. Transportlīdzekļi pārvietojas pa ceļa brauktuvi ar ātrumu, kas tiek noteikts, izmantojot makroskopisko ātruma blīvuma funkciju. Sasniedzot auto straumes beigas, rindas serveris pārvieto transportlīdzekļus uz nākamo ceļa segmentu. Šīs pieejas priekšrocība ir saistīta ar transportlīdzekļu individuālu imitāciju un ar vieglu makroskopisko ātruma/blīvuma attiecību kalibrēšanu. Serveru jauda (satiksmes mezglos) ir atkarīga no plūsmas piesātināšanas un to dispersijas (novērtētās vai aprēķinātās). Signālu kontrolieru gadījumā, imitācijas serverus aizstāj stāvokļa maiņas vārti (atvērts/slēgts stāvoklis) saskaņā ar attiecīgo luksofora stāvokli (zaļš / dzeltens / sarkans). Te jāatzīmē, ka galvenā priekšrocība šo modeļu ir tā, ka transportlīdzekļi tiek modelēti atsevišķi, tādējādi sniedzot informāciju par ceļošanas maršrutiem. Tas nav pieejams iepriekš aprakstītajiem modeļiem, jo šajos modeļos transportlīdzekļi tiek sagrupēti.

AMS modelis apzīmē "Anisotropic Mesoscopic Simulation" un ir izstrādāts, pamatojoties uz diviem intuitīviem plūsmas raksturojumiem:

- Jebkurā laikā, transportlīdzekļa ātrumu ietekmē tikai priekšā, kā arī tajā pašā vai blakus joslā esošie transportlīdzekļi.
- Satiksmes plūsmas ietekme uz transportlīdzekļi samazinās ar attāluma palielināšanu.

Iepriekš minēti raksturojumi definē "anizotropo" satiksmes plūsmas īpašības un parāda vispārīgu AMS modeļa principu.

Satiksmes sistēmu **MEZZO** var aprakstīt grafiski ar diviem objektiem: mezgliem un saiknēm. Mezgli pārstāv satiksmes plūsmas krustošanās punktu, satiksmes sākumu un galamērķi. Saiknes ir ceļš, kas savieno mezglus. Saiknes ir vienvirziena, tādēļ, ja ir jāmodelē divvirzienu ceļš, jāizmanto divas saiknes. Joslas modelī netiek attēlotas atsevišķi. Parasti mezgliem ir vairākas ienākošās un izejošās saiknes. Saiknes ir

sadalītas braukšanas daļā un rindas daļā. Braukšanas daļa ir ceļa segments ar brīvām pārvietošanās spējām. Rindas daļa ir ceļa segments, ko aizņem transportlīdzekļi, kas stāv rindā.

Esošo mezoskopisko modeļu analīze liecina, ka pašlaik trūkst vienotas pieejas, kas varētu tikt izmantota satiksmes analīzes pētniecības uzdevumos. Ir dažas programmas, kurām nav izteiktu priekšrocību pāri klasiskajiem modelēšanas veidiem.

Tieši tāpēc jaunas imitācijas pieejas izstrāde konkrētu uzdevumu risināšanai joprojām ir vitāli svarīga. Iespējams ir paveikt atsevišķus svarīgus uzdevumus: transporta tīkla fragmentu modelēšana ar lielu transporta mezglu skaitu; plašu transporta koridoru modelēšana (ar lielu attālumu starp transporta mezgliem); u.c.

2. nodaļa (Imitācijas pieeju salīdzinošā analīze)

Imitācija ir spēcīgs dažādu sistēmu analīzes un izmeklēšanas līdzeklis. Mēs varētu uzsvērt šo instrumentu universālumu kā galveno priekšrocību, kas nozīmē spēju modelēt dažādas sistēmas. Imitācijas pētniecības nozare ir 5 pieejas: diskrēto notikumu imitācija, aģenta modelēšana, sistēmas dinamika, hibrīda modelēšana un diskrētās likmes modelēšana.

Diskrēto notikumu simulācija (DES) ir paradigma, kas tiek realizēta lielākajā daļā programmatūras rīku (piemēram, GPSS, Extend, Arena, Witness, Automod, FlexSim, Plant simulation u.c.). Šī pieeja ir pazīstama kopš 1960. gadiem, kad to aprakstīja Geoffrey Gordon. Diskrēto notikumu imitācijas modelim ir trīs īpašības:

- Stohastiskā - vismaz daži sistēmas stāvokļa mainīgie lielumi ir gadījuma lielumi.
- Dinamiskā - sistēmas stāvokļa mainīgo lielumu laikā novērtējums ir svarīgs.
- Diskrēts notikums - būtiskas sistēmas stāvokļa mainīgo lielumu izmaiņas ir saistītas ar notikumu, kas rodas tikai diskrēta laika gadījumā.

Galvenie *aģentu modelēšanas* jēdzieni parādījās tikai 1990. gadā. Šobrīd literatūrā pastāv dažādas definīcijas; no praktiskā viedokļa, aģentu modelēšana - imitācijas modelēšanas metode, kura pēta decentralizēto aģentu uzvedību. Izmantojot aģentu modelēšanu, modelētājs identificē aktīvus objektus - *aģentus* (tie var būt cilvēki, uzņēmumi, projekti, aktīvi, transportlīdzekļi, pilsētas, dzīvnieki, kuģi, produkti u.c.), nosaka viņu uzvedību (braukšanas ieradumus, reakciju, atmiņu, stāvokļus u.c.), ievieto tos noteiktā vidē, var izveidot savienojumus un veic simulāciju. Šobrīd

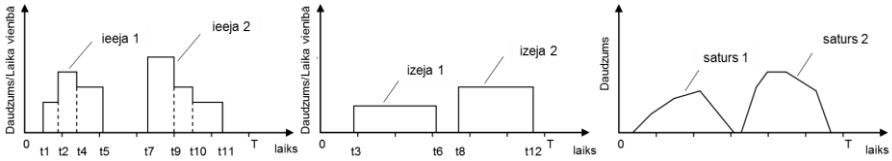
tirgū ir pieejami tikai daži programmatūras produkti; tie ir RePast, Swarm, ASCAPE, NetLogo un AnyLogic.

Sistēmas dinamika (SD) ir pieeja ar kuru palīdzību ir iespējams saprast sarežģīto sistēmu uzvedību laikā un izmantojot kvalitatīvus un kvantitatīvus modeļus - iegūt ideju par to, kā informācijas atgriezeniskā saikne ietekmē sistēmas uzvedību. Faktiski, sistēmas dinamika ir diferenciālvienādojumu kopa. Tieši tāpēc sistēmas dinamika nepēta konkrētu objektu, bet pēta apkopotu objektu kopas, kas pāriet no viena krājuma uz otru ar intensitāti, ko nosaka plūsmas mainīgie. Pašlaik ir vairāki programmatūras produkti, kas nodarbojas ar sistēmas dinamikas pieeju, un populārākie no tiem ir: Vensim, Powersim, iThink un AnyLogic.

Hibrīdā modelēšanas pieeja nav klasiska, bet tā tiek plaši izmantota pēdējos gados. Galvenā ideja ir apvienot dažādas pieejas vienā modelī. Simulējot dažādas sistēmas daļas, izmantojot dažādas pieejas, tiek sasniegta elastība, un modeļa izstrādes laiks tiek samazināts. Nav stingru noteikumu, kas paredz īpašu pieeju kombinēšanu, tas ir atkarīgs no pētnieka izvēles. Vienīgais ierobežojums šajā gadījumā ir izmantotās programmatūras iespējas. Vispazīstamākā programmatūra, kas ļauj veidot hibrīda modeļus, ir AnyLogic.

Discrete Rate (DR) filozofiju, kas stāv aiz šīs pieejas, var raksturot ar frāzi "notikumu plānošana nepārtrauktiem procesiem". Atsevišķu plūsmas objektu attēlojums, kas attēlo personas, darba uzdevumus, preces u.c. netiek veikts. Vienīgie nodarbinātie locekļi, kas tiek izmantoti modelī pārstāv attiecīgo materiālu vai priekšmetu daudzumu, un var tikt mainīti ar matemātisku formulu katra imitācijas soļa laikā.

Mezoskopiskā modelēšana parāda tikai diskrētas attiecīgo nepārtraukto plūsmu izmaiņas. Tas nozīmē, ka plūsmu intensitāte $\lambda(t)$ paliek nemainīga katrā laika intervālā starp plūsmas izmaiņām. Funkcija $\lambda(t)$ varētu tikt dēvēta par nemainīgu funkciju. 1.attēls parāda vienkārša krājuma ieejas un izejas plūsmu diagrammas.



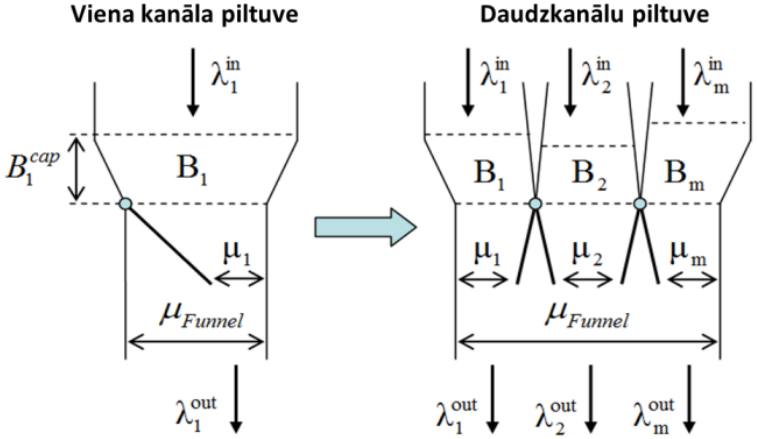
1.attēls. *Procesa prezentācijas DR pieejā*

Attēlā labajā pusē ir attēlots ieejas un izejas plūsmas krājuma saturs. Tā kā $\lambda(t)$ ir nemainīga funkcija, krājuma satura grafiks varētu būt tikai lineāra funkcija.

Galvenās šā procesa priekšrocības, kuras ir attēlotas mezoskopiskajā modelēšanā ir iespējama precīzu laika momentu prognozēšana, satura krājums un kumulatīvas plūsmu vērtības, kuras sasniedz dotas vērtības.
Tātad mezoskopiskajam modelim ir raksturīgas duālas īpašības:

- tās plūsmas procesus raksturo intensitāte $\lambda(t)$ (kā tas ir nepārtrauktā tipa modelī);
- krājuma procesiem un kumulatīvajām plūsmu vērtībām var tikt plānoti nākotnes notikumi (kā tas diskrētu notikumu modeļos).

Vienoti nepārtraukti plūsmas fragmenti, kas tiks saukti par produkta partijām, var tikt uzskatīti par objektiem. Mezoskopiskais modelis ietver iespēju kontrolēt jebkuru produkta partijas ceļu un tā kustības caur modeļa struktūru laikā. Galvenās sastāvdaļas, kas, izmantotas mezoskopiskajā modelī, tiek minētas šeit: avots, piltuve, un transporta elements. Avota elementam ir jāievada plūsma sistēmā; galvenais šā komponenta parametrs ir intensitāte. Tomēr jāatzīmē, ka intensitāte šajā gadījumā ir ne tikai konstanta vērtība, bet tā varētu mainīties atkarībā no laika. Nākamais un svarīgākais elements ir piltuve. Piltuves varētu iedalīt divās klasēs: viena kanāla piltuves un daudzkanālu piltuves. Šāds sadalījums ļauj modelēt daudzproduktu sistēmas. Piltuves princips ir attēlots 2. attēlā.



2.attēls. *Viena kanāla piltuve un daudzkanālu piltuve*

Apzīmējumi ir vienādi viena kanāla un daudzkanālu piltuvei:
λ_i^{in}- ieejas plūsma kanālam i;
B_i^{cap}- kapacitāte kanālam i;
B_{funnel}^{cap}- piltuves ietilpība;
B_i- pašreizējais produkta uzkrājums kanālam i;

μ_i - apkalpošanas intensitāte kanālam i;
μ_{funnel} - apkalpošanas intensitāte piltuvei;
λ_i^{out}- izejas plūsma no kanāla i.
Ierobežojumus definē šādi:

$$B_i \le B_i^{cap}, \sum B_i^{cap} \le B_{funnel}^{cap},$$
$$\lambda_i^{out} \le \mu_i, \sum \mu_i \le \mu_{funnel}.$$

Izejas plūsmu varētu aprēķināt, izmantojot šādu formulu:

$$\lambda_i^{out} = \begin{cases} 0, \lambda_i^{in} = 0 \text{ and } B_i = 0 \\ \lambda_i^{in}, \lambda_i^{in} > 0 \; and \; \lambda_i^{in} \le \mu_i \text{ and } B_i = 0 \\ \mu_i, B_i > 0 \end{cases}$$

Produkta uzkrājums kanālam varētu iegūt, izmantojot šādu formulu:

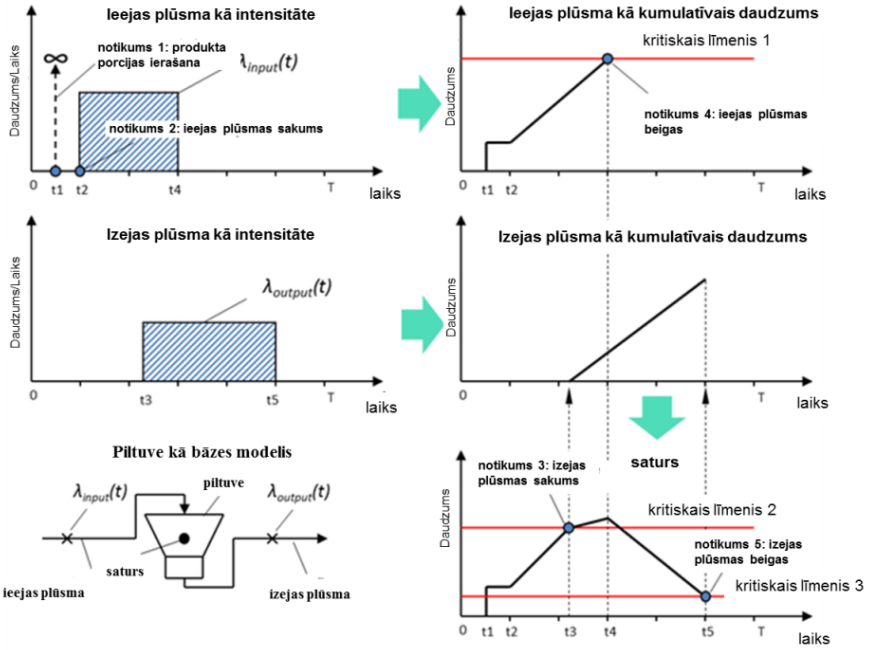
$$B_i(t + \Delta t_j) = B_i(t) + \left(\lambda_i^{in}(t) - \lambda_i^{out}(t)\right) \cdot \Delta t_j.$$

Jāatzīmē, ka parametrus λ_i^{in} un μ_i var mainīt $t_j = t_{j-1} + \Delta t_j$. Tas nozīmē, ka šie parametri ir atkarīgi no laika un var tikt uzrakstīti arī šādā veidā: $\lambda_i^{in}(t)$ un $\mu_i(t)$.

Posma vērtība varētu būt fiksēta vai mainīga. Posma veids, kas būtu jāizmanto modelī ir atkarīgs no imitācijas sistēmas veida un procesiem, kas darbojas sistēmu iekšpusē. Notikumu plānošana ir svarīgākā abos gadījumos. 3.attēls ir notikumu plānošanas piemērs nepārtrauktiem procesiem piltuvē. Pirmie divi notikumi (notikums 1 un notikums 2) tiek pieņemti par neatkarīgiem no sistēmas pašreizējā stāvokļa. Īpaši nosacījumi ir noteikti visiem citiem notikumiem:

- 3.notikums: piltuves izejas plūsma var sākties tikai tad, kad tās krājums ir sasniedzis kritisko 2. līmeni;
- 4.notikums: piltuves ieejas plūsma tiek pārtraukta, kad viss produktu daudzums plūsmā ir sasniedzis kritisko 1. līmeni;
- 5.notikums: piltuves izejas plūsma tiek pārtraukta, kad tās krājums ir sasniedzis kritisko 3. līmeni.

Laikus t3 t4 un t5 var precīzi aprēķināt un ievadīt stimulatoru nākotnes notikumu ķēdē. Tikai pieci notikumi jāapstrādā mainīgā laika intervālā Δt. Runājot par veiktspēju, šāda veida laika avansa priekšrocība pāri fiksētam laika posmam Δt ir acīmredzama.



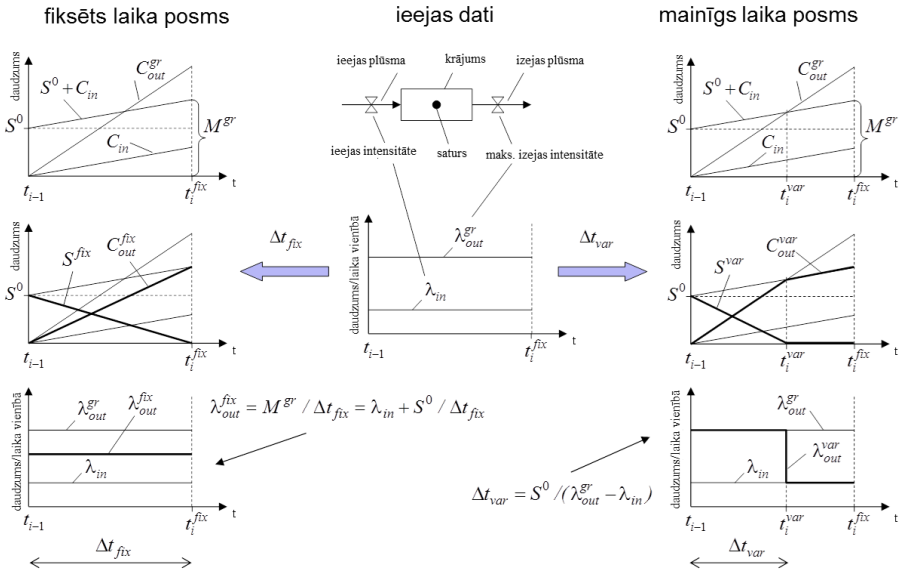
3.attēls. *Notikumu plānošana nepārtrauktiem procesiem*

Kā tas tika minēts iepriekš, divi iespējamie laika posma veidi var tikt izvēlēti mezoskopiskajai modelēšanai: fiksēts laika posms un mainīgs laika posms. Mainīgā laika posma izmantošana sniedz modelim lielāku elastīgumu un tā rezultātā – precīzāku izejas rezultātu beigās. Tomēr no otras puses fiksētu laika posmu ir vienkāršāk realizēt. 4. attēlā ir attēlotas vispārējas atšķirības abos gadījumos: fiksēta laika posma un mainīga laika posma.

Galvenā mezoskopiskās modelēšanas iezīme ir punkts, ka visas plūsmu $\lambda(t)$ intensitātes katrā modeļa laika posmā t paliek nemainīgas. Tajā pašā laikā, posma vērtībai varētu būt piešķirta fiksēta vērtība vai tā būtu aprēķināta katram jaunam posmam. Šī situācija tiks aprakstīta turpmāk, pamatojoties uz vienkāršu uzkrājēju (sk. 4. attēlu)

Ir sagaidāms, ka pašreizējais procesa laiks ir t_{i-1}. Šādas vērtības tiek pieņemtas:

- krājuma līmenis $S(t_{i-1})$, laikā t_{i-1} kas vienāds ar S^0;
- fiksēts laika posms Δt_{fix};
- pastāvīga ieejas plūsmas intensitāte λ_{in};
- maksimālā izejas plūsmas intensitātes vērtība λ_{out}^{gr}.



4.attēls. *Mezoskopiskā modelēšana ar fiksēto un mainīgo laika posmu*

Fiksētā laika posma gadījumā, nākamais laika posms tiek noteikts, izmantojot šādu formulu:

$$t_i^{fix} = t_{i-1} + \Delta t_{fix} \tag{1}$$

Ja krājuma izejas plūsma netiks ņemta vērā, uzkrājēja līmenis laikam t_i^{fix} būs vienāds ar:

$$S(t_i^{fix}) = S^0 + C_{in}(t_i^{fix}) = S^0 + \lambda_{in}\Delta t_{fix} = M^{gr} \tag{2}$$

Ja izejas plūsmas maksimālā intensitātes λ_{out}^{gr} vērtība ir tik maza, ka šāds nosacījums ir pareizs

$$C_{out}^{gr}(t_i^{fix}) = \lambda_{out}^{gr}\Delta t_{fix} \le M^{gr} \tag{3}$$

tad reālā izejas plūsmas intensitāte λ_{out}^{fix} visos intervālos būs vienāda ar Δt_{fix}. Tālāk tiks aprakstīts nosacījums, kad 3 gadījums nav pareizs. Tas nozīmē, ka uzkrājēja līmenis varētu tikt samazināts līdz 0 laika brīdī t_i^{fix}. Izejas plūsmas intensitāte λ_{out}^{fix} šajā gadījumā nevar būt λ_{out}^{gr} laika intervālā Δt_{fix}, jo tas novedīs pie negatīvām vērtībām uzkrājēja līmeņa laikā t_i^{fix}.

4.attēlā ir attēloti šādi divi gadījumi:

- Nākamo laika procesa momentu t_i^{fix} nosaka fiksēts laika posms Δt_{fix};
- Nākamo procesa posmu Δt_{var} nosaka laika brīdis t_i^{var}, kurā notikums notiks (uzkrājēja līmenis sasniegs 0).

Fiksētajam posmam Δt_{fix} laika intervālā jebkādas plūsmu izmaiņas nevar tikt atspoguļotas. Tiek pieņemts, ka laika intervāla Δt_{fix} beigās, kopējais izejas plūsmas apjoms būs M^{gr}. Tas nozīmē, ka fiksēto intensitāti λ_{out}^{fix} varētu noteikt ar šādu formulu:

$$\lambda_{out}^{fix} \Delta t_{fix} = M^{gr} \tag{4}$$

No vienādojumiem 3 un 4 izriet:

$$\lambda_{out}^{fix} = \frac{M^{gr}}{\Delta t_{fix}} = \frac{\left(S^0 + \lambda_{in} \Delta t_{fix}\right)}{\Delta t_{fix}} = \lambda_{in} + S^0 / \Delta t_{fix} \tag{5}$$

Pastāvīga intensitāte λ_{out}^{fix} arī nozīmē, ka uzkrājēja līmenis $S^{fix}(t)$ intervālā tiks vienmērīgi (lineāri) samazināts līdz 0. Šajā gadījumā nevar tikt noteikts reāls laika brīdis t_i^{var}, kad uzkrājējs būs tukšs.
No otras puses, modelēšana ar mainīgu laika posmu Δt_{var}, ir balstīta uz sākotnējiem laika brīžu aprēķiniem t_i^{var}, tad noteiktie nosacījumi ir patiesi. Šajā piemērā šie nosacījumi ir šādi:

$$S^0 + \lambda_{in} \Delta t_{var} = \lambda_{out}^{gr} \Delta t_{var} \tag{6}$$

No 6. formulas izriet:

$$\Delta t_{var} = S^0 / \left(\lambda_{out}^{gr} - \lambda_{in}\right) \tag{7}$$

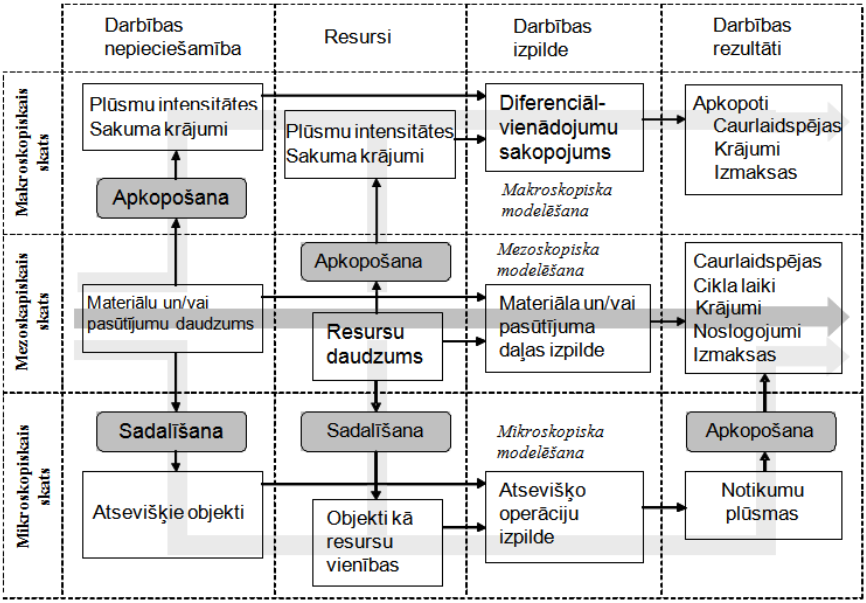
un

$$t_i^{var} = t_{i-1} + \Delta t_{var} \tag{8}$$

Tādējādi, izmantojot modelēšanu ar mainīgu laika posmu, tika izveidoti divi laika intervāli: (t_{i-1}, t_i^{var}) un $\left(t_i^{var}, t_i^{fix}\right)$. Pirmajā intervālā, reālā intensitāte λ_{out}^{var} ir vienāda ar maksimālo vērtību λ_{out}^{gr}, bet otra - vienāda ar λ_{in}. Uzkrājēja līmenis pirmā intervāla beigās samazinās līdz 0 un paliek šajā līmenī visā intervālā $\left(t_i^{var}, t_i^{fix}\right)$.

Visas iepriekš minētās imitācijas pieejas varētu iedalīt grupās. Iedalīšana varētu tikt balstīta uz detalizācijas līmeni. Diskrēto notikumu modelēšana un aģentu modelēšana galvenokārt tiek izmantota mikroskopiskā līmenī. Sistēmas dinamikas pieeju varētu piemērot makroskopiskā līmenī. Un, visbeidzot, DR pieeja darbojas mezoskopiskajā līmenī. 5. attēlā ir redzams, ka makroskopiskās pieejas piemērošana bieži tiek saistīta ar tādu darbību, kā datu apkopošana, tāpēc galīgie rezultāti bieži vien nav tik precīzi.

Mikroskopiska pieeja ir saistīta ar sadalīšanās darbību. Un tādēļ modeļa veidošana un eksperimenti ar to ir laika ietilpīgs process.



5.attēls. *Saistība starp modelēšanas līmeņiem*

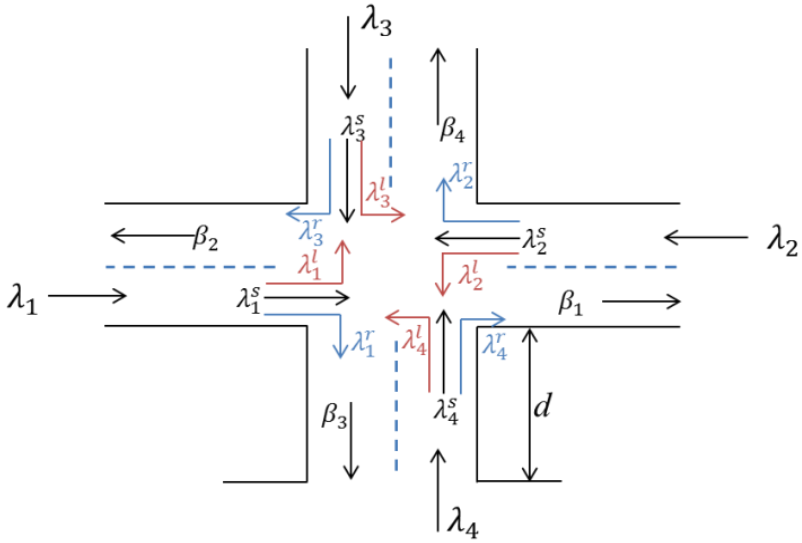
3. nodaļa (Mezoskopiskās DR satiksmes imitācijas modeļa koncepcijas izstrāde)

Kā jau iepriekš tika minēts, mezoskopiskie jēdzieni ir galvenokārt izmantoti loģistikas sistēmu modelēšanai. Tieši tāpēc mezoskopiskā pieeja ir galvenokārt izstrādāta plūsmām loģistikas sistēmās. Šīs nodaļas mērķis ir aktualizēt DR pieeju un pārveidot to satiksmes plūsmas imitācijai. Satiksmes plūsmas imitācija ir ļoti specifiska imitācijas pielietošanas joma esošo satiksmes un loģistikas sistēmu raksturīgo procesu atšķirību dēļ.

Šajā nodaļā tika formulēti divi matemātiskie modeļi: pirmais ir domāts nepārslogotam tīklam, un otrs pārslogotam. Parasti pārslogota tīkla modelis būtu jāuzskata par tādu, kurā tiek ņemtas vērā iespējamās rindas transporta sistēmās.

A. Nepārslogots tīkls. Apskatīsim tīklu, kas sastāv no diviem ar signālu kontrolētiem krustojumiem, ko savieno ceļš. 6.attēls ir šāda tīkla piemērs ar apzīmējumiem, kas lietoti, lai aprakstītu satiksmes plūsmas simulācijas matemātisko modeli. Kā redzams 6. attēlā, transporta sistēmā pastāv vairākas ieejas plūsmas $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ no dažādiem virzieniem. Tajā

pašā laikā, pastāv izejas plūsmu intensitātes, ko apzīmē ar $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$. Salīdzinot ar loģistikas sistēmu, šajā gadījumā vērojama ļoti sarežģīta plūsmu mijiedarbība. Šo mijiedarbību nosaka sadalot ieejas plūsmas dažādos virzienos un, tajā pašā laikā, kāds kontroles mehānisms būtu jāpiemēro, lai prioritizētu plūsmas. Lai parādītu plūsmu mijiedarbību, 7.attēlā tiek attēlots augstāks detalizācijas līmenis, izmantojot 6. attēlu, kas izskaidro plūsmu mijiedarbību.



6. attēls. *Transporta tīkla piemērs*

Transporta tīkls, kas, attēlots 6. attēlā, var būt arī izmantots saskaņā ar DR notāciju ar piltuvēm un transportēšanas elementu, kā tas ir redzams 7. attēlā, kur ir aprakstīts transporta tīkls, kas izmanto 5 piltuves un 1 transportēšanas elementu. Izmantoto apzīmējumu apraksts:

λ_i – ieejas plūsmas intensitāte no virziena i = 1 .. 5 (izmantotās vienības: PCU laika vienībā);

β_i – izejas plūsmas vērtība no virziena i = 1 .. 5 (izmantotās vienības: PCU laika vienībā);

$\lambda_i^l, \lambda_i^s, \lambda_i^r$ – plūsmas intensitāte pagriezieniem (l-pa kreisi, s-taisni, r-pa labi) no virziena i = 1 .. 5 (izmantotās vienības: PCU laika vienībā);

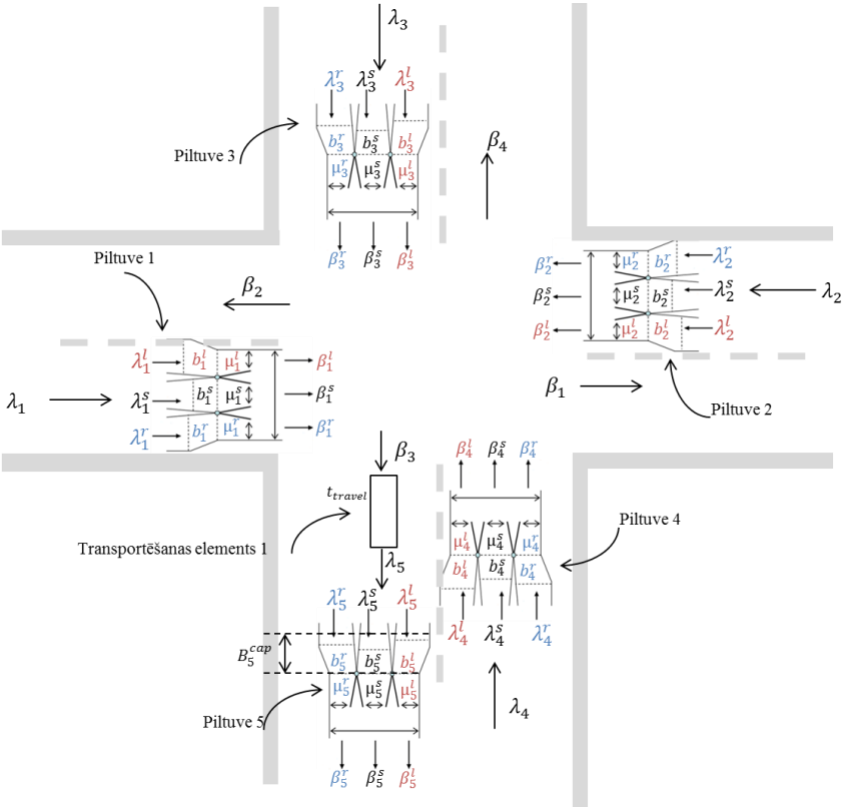
b_i^l, b_i^s, b_i^r - rindas garums pagriezieniem (l-pa kreisi, s-taisni, r-pa labi) no virziena i = 1 .. 5 (izmantotās vienības: PCU);

μ_i^l, μ_i^s, μ_i^r - kapacitāte pagriezieniem (l-pa kreisi, s-taisni, r-pa labi) no virziena i = 1 .. 5 (izmantotās vienības: PCU laika vienībā);

β_i^l, β_i^s, β_i^r - izejas plūsmas vērtība pagriezieniem (l-pa kreisi, s-taisni, r-pa labi) no virziena i = 1 .. 5 (izmantotās vienības: PCU laika vienībā);

β_i – kopēja izejas plūsma virzienā, i = 1 .. 5 (izmantotās vienības: PCU laika vienībā);

B_5^{cap} - maksimālā rindas garuma vērtība virzienam 4 (izmantotās vienības: PCU).



7.attēls. *Transporta tīkls DR notācijā*

Šādi vienādojumi varētu tikt izveidoti un ar to palīdzību definē plūsmas intensitāti pēc virzieniem un pagriezieniem:

$$\begin{cases} \lambda_i^r(t) = \lambda_i(t) p_i^r \\ \lambda_i^s(t) = \lambda_i(t) p_i^s \\ \lambda_i^l(t) = \lambda_i(t) p_i^l \\ p_i^r + p_i^s + p_i^l = 1 \end{cases} \quad (9)$$

kur p_i^r, p_i^s, p_i^l – pagriezienu varbūtība (l-pa kreisi, s-taisni, r-pa labi) no virziena i = 1 .. 5;
t – pašreizējais laiks.

$$\begin{cases} \beta_1(t) = \beta_1^s(t) + \beta_4^r(t) + \beta_3^l(t) \\ \beta_2(t) = \beta_2^s(t) + \beta_3^r(t) + \beta_4^l(t) \\ \beta_3(t) = \beta_3^s(t) + \beta_1^r(t) + \beta_2^l(t) \\ \beta_4(t) = \beta_4^s(t) + \beta_1^r(t) + \beta_2^l(t) \\ \beta_5(t) = \beta_5^s(t) + \beta_5^r(t) + \beta_5^l(t) \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \mu_i^r(t) = f_i^r(\Delta t(t)) \\ \mu_i^s(t) = f_i^s(\Delta t(t)) \end{cases} \quad (11)$$

kur Δt (t) - laika posms laika t ietvaros (šajā demonstrācijā vienāds ar zaļās fāzes ilgumu (vienkāršošanai t_{green}) ir vienāds visos virzienos un visos krustojumos;
$f_i^n()$ – šķērsošanas funkcija, kas nosaka, caurlaides spējas no virziena $i=1..5$ un pagrieziena $n \in (l, s, r)$.

Iepriekšminētās funkciju formas varētu tikt noteiktas empīriski, veicot novērojumus reālā satiksmē; šis uzdevums tika atrisināts 5.nodaļā.

$$\beta_{i\in(1,2,4,5)}^s(t) = \begin{cases} 0,\ \lambda_i^s(t) = 0\ and\ b_i^s(t) = 0 \\ \lambda_i^s(t), \lambda_i^s(t) > 0\ and\ \lambda_i^s(t) \le \mu_i^s\ and\ b_i^s(t) = 0 \\ \mu_i^s, b_i^s(t) > 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$\beta_{i\in(2,3,4,5)}^r(t) = \begin{cases} 0,\ \lambda_i^r(t) = 0\ and\ b_i^r(t) = 0 \\ \lambda_i^r(t), \lambda_i^r(t) > 0\ and\ \lambda_i^r(t) \le \mu_i^r\ and\ b_i^r(t) = 0 \\ \mu_i^r, b_i^r(t) > 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \mu_1^l = f_1^l\left(t_{green} - f_2^{s^{-1}}(\beta_2^s(t))\right) + h \\ \mu_2^l = f_2^l\left(t_{green} - f_1^{s^{-1}}(\beta_1^s(t))\right) + h \\ \mu_3^l = f_3^l\left(t_{green} - f_4^{s^{-1}}(\beta_4^s(t))\right) + h \\ \mu_5^l = f_5^l(t_{green}) + h \end{cases} \quad (14)$$

kur h – papildus kapacitāte, kas izskaidrojama ar krustojuma šķērsošanu laikā, kad luksoforā deg dzeltenā gaisma;
$f_i^{n^{-1}}()$ – reversa šķērsošanas funkcija, kas nosaka laiku, kas vajadzīgs, lai šķērsotu krustojumu.

$$\beta_{i\in(1,3,5)}^l(t) = \begin{cases} 0,\ \lambda_i^l(t) = 0\ and\ b_i^l(t) = 0 \\ \lambda_i^l(t), \lambda_i^l(t) > 0\ and\ \lambda_i^l(t) \le \mu_i^l\ and\ b_i^l(t) = 0 \\ \mu_i^l, b_i^l(t) > 0 \end{cases} \quad (15)$$

$$\Delta b_5(t) = B_5^{cap} - b_5^r(t) - b_5^s(t) - b_5^l(t) \tag{16}$$

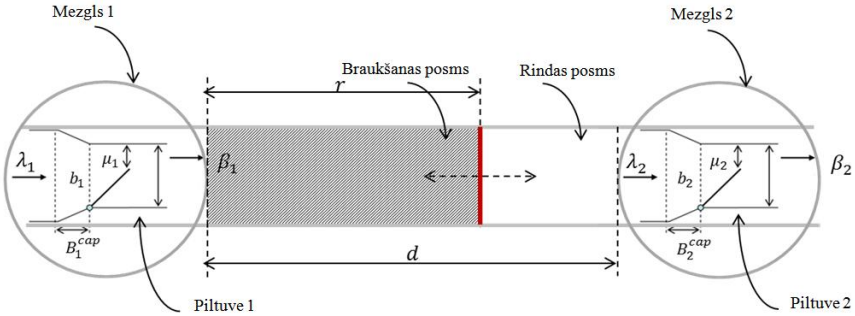
$$\beta_1^r(t) = \begin{cases} 0,\ \lambda_1^r(t) = 0\ and\ b_1^r(t) = 0 \\ \lambda_1^r(t), \lambda_1^r(t) > 0\ and\ \lambda_1^r(t) \le \mu_1^r\ and\ b_1^r(t) = 0\ and\ \lambda_1^r(t) \le \Delta b_5(t) \\ \mu_1^r, b_1^r(t) = 0,\ \mu_1^r \le \Delta b_5 \\ \Delta b_5\ , b_1^r(t) = 0 \end{cases} \tag{17}$$

$$\beta_3^s(t) = \begin{cases} 0,\ \lambda_3^s(t) = 0\ and\ b_3^s(t) = 0 \\ \lambda_3^s(t),\ \lambda_3^s(t) > 0\ and\ \lambda_3^s(t) \le \mu_3^s\ and\ b_3^s(t) = 0\ and\ \lambda_3^s(t) \le \Delta b_5(t) \\ \mu_3^s, b_3^s(t) = 0, \mu_3^s \le \Delta b_5 \\ \Delta b_5\ , b_3^s(t) = 0 \end{cases} \tag{18}$$

$$\mu_2^l = f_2^l\left(t_{green} - f_1^{r\,-1}\left(\beta_1^r(t)\right)\right) + h \tag{19}$$

$$\beta_2^l(t) = \begin{cases} 0,\ \lambda_2^l(t) = 0\ and\ b_2^l(t) = 0 \\ \lambda_2^l(t),\ \lambda_2^l(t) > 0\ and\ \lambda_2^l(t) \le \mu_2^l\ and\ b_1^r(t) = 0\ and\ \lambda_2^l(t) \le \Delta b_5(t) \\ \mu_2^l, b_2^l(t) = 0, \mu_2^l \le \Delta b_5 \\ \Delta b_5\ , b_2^l(t) = 0 \end{cases} \tag{20}$$

B. Pārslogots tīkls. Otrs modelis, kas ieteikts pārslogotā tīkla imitācijai, parasti ir balstīts uz iepriekšējā modeļa, bet ņem vērā ceļa garumu starp krustojumiem, rindu pieaugšanas ātrumu, un pārvietošanās laiku starp krustojumiem. Lai padarītu šīs iespējas par pieejamām, nepārslogota tīkla modelis būtu jāatjaunina šādā veidā (sk. 8. attēlu).



8. attēls. *Pārslogota tīkla modelis*

Ir veikts šādu apzīmējumu skaidrojums:
d - ceļa garums starp krustojumiem (mērīts PCU);
r - braukšanas daļas garums (mērīta PCU);

d-r - tās ceļa daļas garums, kurā veidojas rindas (mērīts PCU),
λ_1- ieejas plūsmas intensitāte 1. piltuvei (mērīta PCU laika vienībai)
λ_2- izejas plūsmas intensitāte 2. piltuvei (mērīta PCU laika vienībai);
$B_1^{cap} = \infty$- maksimālais rindas garums 1. piltuvē (mērīts PCU);
$B_2^{cap} = d$- maksimālais rindas garums 2. piltuvē (mērīts PCU);
b_1- rindas garums 1. piltuvē (mērīts PCU);
b_2 - rindas garums 2. piltuvē (mērīts PCU)
μ_1- kapacitāte pirmajai piltuvei (mērīta PCU laika vienībai),
μ_2- kapacitāte otrajai piltuvei (mērīta PCU laika vienībai);
β_1- izejas plūsmas intensitāte 1. piltuvei (mērīta PCU laika vienībai),
β_2- izejas plūsmas intensitāte 2. piltuvei (mērīta PCU laika vienībai).

Nav nepieciešams aprakstīt satiksmes plūsmas apstrādi, kas šķērso piltuves, jo tā tika aprakstīta iepriekšējā apakšnodaļā; tas ir iemesls, kāpēc lielāka uzmanība tiks pievērsta mehānismam, kas ļauj modelēt pārslogotu tīklu. Galvenā iepriekšējā modeļa problēma ir fakts, ka netika veikta atsauce uz pieaugošo transportlīdzekļu rindu un aizņemto ceļa daļu. Tieši tāpēc šāds mehānisms tiek ierosināts šim modelim. Ceļš starp krustojumiem (sauksim to par "saikni") ir sadalīts divās daļās: braukšanas un rindu veidošanās daļā. Ceļu sadalīšana divās daļās ir dinamiska, kas nozīmē to, ka imitācijas laikā braukšanas daļa varētu tikt palielināta vai samazināta atkarībā no rindu veidošanās daļas. Rindu veidošanās daļas garums ir vienāds ar garumu no rindas no 2. piltuves. Tas var būt rakstīts šādi:

$$r(t) = d - b_2(t) \tag{21}$$

Saiknes braukšanas daļa tiek izmantota kustībai. Šajā modelī kustību apzīmē ceļā pavadītais laiks, kas var tikt aprēķināts, izmantojot vienu no VDF (volume delay function) ar šādu piemēru:

$$\begin{cases} t_{cur} = t_0(1 + a \cdot sat^b), if\ sat < sat_{crit} \\ t_{cur} = t_0(1 + a \cdot sat^b) + (q - q_{max})d, if\ sat \geq sat_{crit} \end{cases}$$
$$sat = \frac{q}{q_{max}c} \tag{22}$$
$$sat_{crit} = 1$$

kur t_0- brīva plūsma braukšanas laiks (mērīts laika vienībās);
q - satiksmes apjoms braukšanas daļā (mērīts PCU);
$q_{max} = r$ - kapacitāte (mērīta PCU);
t_{cur} - ceļojuma laiks noslogotā tīklā (mērīts laika vienībās);
a, b, c, d - VDF parametri.

Brīva plūsma braukšanas laiku t_0 var definēt ar šādu vienādojumu:

$$t_0 = \frac{r}{v},$$

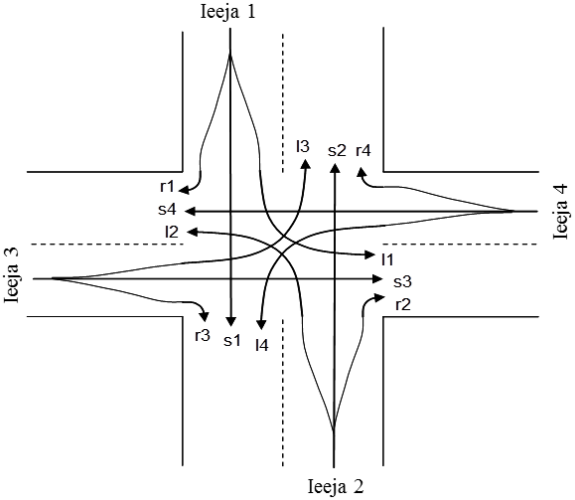
kur *v* - ātrums uz saiknes.

4. nodaļa (Izstrādātās pieejas salīdzināšana ar mikroimitaciju. Situāciju izpēte.)

Šajā nodaļā ir demonstrēts veids, kā transporta modeļi varētu tikt veidoti uz DRTRM pamata. Svarīgākais šeit ir modeļa rezultātu apstiprināšana, piemērojot statistiskas metodes (klasiskie statistiskie testi, *Naive, Novel* testi u.c.)

Situāciju izpēte 1: Krustojuma imitācija

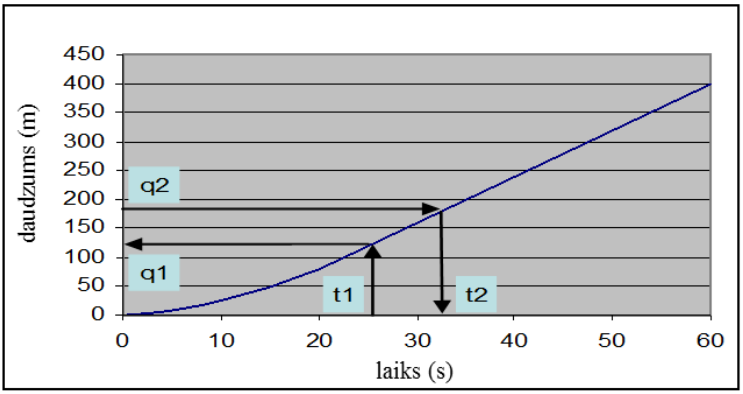
Modelējamais objekts ir simetrisks krustojums, ko regulē luksofors. Transporta plūsmas tiek veidotas avotos no 1 līdz 4. Tās var šķērsot krustojumu, izmantojot šos virzienus: pa labi (r), taisni (s) un pa kreisi (l). Divām pretējām joslām zaļā fāze ir vienā un tajā pašā laikā. Šajā laikā abām atlikušām joslām ir sarkanā fāze. Tas nozīmē, ka tie nav pretrunā viens ar otru. Modelēšanas uzdevums ir novērtēt visu rindu dinamiku. Transporta plūsmas un luksoforu fāzes ir dotas.



9. attēls. *Konceptuālais krustojuma modelis*

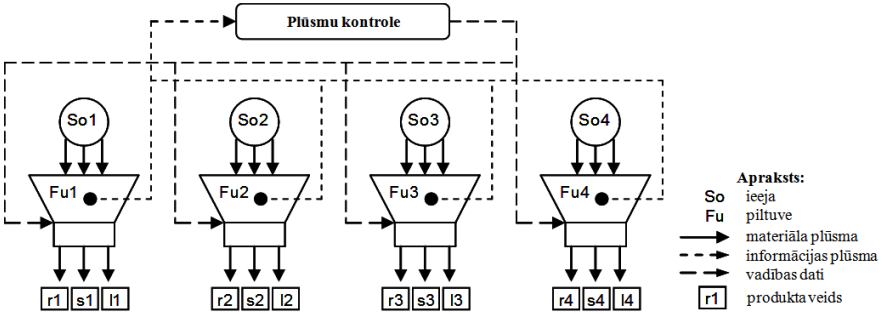
Nejaušas vērtības tiek izmantotas, lai noteiktu visas 12 ienākošās plūsmas. Reālistiskā krustojuma šķērsošanas procesa radīšanai tiek

izmantota empīriska funkcija (sk. 9. attēlu). Šī funkcija tika pārbaudīta, izmantojot tiešu reālo krustojuma šķērsošanas procesu novērošanu. Šī funkcija var tikt izmantota visiem virzieniem. Funkcija tiek izmantota modelī kā tiešā un kā reversa funkcija. 10. attēlā redzams, ka luksofora cikla pirmajās 25,5 sekundēs transportlīdzekļu plūsma ar garumu *q1* = 122 m var šķērsot krustojumu un pirmajās 32,5 sekundēs - plūsma ar garumu *q2* = 185 m.



10. attēls. *Transportlīdzekļu plūsmas dinamika, šķērsojot krustojumu*

Galvenā krustojuma modeļa struktūra tiek attēlota 11. attēlā. Modelis sastāv no četrām autonomām sastāvdaļām, jo nav tiešas sakarības starp četru virzienu satiksmes plūsmām. Katram komponentam ir trīs paralēli kanāli. Kanāli rada, kavē, un atbrīvo satiksmes plūsmas. Kavēšanu un atbrīvošanu realizē daudzkanālu piltuve, kas aprakstīta iepriekš. Katra piltuves kanāla saturs skaitliski ir vienāds ar rindas garumu. Modeļa kontroles sastāvdaļa (plūsmas kontrole) definē transportlīdzekļu daudzumu, kas var šķērsot krustojumu katrā luksofora ciklā dažādos virzienos.



11. attēls. *Mezoskopiskā modeļa struktūra*

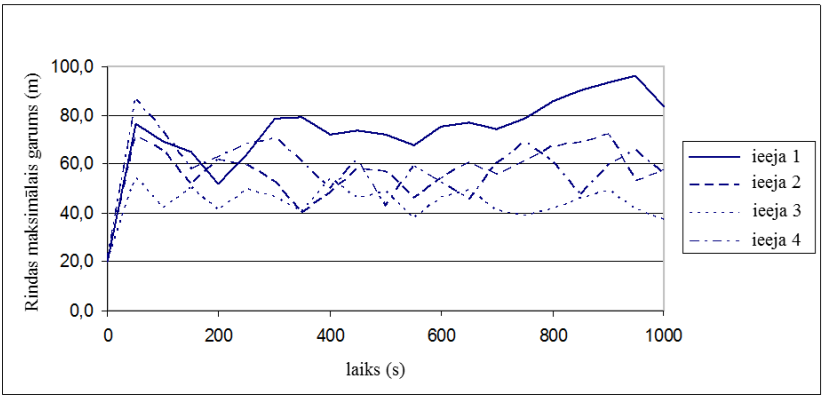
Modelis tika izstrādāts Microsoft Excel 2003, izmantojot Visual Basic for Application (VBA). Izstrādes instrumentu izvēle ietver iespēju izmantot iekšējās izklājlapas, iekšējās programmēšanas valodas un iekšējās vizualizācijas rīkus kā grafikus.

1. tabulā tiek parādīti 20 ciklu modelēšanas rezultāti. Rāmji "input (sum)" un "output (sum)" parāda kopējās piltuves ieejas un piltuves izejas garuma vērtības. Dati rāmī "queue (maximum)" parāda maksimālos rindu garumus modeļa izpildes laikā. Rindu garumi mainās luksofora cikla laikā.

1.tabula. Krustojuma mezoskopiskā modeļa izejas dati

Cycle number: 20 of 20				Time (s): 1000							
Funnel 1											
input (sum)				output (sum)				queue (maximum)			
right	straight	left	total	right	straight	left	total	right	straight	left	total
330.9	1115.9	187.5	1634.3	335.9	1108.4	188.2	1632.5	12.6	69.3	18.1	96.3
Funnel 2											
input (sum)				output (sum)				queue (maximum)			
right	straight	left	total	right	straight	left	total	right	straight	left	total
352.4	1117.0	161.6	1630.9	357.4	1127.0	159.3	1643.7	15.4	50.4	15.2	72.1
Funnel 3											
input (sum)				output (sum)				queue (maximum)			
right	straight	left	total	right	straight	left	total	right	straight	left	total
275.1	886.8	159.9	1321.8	280.1	896.8	164.9	1341.8	10.9	34.5	12.8	54.9
Funnel 4											
input (sum)				output (sum)				queue (maximum)			
right	straight	left	total	right	straight	left	total	right	straight	left	total
345.4	1173.1	186.2	1704.8	350.4	1183.1	191.2	1724.8	16.8	54.6	15.1	86.4

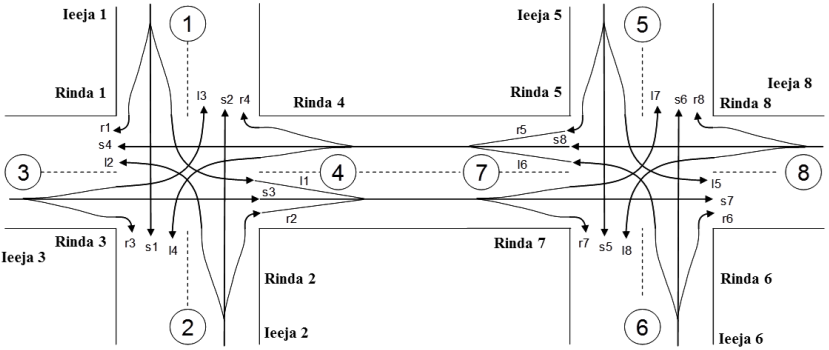
Arī visu 4 rindu dinamika varētu tikt attēlota 12. attēlā.



12. attēls. *Ienākošo plūsmu rindu dinamika*

Situācijas izpēte 2: Imitācija ar diviem savienotiem krustojumiem

Modelējamais objekts ir transporta tīkla fragments. Konceptuālais modelis tiek attēlots 13. attēlā.



13. attēls. *Transporta tīkla fragmenta konceptuālais modelis*

Fragments sastāv no diviem simetriskiem ar satiksmes gaismām regulētiem krustojumiem, kas ir savienoti ar ceļu, kas ir daļa no modeļa. Transportlīdzekļu plūsma ieiet tīklā no 6 zonām, kuras ir numurētas 1, 2, 3, 5, 6 un 8. Katra ienākošā plūsma tiek sadalīta trīs virzienos: pa labi (r), taisni (s) un pa kreisi (l). Krustojuma ģeometrija ir konstruēta tā, lai transportlīdzeklis, kas iebrauc tīklā no vienas zonas un pieder vienam virzienam r, s un l, var sasniegt un šķērsot krustojumu neatkarīgi no citiem virzieniem. Tikai transportlīdzekļi, kas nogriežas pa kreisi (plūsma l), ir atkarīgi no s plūsmas ilguma, kas šķērso krustojumu taisni pār joslu laikā, kad luksoforā deg zaļā gaisma.

Visas modeļa projektēšanas problēmas ir tādas pašas kā modelim, kas projektēts pirmajā pētījumā. Šī iemesla dēļ, netiek aprakstīta modeļa izstrāde, bet ir atspoguļots jautājums par modeļa validācijas rezultātiem. Lai validētu izveidoto mezoskopisko modeli, tiek izmantota imitācija mikroskopiskā līmenī. Saskaņā ar konceptuālo modeli (sk. 13. attēlu), ir izstrādāts mikroskopiskais krustojuma modelis profesionālajā simulācijas programmatūrā PTV VISION VISSIM. Šim nolūkam tika izmantotas vizuālās validācijas un validācijas pieejas, kas balstītas uz statistiskām metodēm.

Uz animācijas balstīta validācija: saskaņā ar novēroto imitācijas procesa animāciju mikroskopiskā modelī, var secināt, ka mezoskopiskais modelis kvalitatīvā līmenī pārstāv mikroskopisko līmeni.

Rindu dinamikas salīdzinājums: Saskaņā ar rindu dinamikas novērojumiem, var secināt, ka mezoskopiskais modelis kvalitatīvā līmenī pārstāv mikroskopisko līmeni.

Viendabības tests: Darbā gaitā tiek veikti Studenta t tests un Mann-Whitney U tests. Tā kā daži dati neatbilst normālam sadalījumam, tad t tests netiek veikts rindām 7, 6 un 3, bet tomēr U tests tiek paveikts. Iegūtie rezultāti liecina, ka hipotēze par datu viendabīgumu nevar tikt noraidīta ar $\alpha = 0.05$, tāpēc mezoskopiskais modelis ir derīgs.

Ticamības intervāla tests: ticamības intervāla pārbaudes rezultāti liecina, ka nav būtisku atšķirību starp vidējam vērtībām, kas iegūtas mikroskopiskā modelī un mezoskopiskā modelī ar $\alpha = 0.05$.

Naive tests: Izmantošana ļauj secināt, ka lielākajai datu kopu daļai modelis ir atzīts par derīgu, izņemot rindas 4 un 7. Naive testa negatīvi rezultāti tiek saistīta ar to, ka Naive tests prasa n.i.i.d. 7. rindai normalitātes tests ir negatīvs. 4. rindai jāatzīmē, ka F_{naive} vērtība ir ļoti tuvu hipotēzes pieņemšanas apgabalam.

Novel tests: Novel testa izmantošana datiem sniedz šādus rezultātus: 1. 3. un 5. rindai, nulles hipotēze netiek noraidīta, un visām pārējām datu kopām F_{novel} nav pieņemts.

Apkopojot visus iegūtos rezultātus validācijas procedūru laikā, tiek konstruēta šāda tabula, un izvirzīts secinājums, ka mezoskopiskais modelis kopumā varētu uzskatīt par derīgu.

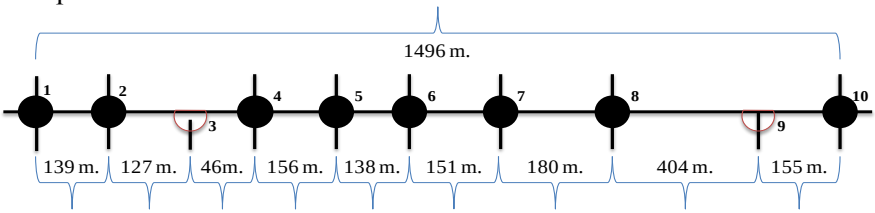
2. tabula. Validācijas rezultātu kopsavilkums

Datu kopums	Kvalitatīvā validācija (animācija)	Viendabības tests	Ticamības intervāla tests	Naive tests	Novel tests
Rinda 1	Derīgs	Derīgs	Derīgs	Derīgs	Derīgs
Rinda 2	Derīgs	Derīgs	Derīgs	Derīgs	Nav derīgs
Rinda 3	Derīgs	Derīgs	Derīgs	Derīgs	Derīgs
Rinda 4	Derīgs	Derīgs	Derīgs	Nav derīgs	Nav derīgs
Rinda 5	Derīgs	Derīgs	Derīgs	Derīgs	Derīgs
Rinda 6	Derīgs	Derīgs	Derīgs	Derīgs	Nav derīgs
Rinda 7	Derīgs	Derīgs	Derīgs	Nav derīgs	Nav derīgs
Rinda 8	Derīgs	Derīgs	Derīgs	Derīgs	Nav derīgs

5.nodaļa (Pilsētas transporta koridora mezoskopiskā imitācija)

Šī nodaļa parāda ierosinātā DRTRM modeļa piemērošanu satiksmes plūsmas modelēšanai ar esošo objektu ar reāliem datiem, ņemot vērā

luksoforu, kas atrodas izpētes vietā. Pētījuma objekts ir pilsētas transporta koridors, kas atrodas Rīgas pilsētā un sastāv no 10 krustojumiem. Šis transporta koridors savieno pilsētas centru un mikrorajonus ārpus pilsētas. Pētāmās daļas transporta koridora garums ir apmēram 1500 metri. Transporta koridora shēma ir attēlota 14. attēlā.



14. attēls. *Transporta koridora shēma*

Lai vienkāršotu atsaukšanos uz transporta koridora krustojumiem, visi no tiem ir numurēti. Turklāt jāatzīmē, ka virziens no pilsētas centra iet no kreisās uz labo pusi. Lielākā krustojumu daļa tiek kontrolēta ar luksoforiem, izņemot krustojumus 3 un 9. Dati par luksoforiem parāda ciklu ilgumu un katras gaismas ilgumu. Satiksmes apjomi ir iegūti satiksmes intensitātes apsekošanas laikā. Satiksmes apjoms tika apsekots rīta maksimuma stundās no 8:00-09:00, 2010.gada oktobrī. Satiksmes intensitātes laikā, transportlīdzekļa tipu skaits ir diferencēts: velosipēdi, motocikli, pasažieru transportlīdzekļi, vieglās kravas automašīnas, kravas transportlīdzekļi, autobusi, trolejbusi. Mezoskopiskā pieeja pašreizējā formulējumā neņem vērā transportlīdzekļu veidu, kas ir iemesls, kāpēc visi savāktie dati ir apkopoti par PCU (vieglo auto vienībām).
Visbeidzot, būtu jānorāda šāda vispārīga informācija par transporta koridori:

- atļautais ātrums transporta koridori ir 50 km /st;
- transporta koridoram ir divas joslas katrā virzienā;
- visas sabiedriskā transporta pieturvietas ir ārpus galvenajiem ceļiem un atrodas kabatās;
- luksofori tiek regulēti tā, lai izveidotu zaļo vilni pāri visam transporta koridoram.

Galvenais uzdevums ir saistīts ar aprakstītā transporta koridora modelēšanu un komforta līmeņa (LOS - level of service) novērtēšanu. Šajā brīdī, ir nepieciešams uzsvērt, ka LOS tiks aprēķināts, balstoties uz vidējo kavējuma vērtību krustojumā saskaņā ar HCM standartiem.

Izmantojot datus, kas savākti reālā apsekošana, cik transportlīdzekļi šķērso krustojumu, ir noteikta šķērsošanas funkcijas forma. Lai iegūtu funkcijas formu, pamatojoties uz savāktajiem datiem, tiek izveidoti 6 dažādi regresijas modeļi. Analizējot iegūtos regresijas modeļus, ir pieņemts

lēmums par šķērsošanas funkciju (skat. vienādojumu 23), un tā turpmāk tiek izmantota simulācijas modelī.

$$q^* = -1.1479 + 0.794 * t - 0.01113 * t^2 + 0.00026 * t^3 \quad (23)$$

kur q^* – paredzamais satiksmes apjoms;
t – laiks.

Imitācijas modeļa veidošanai tika izmantota ExtendSim programmatūra. Tomēr ne visi DR bibliotēkas bloki ir noderīgi transporta modeļa veidošanai. 3.tabula parāda DR bibliotēku bloku lomu transporta modelēšanai.

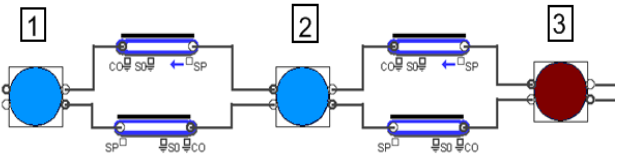
3.tabula. Galvenā bloku funkcija transporta modelī

Bloks	Nosaukums	Funkcija transporta modelī
	Convey flow	Tiek izmantots, lai imitētu kustību starp diviem ģeogrāfiskiem punktiem (piemēram, starp diviem krustojumiem)
	Diverge	Tiek izmantots, lai modelētu transporta plūsmas sašķelšanos citos virzienos (piemēram, krustojumā pagriezienos pa kreisi, pa labi, vai uz priekšu)
	Merge	Tiek izmantots, lai apvienotu satiksmes plūsmas.
	Sensor	Tiek izmantots kā galvenais informācijas avots plūsmu regulēšanai un plūsmu mijiedarbības kontrolēšanai.
	Tank	Tiek izmantots kā avots un saikne, kā arī, lai attēlotu ceļa kapacitāti.
	Valve	Kontrolē, novēro, un pārvirza satiksmes plūsmu.

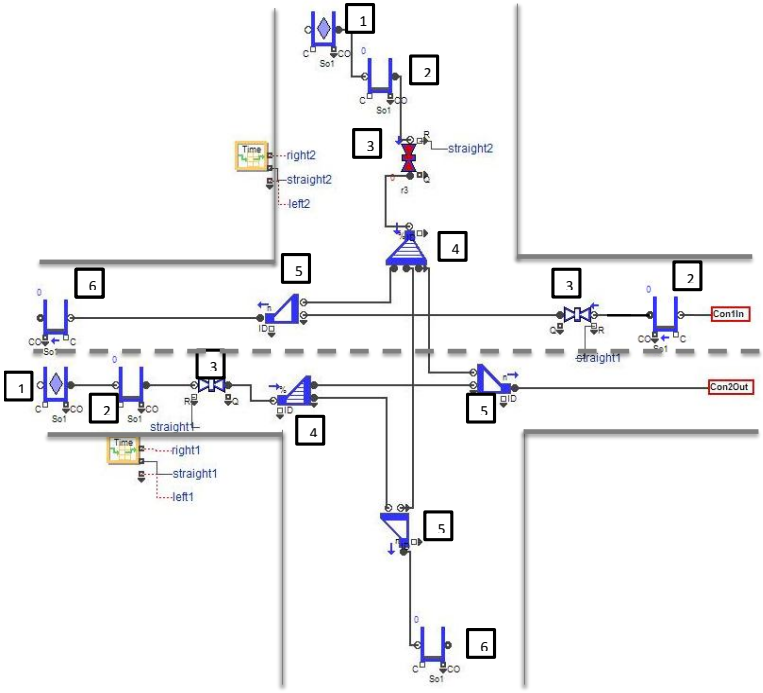
Modeļa hierarhiskā struktūra tika izveidota ExtendSim programmatūrā. Lai vienkāršotu modeļa izstrādes procesu, ir radīti bibliotēku bloki: tos sauc par "node_sig" un "node". Šie bloki veido krustojumu ar atšķirīgām vadības stratēģijām:

- Signalizēts krustojums (node sig) - krustojums, ko kontrolē luksofors ar noteikta cikla garumu. Šī grupa ietver 8 krustojumus (krustojumu numuri: 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8 un 10).
- Nesignalizēts krustojums (node) - krustojumu nekontrolē luksofors. Šajā grupā ietilpst tikai divi krustojumi (krustojumi: 3 un 9).

Vispārējā augsta-līmeņa modeļa sastāvdaļa tiek attēlota 15. attēlā. Bloka struktūras piemēru var redzēt 16. attēlā.



15.attēls. *Konstruētā vispārējā augsta-līmeņa modeļa piemērs*



16. attēls. *Bloka "node_sig" iekšējās struktūras piemērs*

Iekšējā bloka "node_sig" struktūra 1. krustojumam sastāv no 14 galvenajiem un 2 papildus blokiem. Daži papildus bloki ir nepieciešami, lai modelētu luksofora darbību. Galvenie bloki nosaka satiksmes plūsmas uzvedību.

Visbeidzot, tiek salīdzināti rezultāti, kuri iegūti no validētā transporta koridora mikroskopiskā modeļa un tie, kas iegūti no mezoskopiskā modeļa. Rezultātu salīdzinājums ir atspoguļots 4.tabulā.

4. tabula. Aizkavēšanas laika un LOS salīdzinājums

Krustojuma numurs	Mikroskopiskais modelis		Mezoskopiskais modelis	
	LOS	Vidējais aizkaves laiks (s)	LOS	Vidējais aizkaves laiks (s)
1.	B	14.5	B	18.6
2.	B	13.8	B	17.5
3.	A	1.6	A	1.2
4.	B	17.3	B	17.6
5.	B	18.1	C	21.6
6.	B	11.2	B	14.3
7.	C	20.6	C	30.8
8.	C	31.2	D	45.5
9.	A	2.1	A	1.2
10.	D	41.5	E	55.6

Kā redzams, neraugoties uz apjomu atšķirībām, kas vidēji veido 20%, LOS krustojumiem pārsvarā ir vienāds. Jāatzīmē, ka kavējuma laiks nedaudz atšķiras visos krustojumos, un dažreiz šī starpība neietekmē LOS, izņemot LOS, kas saistīti ar 10, 8 un 5 krustojumiem. 10. krustojumam atšķirība ir 14 sekundes. Krustojumiem 8 un 5 atšķirība nav tik būtiska. Būtībā transporta plūsmas uzvedība mezoskopiskajā modelī ir ļoti tuva šī pilsētas transporta koridora reālajai situācijai. Izejas datu atšķirību var izskaidrot ar mezoskopiskā modeļa augsto abstrakcijas līmeni. Tajā pašā laikā mezoskopiskā modeļa izstrādes ātrums ir 3 reizes mazāks.
Kopumā būtiskas atšķirības izstrādes laikā ir saistīta ar tīkla attēlošanas vienkāršošanu mezoskopiskā līmenī. Tajā pašā laikā izejas datu atšķirība nav būtiska. Galvenās mezoskopiskās pieejas priekšrocības ir: ievērojams izstrādes laika samazinājums un sagaidāmi precīzi gala rezultāti. Detalizēti salīdzinājuma rezultāti starp izstrādes un eksperimentēšanas jautājumiem mikroskopiskā un mezoskopiskā līmenī ir redzami 5.tabulā.

5.tabula. Izstrādes un eksperimentēšanas laiks mikro- un mezoskopiskajiem modeļiem

Izstrādes un eksperimentēšanas punkti (min)	**Mikroskopisks**	**Mezoskopisks**
Transporta tīkla definēšana	175	60
Luksoforu ieviešana	60	30
Konflikta zonu un prioritāro noteikumu ieviešana	115	60
Kustības joslu ieviešana	30	30
Satiksmes plūsmas ieviešana	30	60
Laiks, kas patērēts eksperimenta izpildei	350	10
Kopējais izstrādes un eksperimentēšanas laiks	**760**	**250**

GALVENIE DARBA REZULTĀTI

Jaunā mezoskopiskā satiksmes imitācijas modeļa, kura pamatā ir DR pieeja, koncepcija ir izstrādāta kā galvenā promocijas darba daļa. Ierosinātā DRTRM modelis ir pārbaudīts vairākos eksperimentos, izmantojot mākslīgus un reālus datus. Tā rezultātā eksperimentos iegūtie dati ļauj secināt, ka piedāvātā koncepcija varētu būt noderīgs rīks transporta plānotājiem un pētniekiem satiksmes plūsmas analīzes jomā. Atrisināti uzdevumi un iegūtie rezultāti ir:

1. Ir veikts pašreizējo un nākotnes simulācijas modeļu lomas pārskats transporta jomā. Tas ļauj secināt, ka simulācija nākotnē būs ļoti pieprasīta, jo tas ir spēcīgs un precīzs satiksmes plūsmas analīzes rīks.
2. Esošo satiksmes analīzes rīku un to lomu analīze tika veikta ar detalizētu aprakstu; tas ļauj parādīt simulācijas modeļu vietu starp dažādiem ceļu satiksmes modelēšanas rīkiem; ir pierādīts, ka tradicionālo simulācijas metožu pamatā ir mikroskopiskā un makroskopiskā pieeja, ko raksturo noteikti nenoņemami trūkumi.
3. Ir konstatēts, ka daži zināmi mēģinājumi attīstīt modeļus, kas apvieno mikroskopisko un makroskopisko modeļu pozitīvās īpašības, vēl nav ļāvuši izstrādāt jaunu, labi definētu modeļu klasē, ko parasti dēvē par mezoskopiskiem; kā likums, šie modeļi ir tikai patvaļīga mikroskopisko un makroskopisko modeļu kombinācija; tika veikta pašreiz esošā mezoskopiskā modeļa pārskats.
4. Salīdzinoši jaunas plūsmu sistēmu paradigmas izvēle, ko sauc par DR pieeju, ir pamatota kā bāze satiksmes sistēmu mezoskopisko modeļu izstrādei; notikumu plānošanas iespēja tika pētīta saistībā ar nepārtrauktu procesu, balstot modelēšanu uz DR pieeju; tiek aprakstīts, ka ierosinātā notikumu plānošana ievērojami paātrina plūsmas sistēmu mezoskopisko modeļu apstrādi.
5. DRTRM tiek formulēts un izstrādāts matemātiskā formā, parādot galvenās idejas balstītas uz jauna piedāvāta mezoskopiskā satiksmes simulācijas modeļa.
6. Satiksmes plūsmas modeļa izstrādes metodoloģija tika izstrādāta DRTRM; ir aprakstīti daži metodoloģijas pielietošanas piemēri, pamatojoties uz demonstratīvo sarežģītu krustojumu modeli un reālas sistēmas modeli.
7. Pamatojoties uz datiem, kas iegūti eksperimentu laikā, tika veikta modeļa validācija, izmantojot dažādas metodes, gan kvalitatīvās, gan kvantitatīvās. Validācijas rezultāti pierāda, ka modeļi, kas izstrādāti, izmantojot DRTRM, ir derīgi; ir konstatēts, ka praktiskās

priekšrocības, kas rodas no jaunās klases mezoskopisko modeļu izmantošanas noved pie modeļa izstrādes laika un modeļa apstrādes laika samazināšanas.

8. Tiek parādīts piedāvātās koncepcijas izmantošanas piemērs attiecībā uz reālu objektu, kas atrodas Rīgas pilsētā, ar reālu datu salīdzinājumu, kas iegūti apsekojuma laikā.

THE PROMOTION WORK PRESENTED TO THE TRANSPORT AND TELECOMMUNICATION INSTITUTE TO OBTAIN THE SCIENTIFIC DEGREE – DOCTOR OF SCIENCE IN ENGINEERING (Dr.sc.ing.)

OFFICIAL REVIEWERS:

Dr.habil.sc.ing., Jurijs Merkurjevs,
Professor, Riga Technical University,
Latvia.

Dr. ing., Klaus Richter,
Professor, Otto von Guericke University of Magdeburg,
Germany.

Dr.sc.ing., Egils Ginters,
Professor, Vidzeme University College,
Latvia.

The defence of the thesis will be held at 3.10.2013 at 16:00 o'clock at the special Promotion Council of Transport and Telecommunication Institute on award of a doctor's degree, at 1, Lomonosova Street, Conference Hall 130, Riga, Latvia, tel. +371 67100594, fax: +371 67100535.

CONFIRMATION

I hereby confirm that I have developed the promotion work presented to the Promotion Council of Transport and Telecommunication Institute to obtain the scientific degree of Doctor of Science in Engineering. The promotion work has not ever been presented to any other promotional council to obtain the scientific degree.

3 October, 2013 M. Savrasovs

The promotion work is written in English, it contains an introduction, 5 chapters, conclusions, 59 figures, 26 tables, 134 pages, and 7 appendixes. Bibliography contains 103 sources.

This work has been partly supported by the European Social Fund.
Project Nr. 2009/0159/1DP/1.1.2.1.2/09/IPIA/VIAA/006
(The support in Realisation of the Doctoral Programme "Telematics and Logistics" of the transport and Telecommunication Institute).

CONTENTS

GENERAL DESCRIPTION OF THE THESIS 43
Introduction 43
Research motivation 43
The goal and the tasks of the promotion work 44
The object and subject of research 44
Degree of the theme study 44
Research hypotheses 46
The research methods 46
The scientific novelty 46
The practical value of research 46
Theses to be defended 47
Scientific conferences and workshops 48
Publications 48
Structure of the work 48
SUMMARY OF WORK CHAPTERS 50
Chapter 1 (Review of traffic analysis tools) 50
Chapter 2 (Comparative analysis of simulation approaches) 53
Chapter 3 (Development of the concept of a mesoscopic discrete rate traffic simulation model) 60
Chapter 4 (Comparing the developed approach with microsimulation. Case studies.) 66
Chapter 5 (Mesoscopic simulation of an urban transport corridor) 70
MAIN RESULTS OF THE THESIS 75

ANNOTATION

Doctoral thesis – Mihails Savrasovs. “Development of new approach for simulation and analysis of traffic flows on mesoscopic level”. The scientific supervisor of the thesis is Dr.habil.sc.ing., professor Jurijs Tolujevs.

The work presents the results of the development, investigation and application of a new type of mesoscopic model, which is based on simulation approach called “Discrete Rate”. The actuality of the theme is underlined by a continuing growth of vehicle number on roads. This leads us to economic losses, deterioration of ecology, and an increasing incident rate on transport. One of the directions of solving this problem is a development of the so-called sustainable transport systems. Among tools for a sustainable transport system development, simulation could be emphasized. In this case, simulation is a tool that allows us to do an optimisation of existing transport system and to make the introduction of new elements into the system more reasonable.

In this work the role of simulation in transportation sphere is overviewed in detail. At the same time, the trends of further development of the tool for traffic analysis are emphasized. Different state-of-art traffic analysis tools have been completed, focusing on simulation models of the following types: microscopic, mesoscopic and macroscopic. A detailed overview of the existing mesoscopic models has been performed and the main disadvantage is emphasized – realization in closed software, which makes it difficult to use them in practice. The new type of mesoscopic model has been developed, which is based on simulation approach called “Discrete Rate”, which is currently used for material flow simulation in the sphere of logistics. In this work, the concept of the approach is described in detail, focusing on the difference between the “Discrete Rate” approach and the classical ones. Based on the existing concepts, two kinds of models are proposed and formulated: the model for an uncongested network and the one for a congested network. A few examples of the model application of to different kind of transport systems are given. Based on the examples, operation algorithm of the proposed models is demonstrated and the validations of model completed, as well as realistic input parameters of model are defined.

GENERAL DESCRIPTION OF THE THESIS

Introduction

Since 1886 when the first engine of a vehicle was patented the number of vehicles on roads was growing dramatically. This led transport planners and researchers to search new methods of development and optimisation of transport infrastructure. Finally, the concepts of a sustainable transport system were formulated as a strategic and complex decision, which should be applied. The development of a sustainable transport network is a complex problem, which should embrace all aspects of transport systems - from permanent survey of traffic volumes and households to the development of new technologies in such areas as petroleum production and vehicle engine modernization. Among different kinds of tools used for the development of a new generation of transport systems, a specific place is held by optimisation of the existing transport infrastructure and a strict and extended analysis of the impact of new infrastructure elements on another parts of transport infrastructure. Usually this point leads to the use of different tools of traffic flow analysis. Among the existing tools for traffic analysis, simulation is one of the most powerful tools for solving tasks originating in process of real system design and renovation.

Research motivation

Simulation is a powerful tool for traffic system analysis. The existing microscopic and macroscopic simulation models have a number of disadvantages. The existing disadvantages of microscopic and macroscopic simulation motivate the development and research of a new type of models, called mesoscopic. Mesoscopic models should avoid disadvantages inherent in microscopic and macroscopic models. But the obscurity of the concept of mesoscopic simulation urges many scientists and researchers to develop a number of different mesoscopic models. Most of the existing mesoscopic models are developed theoretically, without any implementation in the form of software, or are realized in software which is not available for researchers and practitioners. These facts motivate the development of a new mesoscopic approach for traffic flow simulation, which will be available for potential users (researchers and transport planners).

The goal and the tasks of the promotion work

The goal of the promotion work is as follows: Development, investigation and application of a new type of model in the class of mesoscopic traffic models. As regards the above-mentioned goal of this research, the following tasks are posed:

1. To consider problems of traffic system simulation modelling.
2. To conduct the analysis of:
   a) the currently used traffic systems simulation tools;
   b) the existing simulation approaches and detailed mesoscopic traffic models.
3. To offer and develop the concept of the new type of traffic mesoscopic model.
4. To develop the models with synthetic and real data, providing for numerical examples of the offered mesoscopic approach.
5. To test the validity of the new type of traffic mesoscopic model by different examples.
6. To demonstrate the advantages and disadvantages of the offered model.
7. To provide scientifically-grounded recommendations on model use.

The object and subject of research

The object of research is traffic flow. The subject of research is simulation-based models of the traffic flow.

Degree of the theme study

The history of the traffic flow simulation began in 1955 by D.L.Gerlough's issuing his thesis: "Simulation of freeway traffic on a general-purpose discrete variable computer" at the University of California, Los Angeles. From that time on, a number of scientists and practitioners made efforts toward the development of traffic simulation theory. The following could be mentioned with regard to the microscopic simulation of traffic flows: R.Wiedemann in 1974 has published a description of 74 Wiedemann car-following models in his article "Simulation des Straßenverkehrsflusses", P.G.Gipps in 1970 developed a Gipps' car-following model; some other works by R.E.Chandler, D.C. Gazis, G.Lee, J.C.Bender, R.E.Fenton etc. could me mentioned as well. The research of these scientists helped to create a basis for traffic flow simulation software. In the meantime, a development of macroscopic models was started.

Macroscopic traffic models take into consideration cumulative traffic stream characteristics (speed, flow, and density) and the interrelationships between them. Here, a number of scientists could be mentioned referring to the macroscopic simulation: M.J.Lighthill, G.B.Whitham, P.I.Richards, C.F.Daganzo, S.K.Godunov etc.

The disadvantages of these simulation approaches motivate one to develop another class of traffic simulation models which are called mesoscopic. In 1989, D.R. Leonard proposed a model called CONTRAM. The model assumes grouping of vehicles into pockets and routing them through the network. Another scientist, M. Ben-Akiva, proposed a mesoscopic model DYNAMIT in 1996. This model grouped vehicles by cells, which define such properties like speed etc. A bit earlier in 1994, R. Jayakrishnan proposed a queue-server approach application for traffic flow simulation. This idea became popular, and the model FASTLANE was presented by C.Gawron in 1998 and, subsequently, the model DTASQ – by M. Mahut (in 2001). Application of cellular automata for traffic flow simulation was made by B.W. Bush by development of TRANSIMS. The last widely known paper dedicated to mesoscopic model was published in 2004 as doctoral dissertation by Wilco Burghout in Royal Institute of Technology (Stockholm, Sweden).

The analysis of the above-mentioned sources enables one to draw the following conclusions on practical application of mesoscopic models, motivating the author to undertake a study in this area:

- mesoscopic traffic flow simulation is a very perspective type of simulation in terms of lack of any high requirements to input data and a low time of model development and experimentation, etc;
- the term “mesoscopic traffic model” still does not have any official definition (different scientists interpret it differently); this allows one to use different approaches to model development, but leads to confusion within scientific and transport planners’ community at the same time;
- mainly mesoscopic models are realized in proprietary software used by government institutions, or are developed without practical approbation. This leads to scarcity of mesoscopic simulation tools on the market.

As a base for the development of a new type of mesoscopic traffic model, a Discrete Rate (DR) simulation approach is used. The concept proper of DR approach is based on event planning using piecewise linear aggregates, which were described by N.Buslenko in 1973. The DR approach was presented on Winter Simulation Conference by D.Krahl in 2009, who implemented this approach in ExtendSim software. In the meantime, prof.

J.Tolujevs in his research demonstrated concepts and examples of DR application in logistics area.

Research hypotheses

The study puts forward the following hypotheses:

1. The Discrete Rate approach could be used for traffic flow simulation on mesoscopic level of detail.
2. The results obtained through application of the proposed model are adequate for further decision-making.

The research methods

The promotional work research is based on: system theory, methods of statistical data analysis, modern theory of simulation; analysis of scientific literature, scientific papers, press releases, EU Commission's reports, simulation guidelines, internal software manuals, and the Internet sources. The computer-based support for necessary investigations was: Microsoft Office Excel 2010, Statistica 8 package, PTV VISION VISSIM microscopic simulation software, and simulation software ExtendSim 8.

The scientific novelty

In the course of the work, the following results, which are new to the transportation engineering science, have been obtained:

1. The development of a new approach for traffic flow simulation based mainly on DR approach and called by author as DRTRM (Discrete Rate Traffic Reference Model).
2. The DRTRM methodology development for traffic simulation in research and practical applications.
3. Implementations of developed approach for transport flow simulation demonstrating that DRTRM models might be used by transport planners as fast and efficient tools in decision support process have been suggested.
4. DRTRM validation results allowing one to accept the approach as credible.

The practical value of research

1. Development of methodology and algorithms for DRTRM usage in transport application.

2. Justification of the advantages of the proposed new mesoscopic traffic simulation model as against microscopic models, based on numerical examples.
3. Practical approbation of DRTRM use for specific Case Studies:
   a) The Project "Development of the Model of Intelligent Transport System of Europe-Asia Multimodal Corridor for Optimisation of Latvia-Belarus International Logistics Chain (TRANSLAB)" announced by Ministry of Education and Science of the Republic of Latvia (2007-2009).
   b) Latvian National Research Programme "Local Resouces Long-Term Utilization. New Products and Technologies (NatRes)". Project Nr. 4. „Development of the Long-Term Programme of the Latvian Transport System Harmonization" (LATRANS).
4. The obtained results became the basis for part of lectures delivered on the course: "Transport Modelling" of program 43525 "Transport Commercial Operations" and "Simulation modelling in transport and logistics" of program 4534507 "Transport and Logistics" of Transport and Telecommunication Institute.

Theses to be defended

In work following theses are formulated for defense:

1. In future different forms of simulation will be widely used as a standard element of Decision Support Systems (DSS) in tasks related to planning and management in transport systems.
2. Discrete Rate approach application for process representation enables one to develop a new class of models (DRTRM - discrete rate traffic reference model) intended for modelling and analysis of transport flows on mesoscopic level.
3. The application of proposed mesoscopic approach for model development allows one to significantly decrease the time required for model development, thereby cutting down simulation costs.
4. It is shown that the relationship between time interval and quantity of vehicles, which have passed crossroad during this time interval could be described by third-order regression model linear by parameters.
5. Modelling results obtained by the proposed mesoscopic approach, do not significantly differ from microscopic simulation results and could be used in decision support procedure.

Scientific conferences and workshops

The main results of the research are presented at 9 scientific conferences and workshops: 25th European Conference on Modelling and Simulation (Poland, Krakow, 2011); 1st International Conference on Road and Rail Infrastructure (Croatia, Opatija, 2010); 23rd European Conference on Modelling and Simulation (Spain, Madrid, 2009); 2nd International Logistics PhD Students' Workshop (Germany, Magdeburg, 2009); International Conference "Modelling of Business, Industrial and Transport Systems" (Latvia, Riga, 2008); International Conferences "Reliability and Statistics in Transportation and Communication" (Latvia, Riga, 2012, 2010, 2008, 2007).

Publications

The results of the studies are published in 18 scientific editions. The list of author's publications could be found at the end of the abstract.

Structure of the work

The Promotional work consists of an introduction, 5 chapters, a conclusion, a list of references, and 7 appendices. The work comprises 134 pages and includes 59 figures and 26 tables. The list of references includes 103 sources. The structure of the work is as follows:

Introduction. The object and the subject of research are defined on the basis of actuality; a review of scientific literature has been carried out considering the issues related to the formulated goal and tasks of the research.

Chapter 1. Review of traffic analysis tools. The types of traffic analysis tools are examined and classified, the role of simulation in transportation area is analysed, and trends in simulation-based traffic analysis tools are summarized.

The review and analysis of different models classified as mesoscopic, are presented. These are: CONTRAM, DYNAMIT, DYNASMART, FASTLANE, DTASQ, MEZZO, AMS and Cellular Automata.

Chapter 2. Comparative analysis of simulation approaches. The place of DR approach among well-known classical simulation approaches as discrete event simulation, system dynamics, and agent-based simulation is emphasized. The comparison of these approaches is done on the general level and in detail.

Chapter 3. Development of the concept of a mesoscopic discrete rate traffic simulation model. This chapter presents the DRTRM mesoscopic model for traffic simulation, treated as an extension of DR approach. Two alternatives of the model are formulated: the one for congested and the other for uncongested network. Mathematical formalisation of both is performed.

Chapter 4. Comparing the developed approach with microsimulation. Case studies. This chapter demonstrates the use of DRTRM approach for simulation of a single, traffic light-controlled crossroad as well as simulation of two interconnected crossroads. Microsoft Excel and VBA are used to code both models. Simulation is based on synthetic data to show the idea of application of DRTRM approach for such a kind of simulation. Some results of simulation are presented as well; a kernel of the simulation model is shown in tabular form. The main idea of these examples is to show the simulation algorithm in details.

Chapter 5. Mesoscopic simulation of an urban transport corridor. The last chapter demonstrates an example of simulation of the urban transport corridor using DRTRM approach. The urban transport corridor consists of 10 crossroads and most of them are controlled by traffic lights. The simulation is based on real input data obtained in the course of the traffic flow study project implemented in Riga city centre (2011). Within the framework of the project, the microscopic model was created, allowing one to test mesoscopic model output data against the already validated microscopic model. The mesoscopic model was created in ExtendSim simulation software. Special attention in this chapter is paid to determination of the form of the crossroad passing function used in proposed traffic model.

Conclusions. Summary of the work, as well as main findings and conclusions are presented.

The list of author's publications, VBA code of models, different supporting tables and figures are to be found in ***Appendices.***

SUMMARY OF WORK CHAPTERS

Chapter 1 (Review of traffic analysis tools)

Traffic analysis tools are a collective term used to describe a variety of software-based analytical procedures and methodologies that support different aspects of traffic and transportation analyses. To date, numerous traffic analysis methodologies and tools have been developed by public agencies, research organizations, and consultants. Traffic analysis tools can be grouped into the following categories:

- **Sketch–planning tools.** Sketch-planning methodologies and tools produce general order-of-magnitude estimates of travel demand and traffic operations in response to transportations improvement.
- **Travel demand models.** Travel demand models have specific analytical capabilities, such as the forecast of travel demand and the consideration of destination choice, mode choice, time-of-day travel choice, and route choice, and the representation of traffic flow in the highway network.
- **Analytical/deterministic tools (HCM-based).** Most analytical/ deterministic tools implement the procedures of the Highway Capacity Manual (HCM). These tools quickly predict flow density, speed, delay, and queuing with respect to a variety of transportation facilities, and are validated with data fields, laboratory test beds, or small-scale experiments.
- **Traffic signal optimisation tools.** They are designed primarily to develop optimal signal-phasing and timing patterns for isolated, arterial streets, or signal networks. This may include capacity calculations; cycle length splitting optimisations, including left turns; and coordination/offset plans.
- **Macroscopic simulation models.** Macroscopic simulation models are based on the deterministic relationships of the flow, speed, and density of a traffic stream. The simulation in a macroscopic model takes place on a section-by-section basis rather than by tracking individual vehicles.
- **Microscopic simulation models.** Microscopic models simulate the movement of individual vehicles based on car-following and lane-changing theories. Typically, vehicles enter a transportation network using a statistical distribution of arrivals (a stochastic process) and are tracked through the network over small time intervals (e.g., 1 second or a fraction of a second).

- **Mesoscopic simulation models.** Mesoscopic simulation models combine the properties of both microscopic and macroscopic simulation models.

As this research deals mostly with simulation tools, only traffic analysis tools based on simulation will be taken into account hereinafter.

Traffic system models could be classified according to wide range of criteria. Some of them could be mentioned here:

- by solution: analytical vs simulation;
- by process representation: dynamic vs static;
- by variables scale: continuous vs discrete;
- by process: stochastic vs deterministic;
- by time changing approach: time-stepped vs event-based; etc.

But the most popular classification that is widely used is based on model detail level. Currently, 4 levels of the transport models are distinguished. They are as follows: sub-microscopic, microscopic, macroscopic, and mesoscopic models. Both microscopic and macroscopic ones are treated as classical and, generally, it's quite simple to define the meaning of these models. In the thesis, the author gives a detailed analysis of these models.

Mesoscopic models. The mesoscopic models are not so widely used. It is connected with the problem that scientists interpret the term "mesoscopic modelling" in different ways. Some researchers suggest that the mesoscopic modelling should integrate characteristics of both microscopic and macroscopic levels. They fall under the following definition: "Mesoscopic models combine the properties of both microscopic and macroscopic simulation models. These models simulate individual vehicles, but describe their activities and interactions based on the aggregate (macroscopic) relationships". Another definition sounds like "Mesoscopic models of traffic flows imply estimation of the macroscopic indicators on the microscopic level".

There is a number of simulation software products which are widely used. In the thesis the author presents a detailed analysis of these simulation tools. Some of them have become recommended tools for some countries, as for example, VISSIM/VISUM for Germany, AIMSUN for Spain, and PARAMICS for UK.

Simulation as a traffic analysis tool is now an everyday tool for practitioners and researchers in all fields of the profession.

In literature, the definition and concepts of mesoscopic traffic flow models vary widely, and some of the models have distinct modelling conceptions. In this work, some simulation-oriented models have been described:

CONTRAM was the first-ever developed model presenting the aspects of mesoscopic modelling. The name of the model itself stands for

the “CONtinuous TRaffic Assignment Model”. Its structure is based on the link-node network, where the link behaviour of a batch of vehicles is determined by the free-flow speed on that link, or a speed/flow relation.

DynaMIT (Dynamic Network Assignment for the Management of Information to Travellers) is a real-time dynamic traffic assignment software that provides traffic forecasting and travel guidance. This system has been developed since 1990’s at MIT, with the goal of being able to simulate and predict the effects of real-time traffic information provided to the drivers.

DYNASMART, FASTLANE, DTASQ. Another idea is based on the queue-server approach. This approach represents a road as a queuing and running carriageway. Lanes are usually not modelled. Vehicles are modelled individually and have their individual speed. At the same time, their behaviour is not modelled in detail. Vehicles run on the carriageway of the road with a speed which is defined by using macroscopic speed-density function. By reaching the downstream end, a queue server transfers vehicles to the next road segment. The advantage of this approach is connected with simulation of vehicles individually and with easy calibration of macroscopic speed/density relationships. The capacity of the servers (at nodes) is a matter of the saturation flows and their variance (estimated or calculated). In case of signal controllers, simulation servers are replaced by state-changing gates (open/closed state) according to the respective states of the signal control (green/yellow/red). Here it should be noted that the main advantage of these models is that vehicles are modelled individually, thus giving some information about the routes of travel. It is not available in the previously described models, because in these models vehicles were grouped somehow.

AMS model stands for “anisotropic mesoscopic simulation” and is developed based on two intuitive traffic characteristics:

- At any time, a vehicle’s prevailing speed is influenced only by the vehicles in front of it, including those being in the same or adjacent lanes.
- The influence of traffic downstream upon a vehicle decreases with the increased distance.

The above-mentioned characteristics define “anisotropic” property of the traffic flow and provide general principle for AMS model.

The traffic system in ***MEZZO*** is described by a graph with two objects: nodes and links. The nodes represent the point of traffic flow intersection and the origin and destination of traffic. The links are the road between nodes. Links are unidirectional, so if one has to simulate a bidirectional road, two links should be used. Lanes are not presented in the model separately. Usually nodes have a number of incoming and outgoing

links. Links are divided into the running part and the queue part. The running part is a segment of road with free movement ability for vehicles. The queuing part represents the segment of road occupied by vehicles standing in queue.

Analysis of the existing mesoscopic models shows that currently there is lack of a unified approach, which could be used in traffic analysis research tasks. There are some applications having no distinct advantages of using classical approaches to modelling. That is why the development of new simulation approaches meant for solving specific tasks remains vitally important. The area of specific tasks could be outlined: modelling a fragment of the transport network, with a large number of transport nodes; modelling wide transport corridors (with a large distance between transport nodes); etc.

Chapter 2 (Comparative analysis of simulation approaches)

Simulation is a powerful tool for analysis and investigation of various systems. We could emphasize the universality of this tool as the main advantage of simulation, which means the ability to model different types of the systems. Simulation branch is presented by 5 approaches; they are as follows: discrete event simulation, agent-based simulation, system dynamics, hybrid simulation and discrete rate simulation.

The *Discrete event simulation* (DES) is the paradigm, which is realized in the major part of software tools (for example, GPSS, Extend, Arena, Witness, Automod, FlexSim, Plant Simulation etc). This approach has been known since 1960s, when it was described by Geoffrey Gordon. A discrete event simulation model is defined by three properties:

- Stochastic – at least, some of the system-state variables are random.
- Dynamic – the time evaluation of the system-state variables is important.
- Discrete event – significant changes in the systems state variables are associated with an event occurring in the instance of discrete time only.

The main concepts of *Agent-based simulation* appeared only in 1990s. At present, there exist various definitions in the literature; from the practical point of view, it can be defined as essentially-decentralized, individually-centric (as opposed to system level) approach to model design. When designing an agent- based model, the modeller identifies active entities - *agents* (it can be people, companies, projects, assets, vehicles, cities, animals, ships, products etc.), defines their behaviour (driving habits, reactions, memory, states etc), introduces them into a certain environment, possibly establishes connections and runs the simulation. At present, there

are only a few software products available in the market; they are RePast, Swarm, ASCAPE, NetLogo and AnyLogic.

System Dynamics (SD) deals with time-dependent behaviour of the managed systems with the aim of describing the system and – by using qualitative and quantitative models – grasping the idea of how information feedback governs the system behaviour; furthermore, robust information feedback structures and control policies are designed through simulation and optimisation. In fact, system dynamics is a set of differential equations. That is why the system dynamics does not deal with a particular object, but rather with aggregated sets of objects which flow from one stock to another with an intensity defined by flow variables. Currently, there is a lot of software products dealing with system dynamic approach, and we can enumerate the following ones, being the most popular: VenSim, PowerSim, iThink and AnyLogic.

Hybrid simulation approach is not the classical one, but it is widely used over the last few years. The main idea is to combine different approaches in one model. By simulating different parts of the system using different approaches, a developing flexibility is achieved and the model development time is reduced. There are no strict rules prescribing specific approaches to be combined, it is up to developer. The only limitation in this case is specific features of the software used. The most well-known software, which allows building hybrid models, is AnyLogic.

The *Discrete Rate* philosophy standing behind this approach can be described with the phrase "event planning for continuous processes". The representation of individual flow objects that reproduce persons, job orders, goods, etc. is dispensed with. The only employed members that are used in the model represent the respective quantities of objects or materials and can be modified with mathematical formula in every step of the simulation time Mesoscopic modelling shows only discrete changes of the corresponding continuous flows. It means that flow intensity $\lambda(t)$ remains unchangeable within each time interval between flow changes. Function $\lambda(t)$ could be called slice constant function. Figure 1 presents diagrams of income and outcome flow for a simple store.

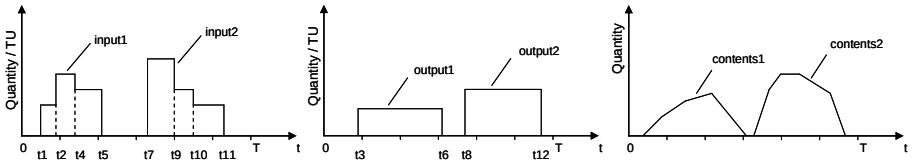


Figure 1. *Process presentations in discrete rate approach*

The right graph presents contents of the store for the given input and output flow. Since λ(t) is a piecewise constant function, the graph of the store content could be only a piecewise-linear function. The main advantages of such process representation in mesoscopic modelling are probably forecasting (in planning, calculating) certain moments of time, the contents of store and cumulative value of flow reaching the given values.
Thus, dual properties are characteristic of the mesoscopic model:

- its flow processes characterized by intensity λ(t) (as in the case of a continuous-type model);
- for processes in store and for cumulative values of flows, the future events (as in the case of models of discrete events) could be planned.

The single continuous fragments of the flow, which will be called the batches of product, could be treated as objects. The mesoscopic model features the possibility to control the path of any batch of product during its movement through the model structure. The main components used in a mesoscopic model could be mentioned here: source, funnel, and transport element. The source element is required to inject flow inside the system; the main parameter of this component is intensity. Still, it must be noted that intensity in this case is not just a constant value, but it could vary depending on time. The next and the most important element is a funnel. Funnels could be divided into two classes: single channel funnels and multi-channel funnels. Such a division allows one to simulate multi product systems. The idea of funnel is presented on Figure 2.

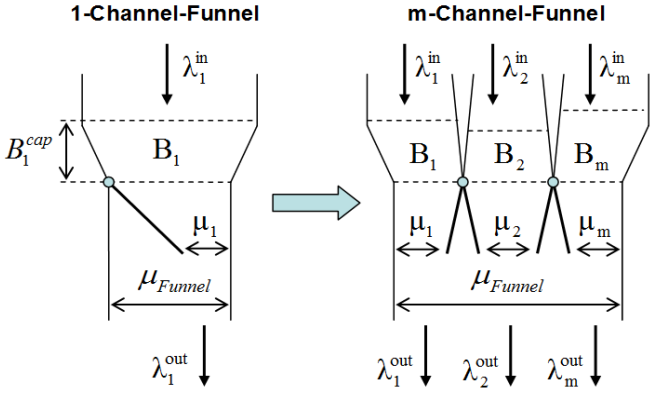


Figure 2. *Single channel funnel and multi-channel funnel*

The notation is equal for single channel and multi-channel funnel as follows:

λ_i^{in} – input flow for the channel i;

B_i^{cap} – the capacity for the channel i;

B_{funnel}^{cap}– the capacity of the funnel;

B_i– the current level of product for the channel i;

μ_i– the processing rate for channel i;

μ_{funnel} – the processing rate for funnel;

λ_i^{out}– the output flow from channel i.

The following restrictions are defined as follows:

$$B_i \le B_i^{cap}, \sum B_i^{cap} \le B_{funnel}^{cap},$$
$$\lambda_i^{out} \le \mu_i, \sum \mu_i \le \mu_{funnel}.$$

The output flow could be calculated using the following equation:

$$\lambda_i^{out} = \begin{cases} 0, \lambda_i^{in} = 0 \text{ and } B_i = 0 \\ \lambda_i^{in}, \lambda_i^{in} > 0 \; and \; \lambda_i^{in} \le \mu_i \text{ and } B_i = 0 \\ \mu_i, B_i > 0 \end{cases}$$

The funnel level of product in channel could be obtained by using the following equation:

$$B_i(t + \Delta t_j) = B_i(t) + \left(\lambda_i^{in}(t) - \lambda_i^{out}(t)\right) \cdot \Delta t_j$$

It must be noted that parameters like λ_i^{in} and μ_i can be changed every $t_j = t_{j-1} + \Delta t_j$. It means that these parameters are time dependent and could be rewritten in the following way $\lambda_i^{in}(t)$ and $\mu_i(t)$.

The step value could be fixed or variable. The type of step which should be used in the model depends on the type of system simulated and the processes running inside the simulated systems. Scheduling of the events is the most important in both cases. The Figure 3 presents an example of event scheduling for continuous processes in a funnel. The first two events (event 1 and event 2) are assumed to be independent of the system's current state.

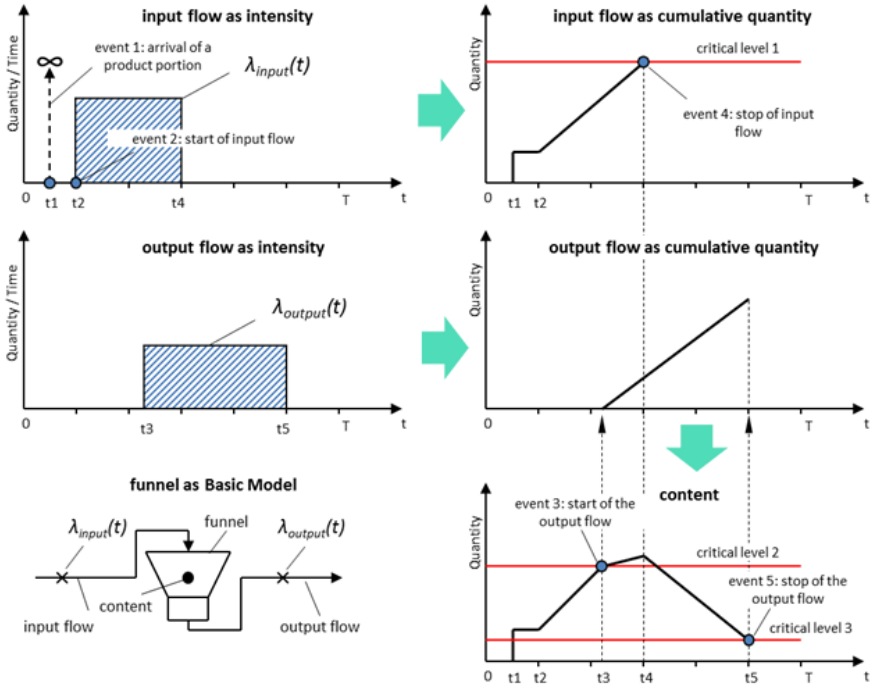


Figure 3. *Event scheduling for continuous processes*

Specific conditions are specified for all the other events:

- Event 3: The funnel's output flow can only start when its stock has reached the critical level 2.
- Event 4: The funnel's input flow is terminated when the entire quantity of products in the flow has reached the critical level 1.
- Event 5: The funnel's output flow is terminated when its stock has reached the critical level 3.

Times t3, t4 and t5 can be calculated precisely and entered into the simulators' chain of future events. Ultimately, only five events must be processed in the variable time interval Δt. In terms of performance, the advantage of this type of time advance over a fixed time step Δt is obvious.

As it was written before, two possible time step types could be selected for mesoscopic modelling: fixed time step and variable time step. The use of variable time step gives more flexibility to the model and, as a result - some more exact output result at the end, on the one hand, and the fact that a fixed time step is simpler in realization – on the other hand. The Figure 4 shows the general difference in both cases: application of fixed time step and use of variable time step.

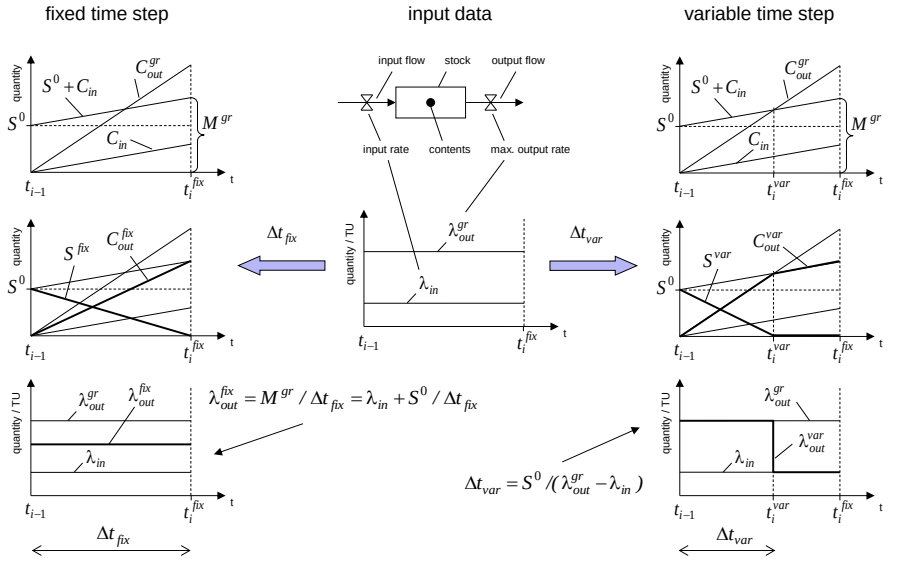


Figure 4. *Mesoscopic modelling by fixed and variable time step*

The main feature of mesoscopic modelling is the point that all intensities of the flows $\lambda(t)$ within each step Δt of the model time t stay permanent. At the same time, a step value Δt could be given a fixed value or should be calculated for each new step. This situation will be described below on the basis of simple stock (see Figure 4).

It is expected that current time of the process is t_{i-1}. The following values are given:

- the level of stock $S(t_{i-1})$ in time t_{i-1}, equal to S^0;
- fixed time step Δt_{fix};
- permanent intensity of the input flow λ_{in};
- maximum value of the intensity of the output flow λ_{out}^{gr}.

In case of a fixed time step, the next moment of time is determined using the following formula:

$$t_i^{fix} = t_{i-1} + \Delta t_{fix} \tag{1}$$

If output flow of stock will not be taken into account, the level of stock for time t_i^{fix} will be equal to:

$$S(t_i^{fix}) = S^0 + C_{in}(t_i^{fix}) = S^0 + \lambda_{in}\Delta t_{fix} = M^{gr} \tag{2}$$

If maximum value of intensity of the output flow λ_{out}^{gr} is so small, that the following condition is true

$$C_{out}^{gr}(t_i^{fix}) = \lambda_{out}^{gr}\Delta t_{fix} \le M^{gr} \quad (3)$$

then the real intensity of the output flow $\lambda_{\text{out}}^{\text{fix}}$ within all the intervals will be equal to Δt_{fix}. Further, the case with condition 3 not being true will be described. This means, that the level of stock could be decreased to 0 until the time moment t_i^{fix}. Intensity of the output flow $\lambda_{\text{out}}^{\text{fix}}$ in this case cannot be $\lambda_{\text{out}}^{\text{gr}}$ within the time interval Δt_{fix}, because it will lead to negative values of the level of stock at the time t_i^{fix}.

Figure 4 shows the following two cases:

- next moment of time for the process t_i^{fix} is determined by fixed time step Δt_{fix};
- next time step of the process Δt_{var} is determined by moment of time t_i^{var}, for which event will occur (the level of stock will reach 0).

For the fixed step Δt_{fix}, within the time interval any changes in flows could not be reflected. It is assumed that at the end of time interval Δt_{fix} the cumulative volume of output flow will be M^{gr}. This means that fixed intensity $\lambda_{\text{out}}^{\text{fix}}$ could be determined by the following formula:

$$\lambda_{out}^{fix}\Delta t_{fix} = M^{gr} \quad (4)$$

From equations 3 and 4 it follows:

$$\lambda_{out}^{fix} = \frac{M^{gr}}{\Delta t_{fix}} = \frac{(S^0 + \lambda_{in}\Delta t_{fix})}{\Delta t_{fix}} = \lambda_{in} + S^0/\Delta t_{fix} \quad (5)$$

Permanent intensity $\lambda_{\text{out}}^{\text{fix}}$ also means that level of stock $S^{fix}(t)$ within the interval will be evenly (linearly) decreased to 0. In this case, no real moment of time t_i^{var} when stock will be empty can be determined.

On the other hand, modelling with variable time step Δt_{var}, is based on preliminary calculations of moments of time t_i^{var}, then the determined conditions are true. In this example these conditions are:

$$S^0 + \lambda_{in}\Delta t_{var} = \lambda_{out}^{gr}\Delta t_{var} \quad (6)$$

From formula 6 it follows:

$$\Delta t_{var} = S^0/(\lambda_{out}^{gr} - \lambda_{in}) \quad (7)$$

and

$$t_i^{var} = t_{i-1} + \Delta t_{var} \quad (8)$$

Thus, using modelling with variable time step, two time intervals: (t_{i-1}, t_i^{var}) and (t_i^{var}, t_i^{fix}) were constructed. During the first interval real

intensity λ_{out}^{var} is equal to maximum value of λ_{out}^{gr} , but during the second one equals to λ_{in}. The level of stock decreases at the end of the first interval till 0 and stays at this level within the whole interval $\left(t_i^{var}, t_i^{fix}\right)$.

All the above-described simulation approaches could be separated into groups. The separation could be based on detail level.

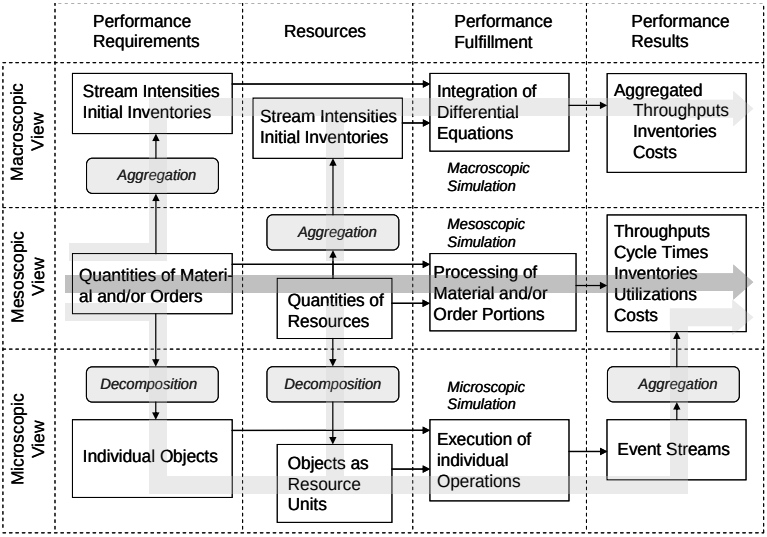


Figure 5. *Relationship between levels*

Discrete event simulation and agent-based simulation are mainly used at microscopic level. The system dynamics approach could be applied at macroscopic level. And, finally, the discrete rate approach deals with mesoscopic level. It could be seen from Figure 5 that the application of macroscopic approaches is often connected with such operation as data aggregation; that is why the final results are frequently not so exact. The application of microscopic approaches is connected with decomposition operation. And due to this, model construction and experimentation with it, is a process of time consumption.

Chapter 3 (Development of the concept of a mesoscopic discrete rate traffic simulation model)

As it was mentioned above, mesoscopic concepts are mainly used for simulation of logistic systems. That is why mesoscopic approach is primarily formulated for flow logistics systems. The goal of this chapter is to update DR approach and to transform it for traffic flow simulation.

Traffic flow simulation is a very specific area of application of simulation due to the existing difference between processes inherent in traffic and in logistic systems. In this chapter, two mathematical models were formulated: the first one is meant for an uncongested network, and the second one for a congested network. Most generally, the model for a congested network should be treated as possible queues in the transport systems are taken into account.

A. Uncongested network. Let us consider a network consisting of two signal-controlled crossroads linked together by the road. The Figure 6 presents an example of such a network with the notations used here to describe mathematical model for traffic flow simulation. As it is seen from Figure 6, a number of input flows from different directions marked by $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ exist within the transport system. At the same time, there exist intensities of the output flows marked by $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$. Comparing to logistics systems, a very complex interaction between flows could be observed in this case. This interaction is determined by splitting input flows by different directions and, at the same time, some control mechanism should be applied to prioritise the flows. To show the flows interaction, Figure 7 is represented with a higher detail level by using Figure 6, which explains interaction between flows.

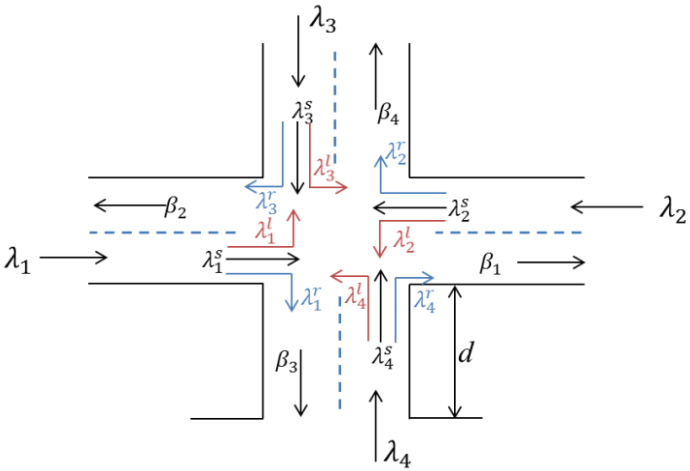


Figure 6. *Example of transport network*

The transport network shown on Figure 6 could be also presented according to the DR notation with funnels and transporting element, as it is shown on Figure 7. As it could be seen, the transport network using 5 funnels and 1 transporting item is described. The next description of the used notation could be given:

λ_i – input intensity of the flow from direction *i=1..5 (*used units: PCU per time unit);

β_i – output flow value from direction *i=1..5 (*used units: PCU per time unit);

$\lambda_i^l, \lambda_i^s, \lambda_i^r$ – intensity of the flow for the turns (*l-left; s-straight; r-right*) from direction *i=1..5* (used units: PCU per time unit);

b_i^l, b_i^s, b_i^r- queue length for the turns (*l-left; s-straight; r-right*) from direction *i=1..5* (used units: PCU);

μ_i^l, μ_i^s, μ_i^r - the capacity for the turns (*l-left; s-straight; r-right*) from direction *i=1..5* (used units: PCU per time unit);

β_i^l, β_i^s, β_i^r - output flow rate for the turns (*l-left; s-straight; r-right*) from direction *i=1..5* (used units: PCU per time unit);

β_i – total output flow to direction *i=1..5* (used units: PCU per time unit);

B_5^{cap}- the maximum value of queue length for direction 5 (used units: PCU).

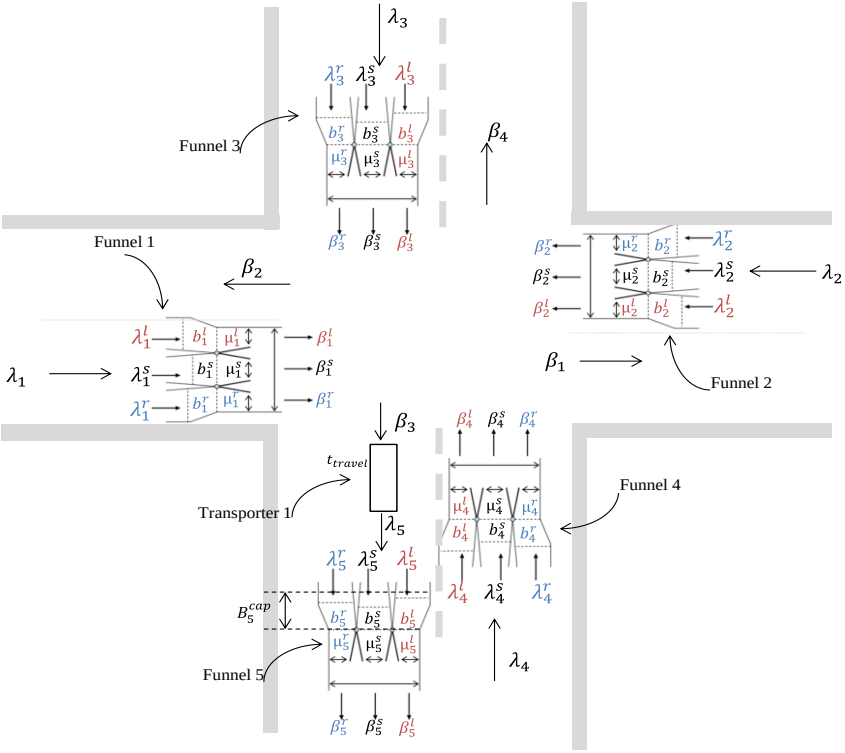


Figure 7. *Transport network in Discrete Rate notation*

The following equations could be written, which define intensity of the flow by direction and by turns:

$$\begin{cases} \lambda_i^r(t) = \lambda_i(t) p_i^r \\ \lambda_i^s(t) = \lambda_i(t) p_i^s \\ \lambda_i^l(t) = \lambda_i(t) p_i^l \\ p_i^r + p_i^s + p_i^l = 1 \end{cases} \tag{9}$$

where p_i^r, p_i^s, p_i^l – a probability of turns (*l-left; s-straight; r-right*) from direction *i=1..5;*

t – current time.

$$\begin{cases} \beta_1(t) = \beta_1^s(t) + \beta_4^r(t) + \beta_3^l(t) \\ \beta_2(t) = \beta_2^s(t) + \beta_3^r(t) + \beta_4^l(t) \\ \beta_3(t) = \beta_3^s(t) + \beta_1^r(t) + \beta_2^l(t) \\ \beta_4(t) = \beta_4^s(t) + \beta_1^r(t) + \beta_2^l(t) \\ \beta_5(t) = \beta_5^s(t) + \beta_5^r(t) + \beta_5^l(t) \end{cases} \tag{10}$$

$$\begin{cases} \mu_i^r(t) = f_i^r(\Delta t(t)) \\ \mu_i^s(t) = f_i^s(\Delta t(t)) \end{cases} \tag{11}$$

where $\Delta t(t)$ – time step within time *t* (in this demonstration equal to the duration of green phase (for simplification t_{green}) is equal for all directions and all crossroads;

$f_i^n()$ – passing function which determine throughput capacity from direction *i=1..5* and turn $n \in (l, s, r)$.

The form of the above-mentioned function could be empirically found during observations of real traffic; this task was solved in chapter 5.

$$\beta_{i\in(1,2,4,5)}^s(t) = \begin{cases} 0,\ \lambda_i^s(t) = 0\ and\ b_i^s(t) = 0 \\ \lambda_i^s(t), \lambda_i^s(t) > 0\ and\ \lambda_i^s(t) \le \mu_i^s\ and\ b_i^s(t) = 0 \\ \mu_i^s, b_i^s(t) > 0 \end{cases} \tag{12}$$

$$\beta_{i\in(2,3,4,5)}^r(t) = \begin{cases} 0,\ \lambda_i^r(t) = 0\ and\ b_i^r(t) = 0 \\ \lambda_i^r(t), \lambda_i^r(t) > 0\ and\ \lambda_i^r(t) \le \mu_i^r\ and\ b_i^r(t) = 0 \\ \mu_i^r, b_i^r(t) > 0 \end{cases} \tag{13}$$

$$\begin{cases} \mu_1^l = f_1^l\left(t_{green} - f_2^{s^{-1}}\left(\beta_2^s(t)\right)\right) + h \\ \mu_2^l = f_2^l\left(t_{green} - f_1^{s^{-1}}\left(\beta_1^s(t)\right)\right) + h \\ \mu_3^l = f_3^l\left(t_{green} - f_4^{s^{-1}}\left(\beta_4^s(t)\right)\right) + h \\ \mu_5^l = f_5^l(t_{green}) + h \end{cases} \tag{14}$$

where h – additional capacity, explained by crossing of the crossroad during yellow colour of traffic light;

$f_i^{n^{-1}}()$ – inverse passing function, which determines the time required for passing a crossroad.

$$\beta^l_{i\in(1,3,5)}(t) = \begin{cases} 0,\ \lambda^l_i(t) = 0\ and\ b^l_i(t) = 0 \\ \lambda^l_i(t), \lambda^l_i(t) > 0\ and\ \lambda^l_i(t) \le \mu^l_i\ and\ b^l_i(t) = 0 \\ \mu^l_i, b^l_i(t) > 0 \end{cases} \quad (15)$$

$$\Delta b_5(t) = B^{cap}_5 - b^r_5(t) - b^s_5(t) - b^l_5(t) \quad (16)$$

$$\beta^r_1(t) = \begin{cases} 0,\ \lambda^r_1(t) = 0\ and\ b^r_1(t) = 0 \\ \lambda^r_1(t), \lambda^r_1(t) > 0\ and\ \lambda^r_1(t) \le \mu^r_1\ and\ b^r_1(t) = 0\ and\ \lambda^r_1(t) \le \Delta b_5(t) \\ \mu^r_1, b^r_1(t) = 0,\ \mu^r_1 \le \Delta b_5 \\ \Delta b_5\ , b^r_1(t) = 0 \end{cases} \quad (17)$$

$$\beta^s_3(t) = \begin{cases} 0,\ \lambda^s_3(t) = 0\ and\ b^s_3(t) = 0 \\ \lambda^s_3(t),\ \lambda^s_3(t) > 0\ and\ \lambda^s_3(t) \le \mu^s_3\ and\ b^s_3(t) = 0\ and\ \lambda^s_3(t) \le \Delta b_5(t) \\ \mu^s_3, b^s_3(t) = 0, \mu^s_3 \le \Delta b_5 \\ \Delta b_5\ , b^s_3(t) = 0 \end{cases} \quad (18)$$

$$\mu^l_2 = f^l_2\left(t_{green} - f^{r\,-1}_1\left(\beta^r_1(t)\right)\right) + h \quad (19)$$

$$\beta^l_2(t) = \begin{cases} 0,\ \lambda^l_2(t) = 0\ and\ b^l_2(t) = 0 \\ \lambda^l_2(t),\ \lambda^l_2(t) > 0\ and\ \lambda^l_2(t) \le \mu^l_2\ and\ b^r_1(t) = 0\ and\ \lambda^l_2(t) \le \Delta b_5(t) \\ \mu^l_2, b^l_2(t) = 0, \mu^l_2 \le \Delta b_5 \\ \Delta b_5\ , b^l_2(t) = 0 \end{cases} \quad (20)$$

B. Congested network. The second model proposed for a congested network simulation is generally based on the previous model, but takes into account the length of the road between crossroads, queue growing rate, and travel time between crossroads. To make these options available, the model for uncongested network should be updated in the following way (see Figure 8).

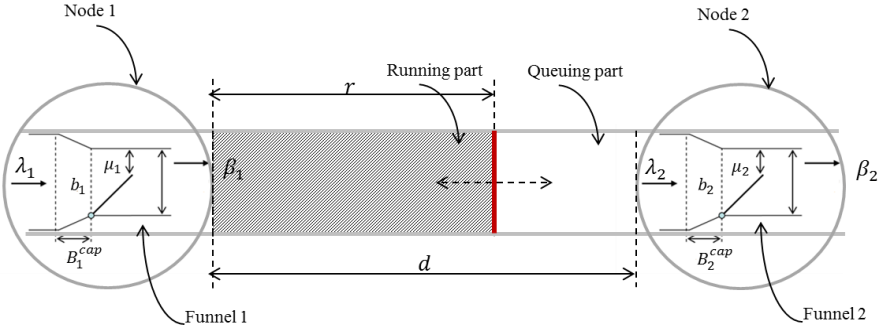


Figure 8. *Model for congested network*

Description of the following notations could be done:
d – length of the road between crossroads (measured in PCU);
r – length of the running part of the road (measured in PCU);
d-r – length of the queuing part of the road (measured in PCU);
λ_1 – intensity of income flow for funnel 1 (measured in PCU per time unit);
λ_2 – intensity of income flow for funnel 2 (measured in PCU per time unit);
$B_1^{cap} = \infty$ – maximum length of the queue in 1st funnel (measured in PCU);
$B_2^{cap} = d$ – maximum length of the queue in 2nd funnel (measured in PCU);
b_1– length of queue in the first funnel (measured in PCU);
b_2 – length of queue in the second funnel (measured in PCU);
μ_1 – capacity for first funnel (measured in PCU per time unit);
μ_2 – capacity for second funnel (measured in PCU per time unit);
β_1 – outflow intensity for first funnel (measured in PCU per time unit);
β_2– outflow intensity for second funnel (measured in PCU per time unit).

There is no need to describe the way of processing traffic flow passing through the funnels, as it was described in the previous subchapter; that is why some more attention will be paid now to the mechanism, which allows modelling the congested network. The main problem of the previous model is the fact that no reference to the growing queue of the vehicles and taking up a part of the road was made. That is why the following mechanism is proposed in this model. The road between the crossroads (let's call it "a link") is divided into two parts: the running and the queuing ones. The division of roads into two parts is dynamic, it means that during simulation a running part could be increased or decreased depending on queuing part. The length of the queuing part is equal to the length of the queue of 2nd funnel. This could be written as the following:

$$r(t) = d - b_2(t) \tag{21}$$

The running part of the link is used for the movements. A movement in this model is defined by the travelling time that could be calculated by using one of volume delay function (VDF) by the following example:

$$\begin{cases} t_{cur} = t_0(1 + a \cdot sat^b), if\ sat < sat_{crit} \\ t_{cur} = t_0(1 + a \cdot sat^b) + (q - q_{max})d, if\ sat \geq sat_{crit} \\ sat = \dfrac{q}{q_{max}c} \\ sat_{crit} = 1 \end{cases} \tag{22}$$

where t_0 – free flow travel time (measured in time units);
q – traffic quantity in running part (measured in PCU);
$q_{max} = r$ – capacity (measured in PCU);
t_{cur}– travel time in loaded network (measured in time units);
a, b, c, d – parameters of the VDF.

The free flow travel time t_0 could be defined by the following equation:

$$t_0 = \frac{r}{v},$$

where v – speed on link.

Chapter 4 (Comparing the developed approach with microsimulation. Case studies.)

The goal of the examples proposed in this chapter is to demonstrate the way the transport models could be constructed on the basis of DRTRM. Most of the focus is on validation of the model outputs by applying statistical methods (classical statistics tests, Naive, Novel tests etc.)

Case-study 1: Simulation of crossroad

The modelling object is a symmetric crossroad with traffic light control. Transport flows are created in sources 1 to 4. They can pass the crossroad by using the following directions: right (r), straight (s) and left (l). Two opposite sources have their green phase at the same time. During this time the two remaining sources have their red phase. That means that they do not interfere with each other. The modelling task is to estimate the dynamics of all queues. Transport flows and traffic lights phases are given.

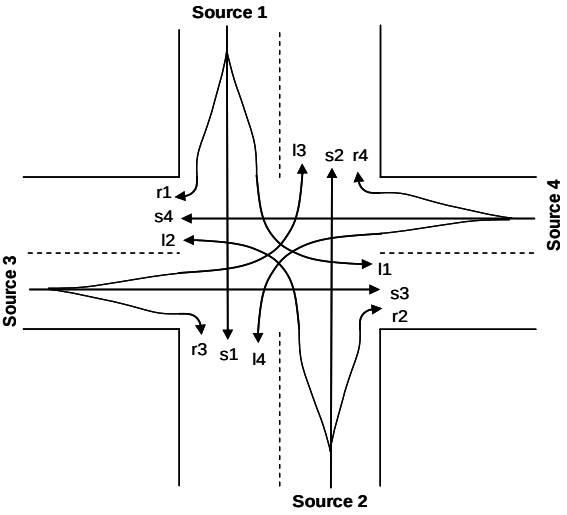


Figure 9. *Conceptual model of the crossroad*

Random values are used for the determination of all 12 incoming flows. An empirical function (see Figure 10) is used to create a more realistic process of crossroad passing. This function was estimated through direct observation of real crossroad passing processes. This function can be used for all directions. The function is used in the model as direct and as inverse function. Figure 10 shows that within the first 25.5 seconds of a traffic light cycle a vehicle flow with the length *q1*=122 m can pass the crossroad, and within the first 32.5 seconds - the flow of *q2*=185 m.

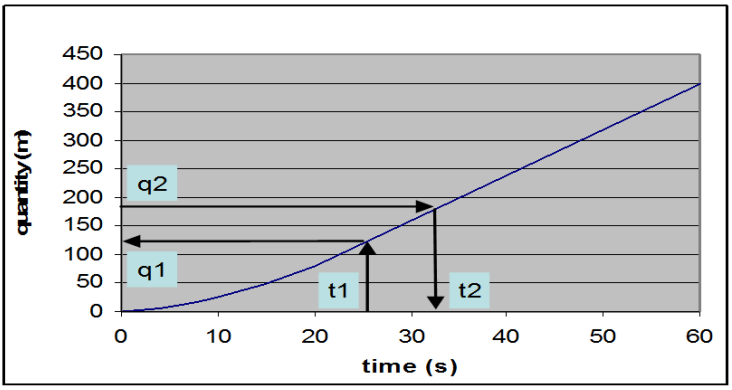


Figure 10. *Dynamic of vehicle flow during crossroad passing*

The principal structure of the crossroad model is presented on Figure 11. The model consists of four autonomic components, because no direct relationships exist between the traffic flows of the four directions. Each component has three parallel channels. The channels generate, delay, and release traffic flows. The delay and the release are realized by a multichannel funnel described above. The content of each channel of the funnel is numerically equal to the length of the queue. The control component of the model (Flow Control) defines the quantity of vehicles, which can pass the crossroad in each traffic light cycle in different directions.

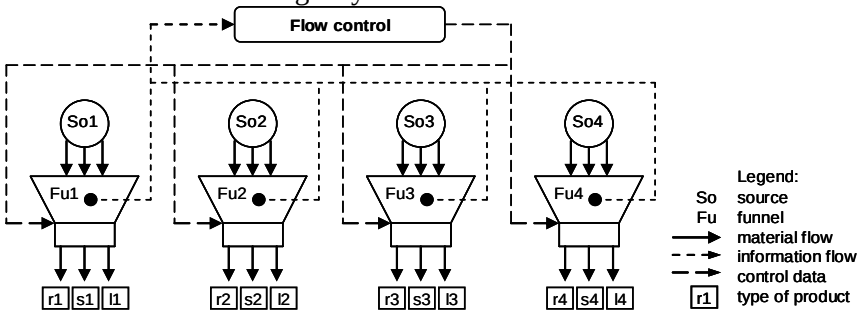


Figure 11. *Structure of the mesoscopic model*

The model proper was developed in Microsoft Excel 2003 using Visual Basic for Application (VBA). The selection of development tool implies a possibility of using internal spreadsheets, internal programming languages, and internal visualization tools as graphs.

Table 1 presents the outcomes of modelling 20 cycles. The frames "input (sum)" and "output (sum)" show the total length values of funnel entrance and funnel exit. The data within the frame "queue (maximum)" present the maximal lengths of the queues during model execution. The queue lengths are changing during a traffic light cycle.

Table 1. Output data of the mesoscopic model of a crossroad

Cycle number: 20 of 20				Time (s): 1000							
Funnel 1											
input (sum)				output (sum)				queue (maximum)			
right	straight	left	total	right	straight	left	total	right	straight	left	total
330.9	1115.9	187.5	1634.3	335.9	1108.4	188.2	1632.5	12.6	69.3	18.1	96.3
Funnel 2											
input (sum)				output (sum)				queue (maximum)			
right	straight	left	total	right	straight	left	total	right	straight	left	total
352.4	1117.0	161.6	1630.9	357.4	1127.0	159.3	1643.7	15.4	50.4	15.2	72.1
Funnel 3											
input (sum)				output (sum)				queue (maximum)			
right	straight	left	total	right	straight	left	total	right	straight	left	total
275.1	886.8	159.9	1321.8	280.1	896.8	164.9	1341.8	10.9	34.5	12.8	54.9
Funnel 4											
input (sum)				output (sum)				queue (maximum)			
right	straight	left	total	right	straight	left	total	right	straight	left	total
345.4	1173.1	186.2	1704.8	350.4	1183.1	191.2	1724.8	16.8	54.6	15.1	86.4

Also the dynamics of all 4 queues could be presented by Figure 12.

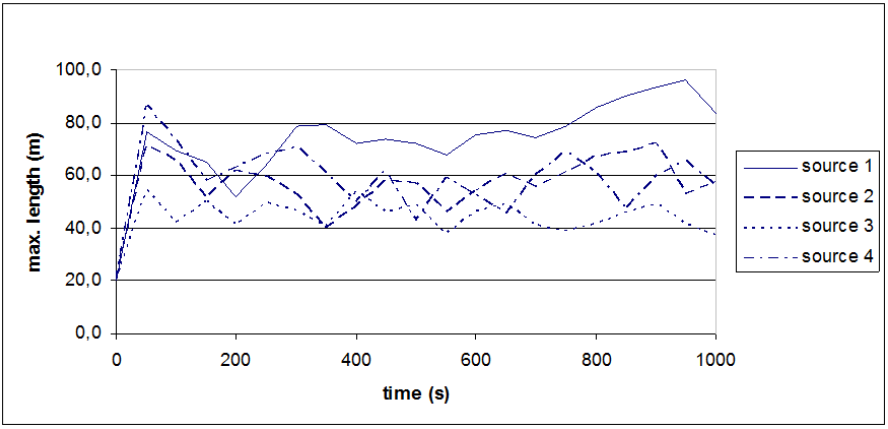


Figure 12. *Dynamics of queues of incoming flows*

Case-study 2: Simulation with two connected crossroads

The modelling object is a fragment of transport network. The conceptual model is presented on Figure 13.

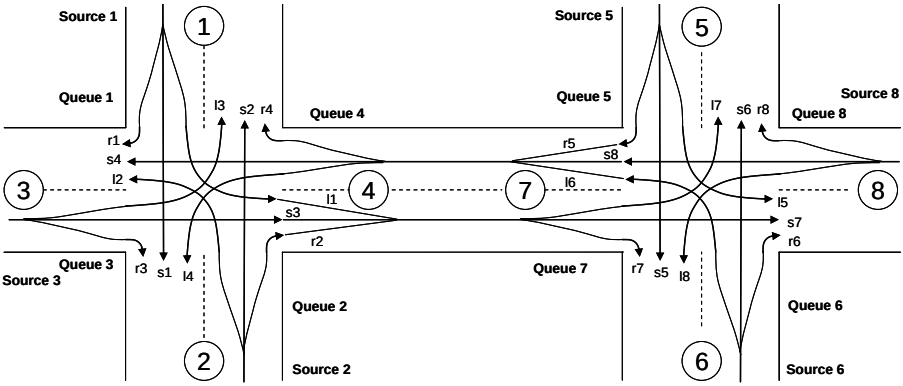


Figure 13. *Conceptual model of the transport network fragment*

The fragment consists of two symmetric traffic-light signalised crossroads, which are connected with the road which is a part of the model. The vehicle flow enters the network from 6 zones, which are enumerated like 1, 2, 3, 5, 6 and 8. Each income flow is divided into three moving directions: right (*r*), straight (*s*) and left (*l*). The geometry of the crossroads is constructed in such a way that vehicles entering the network from one zone and belonging to one direction *r*, *s* and *l*, can reach and pass the crossroad independently from the other directions. Only the vehicles turning left (flow *l*), depend on the duration of flow *s*, which passes the crossroad straight in the counter lane, during the green phase of traffic light.

All model construction issues are the same as the model constructed in the first case-study. That is why, not focusing on model development any more, we would rather go ahead and present only the issue of the proposed model validation results. To validate the constructed mesoscopic model, we are using simulation on microscopic level. According to the conceptual model (see Figure 13), a microscopic model of the crossroads in professional simulation software PTV VISION VISSIM has been developed. Subsequently, visual validation and validation approaches based on statistical methods were used for the purpose.

Animation-based validation: according to the observed animation of the simulation process in microscopic model, it could be concluded that a mesoscopic model on qualitative level represents microscopic level.

Comparison of Queue dynamics: According to the observation of queue dynamics, it could be concluded that mesoscopic model on qualitative level represents microscopic level.

Test for homogeneity: The Student's *t* test and Mann-Whitney *u* test were performed. As some of the data does not comply with normal distribution, the *t* test will not be performed for queue 7, queue 6 and queue 3, but still *u* test will be completed. The obtained results prove, that hypothesis about data homogeneity could not be rejected with α=0.05, so mesoscopic model is valid.

Confidence interval test: The results of application confidence interval test show that there are no significant difference in average between values obtained from microscopic model and mesoscopic model with α=0.05.

Naive test: The application allows us to conclude, that for most data sets the models are valid, with the exception of the Queue 4 and Queue 7. The analysis of the reasons for the Naive test failure is connected with the fact that Naive test requires n.i.i.d. For Queue 7, the test on normality fails. For Queue 4 it must be noted that F_{naive} value is very close to the AR.

Novel test: The application of the Novel test for data gives the following results: for Queue 1, Queue 3, Queue 5 the null hypothesis is not rejected and for all other data sets F_{novel} is not accepted.

To sum up all the obtained results during validation procedure, the following table could be constructed and conclusion could be made that the mesoscopic model could be treated as valid in general.

Table 2. Summary of validation results

Data set	Qualitative validation (animation)	Test for homogeneity	Confidence interval test	Naive test	Novel test
Queue 1	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid
Queue 2	Valid	Valid	Valid	Valid	Not valid
Queue 3	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid
Queue 4	Valid	Valid	Valid	Not valid	Not valid
Queue 5	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid
Queue 6	Valid	Valid	Valid	Valid	Not valid
Queue 7	Valid	Valid	Valid	Not valid	Not valid
Queue 8	Valid	Valid	Valid	Valid	Not valid

Chapter 5 (Mesoscopic simulation of an urban transport corridor)

This chapter demonstrates an example of the application of proposed DRTRM model for traffic flow simulation on the existing object with real data, taking into account traffic lights located in the simulated area. The object of the research is the urban transport corridor located in Riga city

and consists of 10 crossroads. This transport corridor connects the city centre and residential districts inside and outside the city. The length of the investigated part of the transport corridor is approximately 1500 meters. The transport corridor scheme is presented on Figure 14.

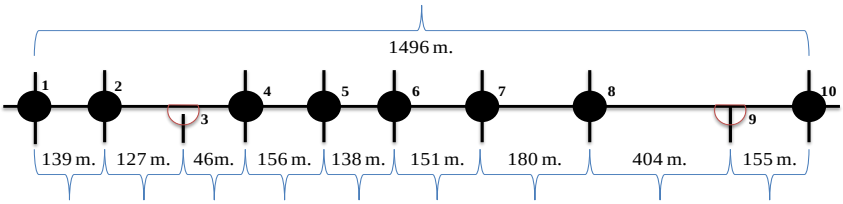


Figure 14. *Scheme of transport corridor*

To simplify reference to crossroads within the transport corridor, all of them are numbered. Moreover, it should be noted that the direction from city centre goes from left to right. The bulk of the crossroads are controlled by traffic lights, except for the crossroads 3 and 9. The data on traffic lights shows the duration of cycle and the duration of each light. The volumes of traffic have been obtained during traffic counts. The traffic counts are estimated during morning peak hours from 8:00-9:00 a.m. in October, 2010. During traffic counts, a number of vehicle types are differentiated: bicycles, motorcycles, passenger vehicles, light cargo trucks, HGV, buses, single trolleybuses, and twin trolleybuses. The mesoscopic approach in the current formulation does not take into account types of vehicles; that is why all collected data have been aggregated into PCU (passenger car unit).
Finally, the following general information about the transport corridor should be stated:

- allowed speed across transport corridor is 50 km/h;
- transport corridor has two lanes per direction;
- all public transport stops are made outside the main roads and are located in pockets;
- traffic lights are managed for creating a green wave across the entire transport corridor.

The main task is connected with modelling of the described transport corridor and the definition using the simulation results level of service (LOS) for each crossroad. At this point, it is necessary to emphasize that LOS will be calculated based on the average delay value on crossroad according to HCM standard. Using the data collected during real observation of how vehicles pass the crossroad, a form of passing function has been determined. To obtain the form of passing function, 6 different regression models are constructed based on the collected data. Analysing

the obtained regression models the decision on passing function has been made (see Equation 23), and will hereinafter be used in simulation model.

$$q^* = -1.1479 + 0.794 * t - 0.01113 * t^2 + 0.00026 * t^3 \quad (23)$$

where q^* – estimated volume of traffic;
t – time.

For simulation model construction, ExtendSim software was used. However, not all of the blocks of DR library are useful for transport model construction. Table 3 demonstrates the role of DR library blocks in transport modelling.

Table 3. Main function of blocks in transport model

Block	Name	Function in transport model
	Convey flow	Could be used to simulate a movement between two geographical points (at example between two crossroads).
	Diverge	Could be used to simulate a splitting of the transport flow by different direction (at example on crossroads turning left, turning right, moving forward).
	Merge	Could be used to merge traffic flows together.
	Sensor	Could be used as the main source of information for controlling flows and to control flow interaction.
	Tank	Could be used as a source and a sink. Also could be used to represent the road capacity.
	Valve	Controls, monitors, and transfers traffic flow.

The hierarchical structure of the model was created in ExtendSim application. That is why custom library blocks have been created to simplify the process of model development: they are called “node_sig” and “node”. These blocks represent crossroads with different management strategy:

- Signalised crossroads (node sig) – the crossroads controlled by traffic light with a definite length of cycle. This group includes 8 crossroads (crossroad numbers: 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8 and 10).
- Non-signalised crossroads (node) – the crossroads not controlled by traffic light. This group includes only 2 crossroads (crossroads: 3 and 9).

The general high-level part of the model is presented on Figure 15. The example of block structure for it could be seen on Figure 16.

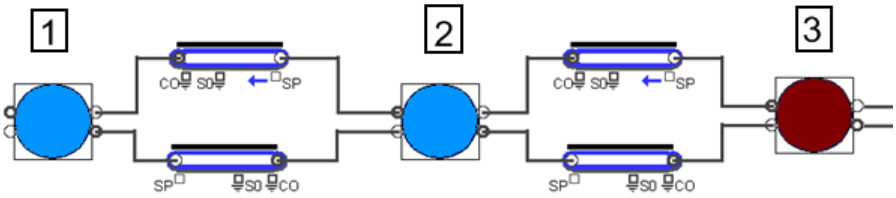


Figure 15. *Example of constructed general high-level model*

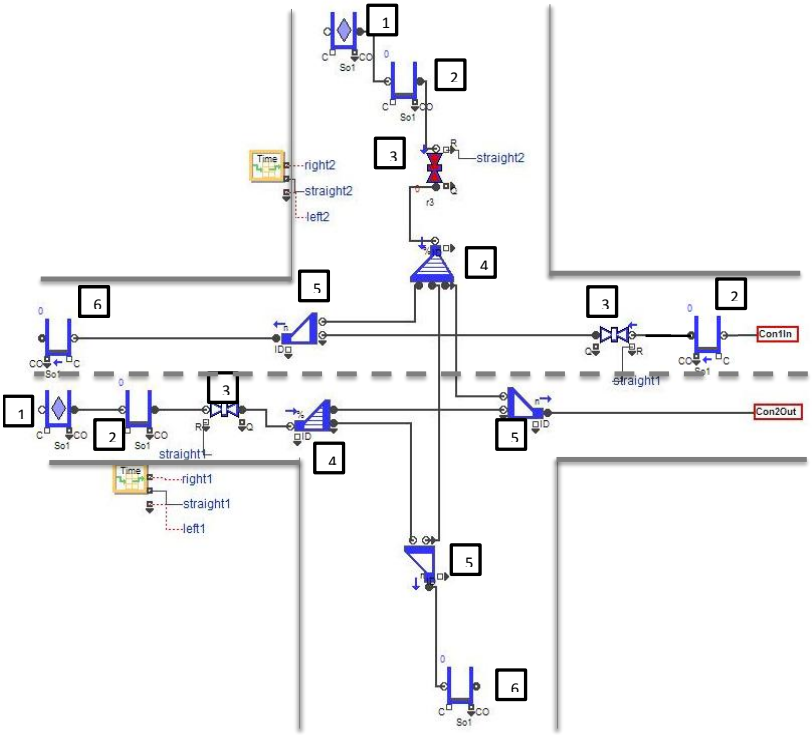


Figure 16. *Example of internal structure of the block "node_sig"*

The internal structure of block "node_sig" for the 1st crossroad consists of 14 main and 2 additional blocks. Some additional blocks are required to simulate the traffic light operation. The main blocks define the behaviour of the traffic flow.

Finally, the results obtained from validated microscopic of the same part of the transport corridor, and those obtained from mesoscopic model, have been compared. The comparison results could be observed in Table 4.

Table 4. Delay times and LOS comparison

Crossroad Number	Microscopic model		Mesoscopic model	
	LOS	Average delay time (s)	LOS	Average delay time (s)
1.	B	14.5	B	18.6
2.	B	13.8	B	17.5
3.	A	1.6	A	1.2
4.	B	17.3	B	17.6
5.	B	18.1	C	21.6
6.	B	11.2	B	14.3
7.	C	20.6	C	30.8
8.	C	31.2	D	45.5
9.	A	2.1	A	1.2
10.	D	41.5	E	55.6

As it can be seen, notwithstanding the difference in volumes that constitutes 20% on average, LOS for crossroads is mostly matched. It should be noted of course that the delay time is somewhat different with all the crossroads, and sometimes this difference does not influence the LOS, except for the LOS related to crossroads 10, 8, and 5. For crossroad 10, the difference is equal to 14 seconds. For the numbers 8 and 5, the difference is not so significant. Essentially, the behaviour of traffic flow in the mesoscopic model is very close to real situation in this urban transport corridor. The difference in the output data can be explained by higher level of abstraction of the mesoscopic model. At the same time, the speed of development of mesoscopic model is 3 times less.

In general, the significant difference in development time is connected with a simplification of the network representation at mesoscopic level. At the same time, the difference between output data is not significant. The main advantages of the mesoscopic approach are: a significant decrease of the development time and expectable precessions of the output results. Detailed results of comparison between development and experimentation issues in microscopic and mesoscopic level could be seen in Table 5.

Table 5. Development and experimenting time for micro- and mesoscopic models

Development and experimentation issues (min)	**Microscopic**	**Mesoscopic**
Transport network implementation	175	60

Implementation of traffic lights	60	30
Conflict areas and priority rules implementation	115	60
Movement routes implementation	30	30
Traffic flow implementation	30	60
Time spend on experimentation	350	10
Total implementation and experimentation time	**760**	**250**

MAIN RESULTS OF THE THESIS

The concept of new mesoscopic traffic simulation model, which is based on discrete rate approach, is developed as the central part of the promotion work. The proposed discrete rate traffic reference model has been tested in a series of experiments using artificial and real data. As a result, the data obtained during these experiments allow us to conclude that the proposed concept could be a useful tool for transport planners and researchers in the field of traffic flow analysis. The following tasks have been solved, and the following results are obtained:

1. The review of the current and the future role of simulation models in transportation sphere has been performed; this allows one to conclude that there will be a high demand for the simulation in future as it is a powerful and exact tool for traffic flow analysis.
2. The analysis of the existing traffic analysis tools and their role has been carried out with a detailed description; this allows one to show the place of simulation models among different kinds of traffic tools; it is shown that traditional simulation methods are based on microscopic and macroscopic approaches, which are characterized by the existence of certain non-removable disadvantages.
3. It has been found out that some known attempts to develop models combining positive characteristics of microscopic and macroscopic models, did not lead yet to the development of a new, well-defined class of models which are usually called mesoscopic; as a rule, these models are only an arbitrary combination of microscopic and macroscopic models; a review of the currently existing mesoscopic model has been performed.
4. The choice of a relatively new paradigm of flow systems, which is called the discrete rate approach, has been justified as a base for the development of mesoscopic models of traffic systems; an event planning opportunity was studied with respect to piecewise continuous processes, with the modelling being based on discrete rate approach; it is stated that the proposed event planning significantly accelerates the processing of flow systems mesoscopic models.
5. The discrete rate traffic reference model (DRTRM) is formulated and developed in mathematical form, showing the main ideas postulated in a proposed new mesoscopic traffic simulation model.
6. The traffic flow model development methodology was developed on DRTRM; some examples of the methodology application are

described based on the demonstrative model of complex crossroads and the model of a real system.

7. Based on the data obtained from experiments, a validation of the developed models has been performed by using different methods, both qualitative and quantitative. Validation results prove that models developed by using DRTRM are valid; it is identified that practical benefits arising from the use of the new class of mesoscopic models lead to decrease of model development time and model processing time.
8. The example of using the proposed concept with respect to a real object located in Riga city has been presented, with a comparison of the real data obtained during the survey.

ДИССЕРТАЦИОННАЯ РАБОТА ПРЕДСТАВЛЕНА В ИНСТИТУТ ТРАНСПОРТА И СВЯЗИ НА СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА ИНЖЕНЕРНЫХ НАУК (Dr.sc.ing.)

ОФИЦИАЛЬНЫЕ РЕЦЕНЗЕНТЫ:

Dr.habil.sc.ing., Юрий Меркурьев,
профессор, Рижский технический университет,
Латвия.

Dr.ing., Клаус Рихтер,
профессор, Университет Отто фон Герике, Магдебург,
Германия.

Dr.sc.ing., Эгилс Гинтерс,
профессор, Видземская высшая школа,
Рига, Латвия.

Защита диссертационной работы состоится 3 октября 2013 г. в 16:00 в промоционном совете Института транспорта и связи по адресу: Латвия, г. Рига, ул. Ломоносова, 1, ауд. 130, тел. +371 67100594, факс: +371 67100535.

ПОДТВЕРЖДЕНИЕ

Я подтверждаю, что выполнил данную диссертационную работу, которая представлена на рассмотрение в Институт транспорта и связи на соискание учёной степени доктора инженерных наук (Dr.sc.ing.). Данная диссертационная работа ранее не представлялась на рассмотрение в другие промоционные советы.

3 октября 2013 М.М. Саврасов

Данная диссертационная работа написана на английском языке, состоит из введения, 5 глав, выводов, 59 рисунков, 26 таблиц и 7 приложений, в целом – 134 страницы. Список использованной литературы включает 103 источника.

ESF
EIROPAS SOCIĀLAIS FONDS

This work has been partly supported by the European Social Fund.
Project Nr. 2009/0159/1DP/1.1.2.1.2/09/IPIA/VIAA/006
(The support in Realisation of the Doctoral Programme “Telematics and Logistics” of the transport and Telecommunication Institute).

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ РАБОТЫ 80
Введение 80
Мотивация исследования 80
Цель и задачи работы 81
Объект и предмет исследования 81
Степень разработанности темы 81
Гипотезы исследования 83
Методы исследования 84
Научная новизна 84
Практическое значение исследования 84
Выносимые на защиту тезисы 85
Научные конференции и семинары 86
Публикации 86
Структура работы 86
РЕЗЮМЕ ГЛАВ РАБОТЫ 89
Глава 1 (Обзор инструментов анализа транспортных потоков) 89
Глава 2 (Сравнительный анализ подходов имитационного моделирования) 94
Глава 3 (Разработка концепции мезоскопической DR модели транспортного потока) 102
Глава 4 (Сравнение разработанного подхода с микромоделированием. Примеры) 108
Глава 5 (Мезоскопическое моделирование городского транспортного коридора) 114
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ 119

АННОТАЦИЯ

Диссертационная работа Михаила Саврасова «Разработка нового подхода для моделирования и анализа транспортных потоков на мезоскопическом уровне». Научный руководитель хабилитированный доктор инженерных наук, профессор Юрий Иванович Толуев.

В настоящей работе представлены результаты разработки, исследования и применения мезоскопической модели транспортных потоков, реализованной на базе подхода имитационного моделирования „Discrete Rate". Актуальность выбранной тематики подчёркивается непрерывным ростом числа транспортных средств на дорогах и как следствие – экономические потери, ухудшение экологической ситуации в городах и рост числа несчастных случаев. Одним из способов решения этих проблем является построение так называемой устойчивой транспортной системы. Среди инструментов, которые могут быть использованы при построении устойчивой транспортной системы, можно выделить имитационное моделирование. Имитационное моделирование в данном случае является инструментом, который позволяет оптимизировать существующую транспортную систему и сделать введение новых элементов транспортной системы более обоснованным. В работе подробно рассмотрена роль имитационного моделирования в сфере транспортного сообщения и выделены дальнейшие пути развития этого инструмента анализа транспортных потоков. Приведён обзор существующих инструментов анализа транспортных потоков и более подробно рассмотрены инструменты имитационного моделирования: микроскопические модели, мезоскопические модели и макроскопические модели. Детально исследованы существующие на сегодняшний момент мезоскопические модели, а также выделен их основной недостаток – это реализация в закрытом программном обеспечении, что затрудняет их использование на практике. Разработанная новая мезоскопическая модель базируется на подходе имитационного моделирования „Discrete Rate", который на сегодняшний день используется для моделирования материальных потоков в логистической сфере. В работе подробно описан основной принцип подхода и показано его отличие от известных классических подходов. На базе существующей концепции предложены и сформулированы два вида моделей: для незагруженной и загруженной сети. Приведены примеры использования разработанных моделей для различных объектов транспортной системы. На базе примеров подробно описан алгоритм реализации модели, проведена валидация модели и определены реалистичные параметры, необходимые для данного вида моделей.

ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ РАБОТЫ

Введение

С 1886 г., с момента, когда был запатентован первый автомобильный двигатель внутреннего сгорания, наблюдается непрерывный рост числа транспортных средств на дорогах. Это заставило транспортных планировщиков и исследователей искать новые методы развития и оптимизации транспортной инфраструктуры. В качестве стратегического и комплексного решения была сформулирована концепция устойчивой транспортной системы, которую следует применять и принимать во внимание при планировании транспортной инфраструктуры. Разработка устойчивой транспортной системы является сложной задачей, которая должна охватывать все аспекты транспортной системы – от постоянного анализа интенсивности транспортных потоков и обследования домашних хозяйств до развития новых технологий, в таких областях, как производство топлива и модернизация автомобильных двигателей. Среди важных инструментов, используемых для разработки транспортных систем нового поколения, особое место занимают оптимизация существующей транспортной инфраструктуры и детальный анализ влияния новых элементов инфраструктуры на другие части системы. Обычно это приводит к необходимости использования различных средств анализа транспортных потоков. Среди существующих средств анализа транспортных потоков моделирование является одним из наиболее мощных инструментов для решения задач, возникающих в процессе проектирования и модернизации реальной транспортной системы.

Мотивация исследования

Моделирование является мощным инструментом для анализа транспортной системы. Существующие на сегодня микроскопические и макроскопические модели имеют ряд недостатков. Недостатки микроскопического и макроскопического моделирования побуждают исследователей разрабатывать и испытывать модели нового типа, называемые мезоскопическими. В теории мезоскопические модели должны избегать недостатков, внутренне присущих микроскопическим и макроскопическим моделям. Однако отсутствие единой ясной концепции мезоскопического моделирования заставляет учёных и исследователей разрабатывать различные типы моделей, которые могут быть отнесены к классу мезоскопических моделей. Большинство существующих мезоскопических моделей разрабатываются теоретически, без какой-либо реализации в форме программного

обеспечения, либо реализуются в таком программном обеспечении, которое недоступно для широкого круга исследователей и практикующих специалистов. Эти факты мотивируют на разработку нового мезоскопического подхода для моделирования транспортных потоков, с которым смогут ознакомиться и взять на вооружение потенциальные пользователи (исследователи и транспортные планировщики).

Цель и задачи работы

Цель данной работы заключается в разработке, исследовании и применении нового типа модели, относящейся к классу мезоскопических моделей транспортного потока.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Рассмотреть существующие проблемы при имитационном моделировании транспортных систем.
2. Провести анализ:
   a) существующих на сегодня средств моделирования транспортных систем;
   b) существующих подходов моделирования с акцентом на мезоскопические модели транспортных потоков.
3. Предложить и разработать концепцию нового типа мезоскопической модели транспортного потока.
4. Разработать модели с использованием искусственных и реальных данных, демонстрирующие численные примеры использования предложенного мезоскопического подхода.
5. Проверить валидность нового типа мезоскопической модели потока на различных примерах.
6. Продемонстрировать преимущества и недостатки предложенной модели.
7. Привести научно обоснованные рекомендации по использованию разработанной модели.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования является транспортный поток. Предметом исследования являются модели транспортного потока, основанные на имитационном моделировании.

Степень разработанности темы

История моделирования транспортных потоков началась в 1955 г. с выходом в свет работы D.L. Gerlough "Simulation of freeway traffic

on a general-purpose discrete variable computer" в Калифорнийском университете Лос-Анджелеса. С тех пор ряд учёных и специалистов-практиков предпринимали попытки разработать и усовершенствовать теорию моделирования транспортных потоков. В рамках микроскопического моделирования транспортных потоков могут быть названы следующие работы: в 1974 г. R. Wiedemann в своей статье "Simulation des Straßenverkehrsflusses" опубликовал описание модели следования за лидером, которая получила название Wiedemann 74; P.G. Gipps в 1970 г. разработал модель следования за лидером Gipps'a. Также могут быть названы и другие учёные, которые активно работали в этой области: R.E. Chandler, D.C. Gazis, G. Lee, J.C. Bender, R.E. Fenton и др. Исследования этих учёных помогли подготовить базу для разработки программных средств моделирования транспортных потоков на микроуровне.

Тогда же началась разработка макроскопических моделей, которые позволяли моделировать более сложные объекты. Макроскопические модели движения транспорта принимают в расчёт агрегированные характеристики транспортного потока (скорость, интенсивность и плотность) и взаимоотношения между ними. В связи с макроскопическим моделированием можно упомянуть ряд исследователей: M.J. Lighthill, G.B. Whitham, P.I. Richards, C.F. Daganzo, S.K. Godunov и др.

Недостатки этих методов моделирования побуждают обратиться к разработке иного класса моделей для моделирования транспортных потоков, называемых мезоскопическими. В 1989 г. D.R. Leonard предложил модель CONTRAM. Модель предполагает группировку транспортных средств по пакетам и их последующую маршрутизацию. Другой исследователь, M. Ben-Akiva в 1996 г. предложил мезоскопическую модель DYNAMIT. Эта модель предполагала группировку транспортных средств по «ячейкам», которые определяют такие свойства, как скорость и т.д. Немногим ранее, в 1994 г., R. Jayakrishnan предложил использовать подход «очередь-сервер» для моделирования транспортного потока. Эта идея получила распространение, и C. Gawron представил в 1998 г. модель FASTLANE; в дальнейшем (2001 г.) M. Mahut предложил модель DTASQ. B.W. Bush применил теорию клеточных автоматов для моделирования транспортных потоков, разработав в дальнейшем программный продукт TRANSIMS. Последняя широко известная работа, посвящённая мезоскопическим моделям, была опубликована W. Burghout в 2004 г. в Королевском технологическом институте (Стокгольм, Швеция) как докторская диссертация.

Анализ вышеупомянутых источников и работ позволяет прийти к следующим заключениям относительно практического применения мезоскопических моделей, побуждая предпринять исследования в этой области:

- Мезоскопическое моделирование транспортных потоков – перспективный тип моделирования с точки зрения отсутствия высоких требований к входным данным и потенциально более низкими трудозатратами, необходимыми для разработки модели системы, проведения экспериментов и т.д.
- Термин «мезоскопическая модель транспортного потока» (“mesoscopic traffic model”) все ещё не имеет официального толкования (разные исследователи истолковывают его по-разному); это позволяет использовать различные подходы к разработке моделей, однако в то же время создаёт известную путаницу среди сообщества исследователей и транспортных планировщиков.
- Мезоскопические модели реализуются главным образом в закрытом программном обеспечении, предназначенном для внутреннего пользования в государственных институциях, либо разрабатываются без практической апробации. Это приводит к дефициту программных продуктов, использующих принцип мезоскопического моделирования при анализе транспортных потоков.

В качестве основы для разработки нового типа мезоскопической модели транспортного потока используется подход имитационного моделирования, имеющий в литературе название „Discrete Rate” (DR).

Концепция подхода Discrete Rate основана на планировании событий с использованием кусочно-линейных агрегатов, которые были описаны Бусленко Н.П. в 1973 г. Подход Discrete Rate был представлен на Winter Simulation Conference в 2009 г. D. Krahl, который реализовал этот подход в программном обеспечении ExtendSim. В то же время проф. Ю.И. Толуев в своих исследованиях продемонстрировал принципы и примеры применения Discrete Rate в области логистики.

Гипотезы исследования

В исследовании выдвинуты следующие гипотезы:

1. Подход Discrete Rate может быть использован для моделирования транспортных потоков на мезоскопическом уровне детализации.

2. Результаты, получаемые при применении предложенной модели, можно использовать как адекватную основу для дальнейшего принятия решений.

Методы исследования

Исследования, содержащиеся в работе, основаны на: теории систем, методах статистического анализа данных, современной теории моделирования, анализе научной литературы, научных статьях, пресс-релизах, отчётах Европейской комиссии, внутренних руководствах программного обеспечения и источниках в сети Интернет. В качестве компьютерной поддержки использовались программы: Microsoft Office Excel 2010, пакет Statistica 8, программное обеспечение для микроскопического моделирования PTV VISION VISSIM и программное обеспечение для моделирования ExtendSim 8.

Научная новизна

В ходе работы были получены результаты, которые являются новыми в инженерной науке планирования и анализа транспортных потоков:

1. Разработан новый подход к моделированию транспортных потоков, основанный главным образом на подходе Discrete Rate и названный автором DRTRM (Discrete Rate Traffic Reference Model).
2. Разработана методология использования DRTRM для моделирования транспортных потоков в исследовательских и практических приложениях.
3. Предложены реализации разработанного подхода к моделированию транспортных потоков, которые демонстрируют, что модели типа DRTRM могут использоваться транспортными планировщиками в процессе поддержки принятия решений как быстрое и эффективное средство.
4. Результаты валидации DRTRM позволяют принять данный подход как заслуживающий доверия.

Практическое значение исследования

1. Разработка методики и алгоритмов для использования DRTRM применительно к транспорту.

2. Обоснование преимуществ предложенной новой мезоскопической модели имитационного моделирования транспортного потока перед микроскопическими моделями на основе численных примеров.
3. Практическая апробация использования DRTRM применительно к конкретным случаям:
    a. Проект «Разработка модели интеллектуальной транспортной системы мультимодального коридора между Европой и Азией для оптимизации международной логистической цепи Латвия – Беларусь (TRANSLAB)», объявленный Министерством образования и науки Латвийской Республики (2007–2009 гг.).
    b. Латвийская национальная программа исследований «Долгосрочное использование местных ресурсов. Новые продукты и технологии (NatRes)» Проект No. 4. «Разработка долгосрочной программы гармонизации Латвийской транспортной системы (LATRANS)».
4. Полученные результаты легли в основу части читаемых лекций по дисциплине «Моделирование транспорта» программы 43525 «Коммерческая эксплуатация транспорта» и в дисциплине «Имитационное моделирование логистических и транспортных процессов» программы 4534507 «Транспорт и логистика» Института транспорта и связи.

Выносимые на защиту тезисы

В рамках работы были сформулированы следующие тезисы, которые выносятся на защиту:

1. В будущем различные формы имитационного моделирования будут широко использоваться в качестве стандартного элемента систем поддержки принятия решений (СППР) при решении задач планирования и управления в транспортных системах.
2. Использование парадигмы Discrete Rate для представления процессов позволяет создавать новый класс моделей (DRTRM – Discrete Rate Traffic Reference Model), предназначенных для моделирования и анализа транспортных потоков на мезоскопическом уровне.
3. Применение предложенного мезоскопического подхода к построению моделей позволяет существенно сокращать время,

необходимое на разработку моделей, и тем самым снижать издержки на моделирование.

4. Показано, что зависимость между интервалом времени и числом проехавших за этот интервал времени через перекрёсток автомобилей можно описать с помощью регрессионной модели третьего порядка линейной по параметрам.
5. Результаты моделирования, получаемые с использованием предложенного мезоскопического подхода, незначимо отличаются от результатов микроскопического моделирования и могут быть использованы в процедуре поддержки принятия решений.

Научные конференции и семинары

Основные результаты исследования представлены на 9-ти научных конференциях и семинарах: 25th European Conference on Modelling and Simulation (Польша, Краков, 2011); 1st International Conference on Road and Rail Infrastructure (Хорватия, Опатия, 2010); 23rd European Conference on Modelling and Simulation (Испания, Мадрид, 2009); 2nd International Logistics PhD Students' Workshop (Германия, Магдебург, 2009); International Conference „Modelling of Business, Industrial and Transport Systems" (Латвия, Рига, 2008); International Conferences "Reliability and Statistics in Transportation and Communication" (Латвия, Рига, 2012, 2010, 2008, 2007).

Публикации

Результаты исследований опубликованы в 18-ти научных публикациях. Список публикаций автора размещён в конце автореферата.

Структура работы

Промоционная работа состоит из: введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и 7 приложений. Работа содержит 134 страницы и включает в себя 59 рисунков и 26 таблиц. Список литературы включает 103 источника. Структура работы следующая:

Введение. Исходя из актуальности работы, определён объект и предмет исследования; проведён обзор соответствующей научной литературы и сформулированы цель и задачи исследования.

Глава 1. Обзор инструментов анализа транспортных потоков. Рассматриваются и классифицируются типы инструментов анализа транспортных потоков, анализируется роль моделирования в области транспорта и резюмируются тенденции в изменении инструментов анализа транспортных потоков, основанных на имитационном моделировании. Представлен обзор и анализ различных моделей, классифицируемых как мезоскопические. Этими моделями являются: CONTRAM, DYNAMIT, DYNASMART, FASTLANE, DTASQ, MEZZO, AMS и клеточные автоматы.

Глава 2. Сравнительный анализ подходов имитационного моделирования. Подчёркивается роль и место подхода имитационного моделирования Discrete Rate среди хорошо известных классических методов имитационного моделирования, таких как: дискретно-событийное моделирование, системная динамика и агентное моделирование (agent-based simulation). Приведено сравнение этих подходов как на общем уровне, так и более детальное.

Глава 3. Разработка концепции мезоскопической DR модели транспортного потока. Эта глава описывает мезоскопическую модель DRTRM для моделирования транспортных потоков, рассматриваемую как расширение подхода имитационного моделирования Discrete Rate. Сформулированы и описаны два вида моделей: одна – для загруженной, другая – для незагруженной сети. Приводится математическая формализация обоих видов моделей.

Глава 4. Сравнение разработанного подхода с микромоделированием. Примеры. В главе демонстрируется использование подхода DRTRM для моделирования одиночного перекрёстка со светофорным регулированием, а также моделирования двух взаимосвязанных перекрёстков. Для кодирования обеих моделей используются программы Microsoft Excel и встроенный язык программирования VBA. Моделирование основано на искусственных данных для более наглядной демонстрации идеи применения подхода DRTRM для такого вида моделирования. Представлены результаты моделирования и ядро модели для имитационного моделирования в форме таблиц. Основная идея этих примеров – демонстрация алгоритма моделирования в деталях и валидация предлагаемого подхода.

Глава 5. Мезоскопическое моделирование городского транспортного коридора. В последней главе продемонстрирован пример моделирования городского транспортного коридора с использованием подхода DRTRM. Исследуемый транспортный коридор состоит из 10 перекрёстков, большинство из которых

регулируются светофорами. Моделирование основано на реальных данных, полученных в ходе реализации проекта исследования транспортных потоков, проводившегося в центре Риги в 2011 году. В рамках проекта также была разработана микроскопическая модель, что позволило проверить выходные данные мезоскопической модели, сопоставив их с данными микроскопической модели, уже прошедшей валидацию. Мезоскопическая модель была создана с использованием программного средства имитационного моделирования ExtendSim. Особое внимание в этой главе уделяется определению формы функции прохождения перекрёстка, используемой в предложенной модели транспортного потока.

Заключение. Представлено заключение работы, а также основные результаты и выводы по работе.

Список публикаций автора, VBA код моделей, различные вспомогательные таблицы и рисунки представлены в разделе ***Приложения***.

РЕЗЮМЕ ГЛАВ РАБОТЫ

Глава 1 (Обзор инструментов анализа транспортных потоков)

Инструменты анализа транспортных потоков – общий термин, используемый для описания ряда аналитических процедур и методик, основанных на программных средствах и поддерживающих различные аспекты анализа транспортных потоков и перемещения транспортных средств. На сегодняшний день государственными институциями, исследовательскими организациями и консультантами разработаны многочисленные методы и инструменты анализа транспортных потоков. Их можно подразделить по следующим категориям:

- **Инструменты эскизного планирования**. Методы и инструменты эскизного планирования дают общие оценки порядка величины прогнозируемого спроса на поездки в ответ на совершенствование транспортных перемещений.
- **Модели прогнозирования спроса на перемещения.** Модели прогнозирования спроса на перемещения обладают специфическими аналитическими возможностями, например, прогноз спроса на поездки и рассмотрение выбора пункта назначения, выбора режима, выбора времени суток для поездки и выбор маршрута, а также представление транспортного потока в транспортной сети.
- **Аналитические/детерминистические инструменты** (основанные на Руководстве по пропускной способности автомобильной сети (HCM)). С помощью этих инструментов можно быстро прогнозировать плотность потока, скорость передвижения, длительность задержек и время ожидания в очереди по отношению к различным элементам транспортной инфраструктуры; валидация данных инструментов производится с помощью собираемых данных, стендов для лабораторных испытаний или натурных экспериментов.
- **Инструменты оптимизации светофорного управления**. Этот тип инструментов создаётся главным образом для разработки оптимальных схем фазирования и синхронизации светофорных сигналов применительно к изолированным магистральным улицам или в целом к сети светофорного управления. Эти инструменты могут включать в себя методы расчёта пропускной способности; оптимизацию разбивки времени цикла, включая левые повороты; и планы

координации/смещения циклов светофоров по отношению друг к другу.

- **Макроскопические имитационные модели**. Макроскопические имитационные модели основаны на детерминированных соотношениях между интенсивностью, скоростью и плотностью транспортного потока. Моделирование в макроскопической модели производится на посекционной основе, а не на основе отслеживания движения отдельных транспортных средств.
- **Микроскопические имитационные модели**. Микроскопические имитационные модели моделируют движение отдельных транспортных средств, основываясь на теории следования за лидером и теории смены полосы. Обычно транспортные средства вводятся в транспортную сеть, используя статистическое распределение времени прибытия (стохастический процесс), и перемещаются через сеть через небольшие временные интервалы (например, 1 секунда или доля секунды).
- **Мезоскопические имитационные модели**. Мезоскопические имитационные модели сочетают в себе свойства как микроскопических, так и макроскопических моделей.

Поскольку в настоящей работе акцент делается на имитационном моделировании, далее в работе будут приниматься в расчёт только инструменты анализа транспортных потоков, основанные на имитационном моделировании.

Модели системы транспортных потоков можно классифицировать по различным критериям. Можно перечислить некоторые из них:

- по решению: аналитическому или полученному путем имитационного моделирования;
- по представлению процесса: динамическому или статическому;
- по шкале переменных: непрерывной или дискретной;
- по процессу: стохастическому или детерминированному;
- по подходу в аспекте изменения времени: с временным шагом или основанному на событиях; и т.д.

Однако наиболее популярная классификация, широко используемая в настоящее время, основана на уровнях детализации модели. В настоящее время различают 4 уровня моделей транспортного потока: субмикроскопические, микроскопические, макроскопические и

мезоскопические модели. Микроскопические и макроскопические модели являются классическими, и сформулировать концепцию этих моделей довольно просто. В настоящей работе приводится подробный анализ и описание этих моделей. Более детально рассмотрены мезоскопические модели, которые являются предметом исследования данной работы.

Мезоскопические модели. Мезоскопические модели на сегодняшний день не получили широкого распространения. Это связано с тем, что специалисты истолковывают термин «мезоскопическая модель» по-разному. Некоторые исследователи предполагают, что мезоскопическое моделирование должно объединять характеристики, присущие как микроскопическому, так и макроскопическому уровню. Эти исследователи придерживаются следующего определения: «Мезоскопические модели сочетают в себе свойства моделей как микроскопических, так и макроскопических. Они моделируют индивидуальные транспортные средства, однако описывают действия и взаимодействия этих транспортных средств, основываясь на агрегированных отношениях». Другое определение звучит следующим образом: «Мезоскопические модели транспортных потоков предполагают оценку макроскопических показателей на микроскопическом уровне».

Имеется целый ряд широко используемых программных средств моделирования транспортных потоков. В настоящей работе представляется подробный анализ этих инструментов моделирования. Некоторые из этих инструментов рекомендованы в качестве национальных стандартов, например, VISSIM/VISUM рекомендуется в Германии, AIMSUN – в Испании, PARAMICS – в Великобритании.
Моделирование как средство анализа транспортных потоков сегодня является ежедневным инструментом для практикующих специалистов и исследователей, работающих в соответствующей предметной области. В литературе приводятся самые различные определения и концепции мезоскопических моделей транспортного потока, и некоторые из моделей обладают чётко описанными подходами к моделированию. В настоящей работе описаны некоторые модели имитационного моделирования, которые классифицируются как мезоскопические:

CONTRAM была первой из разработанных моделей, в которой были реализованы аспекты мезоскопического моделирования. Название модели расшифровывается как “CONtinuous TRaffic Assignment Model” («Модель непрерывного распределения транспортных потоков»). Ее структура основана на сети, состоящей из отрезков и узловых точек

(link-node network), где системное поведение группы транспортных средств определяется скоростью свободного потока на соответствующем отрезке, или соотношением «скорость/поток» (speed/flow relation).

Модель ***DynaMIT*** (Dynamic Network Assignment for the Management of Information to Travellers – «Сеть с динамическим распределением для управления информацией для водителей») является программным средством динамического распределения транспортных потоков в реальном времени, обеспечивающим возможность прогнозирования транспортных потоков и управления перемещениями. Эта система разрабатывалась с 1990-х годов в Массачусетском технологическом институте для моделирования и прогнозирования результатов влияния информации о транспортных потоках, передаваемой водителям в реальном времени.

DYNASMART, FASTLANE, DTASQ. Другая идея основана на подходе, в основу которого положен принцип очередь-сервер (queue-server). Этот подход представляет дорогу как отрезок, состоящий из части, где сформировалась очередь, и части, по которой возможно свободное движение (queuing and running parts). Разделение на полосы движения обычно не моделируется. Транспортные средства моделируются индивидуально и имеют свою индивидуальную скорость. В то же время их поведение не моделируется в деталях. Транспортные средства перемещаются по проезжей части дороги со скоростью, которая определяется посредством использования макроскопической функции «скорость/плотность». К моменту достижения «разгрузочного» пункта (downstream end) сервер направляет транспортные средства на следующий участок дороги. Преимущество этого подхода связано с тем, что транспортные средства моделируются индивидуально и макроскопические соотношения «скорость/плотность» легко поддаются калибровке. Пропускная способность серверов (в узловых пунктах) является вопросом насыщенности потоков и их дисперсии (оценённых или рассчитанных). Если задействованы устройства управления светофорным регулированием, то серверы при моделировании заменяются логическими элементами с двумя состояниями (открытое/закрытое состояние), согласно соответствующему состоянию светофора (зелёный/жёлтый/красный). Здесь следует заметить, что главное преимущество этих моделей состоит в том, что транспортные средства моделируются индивидуально, при этом есть возможность получения информации о маршрутах поездки. Эта особенность отсутствует у ранее описанных моделей, поскольку в них транспортные средства так или иначе были сгруппированы.

Модель ***AMS*** расшифровывается как «анизотропное мезоскопическое моделирование» и разрабатывается на основании двух интуитивно понятных характеристиках транспортного потока:

- В любой момент времени на скорость транспортного средства влияют только транспортные средства, находящиеся впереди, включая те, которые находятся на той же полосе или на смежных полосах.
- Влияние потока транспорта, перемещающегося впереди, на транспортное средство уменьшается с увеличением расстояния.

Вышеприведенные характеристики определяют «анизотропное» свойство транспортного потока и составляют общий принцип модели AMS.

Система транспортного потока в модели ***MEZZO*** описывается диаграммой с двумя типами объектов: узлами и отрезками. Узлы представляют точку пересечения транспортных потоков, их исходный пункт и пункт назначения. Отрезки – это дороги между узлами. Отрезки являются односторонними, поэтому, если требуется смоделировать дорогу с двусторонним движением, нужно использовать два отрезка. Полосы движения в модели отдельно не представлены. Обычно узлы имеют некоторое число входящих и исходящих отрезков. Отрезки делятся на движущуюся часть и ожидающую часть. Движущаяся часть – это участок дороги, на котором транспортные средства могут свободно перемещаться. Ожидающая часть – это участок дороги, занятый транспортными средствами, стоящими в очереди.

Анализ существующих мезоскопических моделей показывает, что на сегодняшний день не существует никакого унифицированного подхода, который мог бы использоваться для решения задач исследования и анализа транспортных потоков. Имеются лишь прикладные программы, не обладающие явно выраженными преимуществами использования перед классическими методами моделирования транспортных потоков. Поэтому разработка новых методов моделирования, предназначенных для решения конкретных задач, остается необходимой. Область этих конкретных задач может быть описана: моделирование какой-либо части транспортной сети с большим количеством транспортных узлов; моделирование протяженных транспортных коридоров (с большим расстоянием между транспортными узлами); и т.д.

Глава 2 (Сравнительный анализ подходов имитационного моделирования)

Моделирование – мощный инструмент для анализа и исследования различных систем. Следует подчеркнуть универсальность этого инструмента, т.е. способность моделировать различные типы систем. Имитационное моделирование представлено пятью следующими подходами: дискретно-событийное моделирование, моделирование с применением агентов, системная динамика, гибридное моделирование и подход Discrete Rate.

Дискретно-событийное моделирование (ДСМ) – парадигма, реализуемая в большинстве программных средств (например, GPSS, Extend, Arena, Witness, Automod, FlexSim, Plant Simulation). Этот подход известен с 1960-х годов, когда он был описан Джеффри Гордоном (Geoffrey Gordon). Дискретно-событийная имитационная модель определяется тремя свойствами:

- стохастичностью – по крайней мере, некоторые из переменных являются случайными (стохастическими);
- динамичностью – переменные состояния системы изменяются во времени;
- дискретностью событий – значимые изменения в переменных состояния системы связаны с каким-либо событием, возникающим только в дискретный момент времени.

Основные принципы *агентного моделирования* были сформулированы только в 1990 году. В настоящее время в литературе существуют различные определения этого понятия. С практической точки зрения агентное моделирование можно определить как децентрализованный, индивидуально-центрический подход к созданию модели. При разработке модели, основанной на применении агентов, идентифицируют активные объекты – *агенты* (это могут быть люди, компании, проекты, предметы имущества, транспортные средства, города, животные, суда, изделия и т.д.), определяют их модель поведения (манеру вождения, реакции, память, состояния и т.д.), вводят их в определенную среду, описывают связи между агентами и средой и выполняют моделирование. В настоящее время на рынке имеется только пять программных средств, это RePast, Swarm, ASCAPE, NetLogo и AnyLogic.

Системная динамика (СД) исследует зависящее от времени поведение систем с целью описания системы и путем использования количественных и качественных моделей получение представления,

как информационная обратная связь управляет поведением системы. Кроме того, путем моделирования и оптимизации создаются робастные структуры информационной обратной связи и стратегии управления. Фактически системная динамика – это есть система дифференциальных уравнений. Вот почему системная динамика имеет дело не с каким-либо определенным объектом, а с совокупным множеством объектов, которые «перетекают» из одного накопителя в другой с интенсивностью, определяемой переменными потока. В настоящее время имеется большое количество программных продуктов, использующих подход, основанный на системной динамике. Можно перечислить следующие программные продукты, пользующиеся наибольшей популярностью: VenSim, PowerSim, iThink и AnyLogic.

Подход, основанный на *гибридном моделировании,* не является классическим, однако широко используется на протяжении последних нескольких лет. Главная его идея – комбинация различных подходов в одной модели. Благодаря моделированию различных частей системы с применением различных подходов достигается гибкость разработки и сокращается время на разработку модели. Строгих правил, предписывающих использовать какие-либо конкретные подходы для их комбинирования, не существует – это дело самого разработчика модели. Единственным ограничением в этом случае являются специфические особенности используемого программного обеспечения. Наиболее широко известным программным обеспечением, позволяющим создавать гибридные модели, является AnyLogic.

Концепцию *Discrete Rate* можно описать фразой «планирование событий для непрерывных процессов». Этот метод обходится без представления индивидуальных объектов потока, которые воспроизводят людей, наряды на работу, товары и т.д. Единственные элементы, которые используются в модели, представляют собой соответствующее количество объектов или материалов и могут быть модифицированы с помощью математических выражений на каждом временном шаге моделирования.

Мезоскопическое моделирование отражает только дискретные изменения соответствующих непрерывных потоков. Это означает, что в течение каждого промежутка времени между изменениями потока интенсивность потока $\lambda(t)$ остается неизменной. Функцию $\lambda(t)$ можно назвать кусочно-постоянной функцией (slice constant function). На рисунке 1 представлена диаграмма входящего и исходящего потока для простого накопителя.

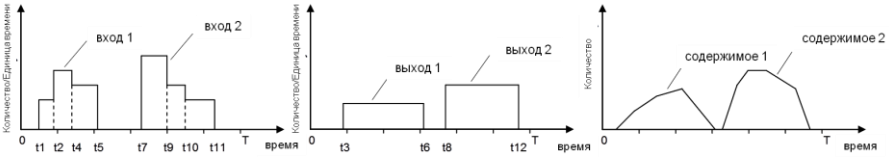


Рис. 1. *Изображения процесса в подходе Discrete Rate*

На диаграмме справа представлено содержимое накопителя, характеризующееся входными и выходными потоками. Так как λ(t) является кусочно-постоянной функцией, графиком содержимого накопителя может быть только кусочно-линейная функция. Главными преимуществами такого представления процесса в мезоскопическом моделировании является возможность прогнозирования моментов времени (выражающееся в планировании и расчёте), когда содержимое накопителя и кумулятивной величины потока достигают заданных значений.

Для мезоскопической модели характерными являются двойные свойства:

- ее поточные процессы, характеризующиеся интенсивностью λ(t) (как в случае с моделью непрерывного типа);
- применительно к процессам в накопителе и кумулятивным величинам потоков можно планировать будущие события (как и в случае с моделями дискретных событий).

Отдельные непрерывно изменяющиеся части потока, которые будут именоваться группами продукта (batches of product), могут рассматриваться в качестве объектов. Мезоскопическая модель позволяет управлять каналом любой группы продуктов во время их прохождения через структуру модели. Здесь можно назвать главные компоненты, используемые в мезоскопической модели: источник, воронка и транспортный элемент. Для задания потока требуется исходный элемент; главным параметром этого элемента является интенсивность. Стоит отметить, что интенсивность в этом случае – не просто постоянная величина, она может изменяться в зависимости от времени. Следующий элемент – это воронка. Воронки могут подразделяться на два класса: одноканальные и многоканальные. Такое разделение позволяет моделировать системы с множеством продуктов. Принцип воронки представлен на рисунке 2.

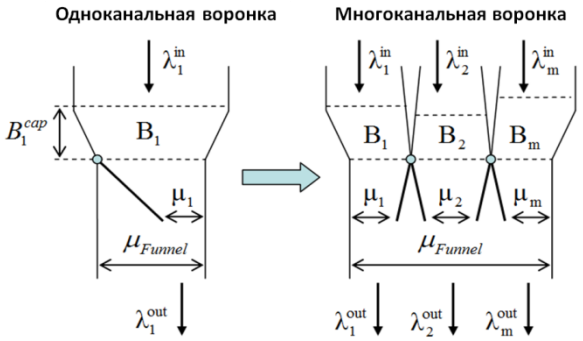


Рис. 2. *Одноканальная и многоканальная воронка*

Обозначения для одноканальных и многоканальных воронок являются одинаковыми:

λ_i^{in} – входное значение для канала i;

B_i^{cap} – вместимость канала i;

B_{funnel}^{cap} – вместимость воронки;

B_i – текущий уровень накопления для канала i;

μ_i – интенсивность обработки для канала i;

μ_{funnel} – интенсивность обработки воронки;

λ_i^{out} – выходной поток из канала i.

Определяются следующие ограничения:

$$B_i \le B_i^{cap}, \sum B_i^{cap} \le B_{funnel}^{cap},$$
$$\lambda_i^{out} \le \mu_i, \sum \mu_i \le \mu_{funnel}.$$

Выходной поток можно рассчитать с помощью следующего выражения:

$$\lambda_i^{out} = \begin{cases} 0, \lambda_i^{in} = 0 \text{ and } B_i = 0 \\ \lambda_i^{in}, \lambda_i^{in} > 0 \; and \; \lambda_i^{in} \le \mu_i \text{ and } B_i = 0 \\ \mu_i, B_i > 0 \end{cases}$$

Уровень запаса воронки для продукта в канале можно рассчитать, используя следующее выражение:

$$B_i(t + \Delta t_j) = B_i(t) + \left(\lambda_i^{in}(t) - \lambda_i^{out}(t)\right) \cdot \Delta t_j.$$

Следует заметить, что такие параметры, как λ_i^{in} и μ_i, могут изменяться каждый момент времени $t_j = t_{j-1} + \Delta t_j$. Это означает, что

эти параметры имеют временную зависимость и могут быть переписаны следующим образом: $\lambda_i^{in}(t)$ и $\mu_i(t)$.

Величина шага Δt может быть фиксированной или переменной. Тип шага, который следует использовать в модели, зависит от типа моделируемой системы и от процессов, протекающих внутри моделируемой системы. В обоих случаях важным аспектом является планирование событий. На рисунке 3 представлен пример планирования событий для непрерывных процессов в воронке. Предполагается, что оба события (событие 1 и событие 2) не зависят от текущего состояния системы.

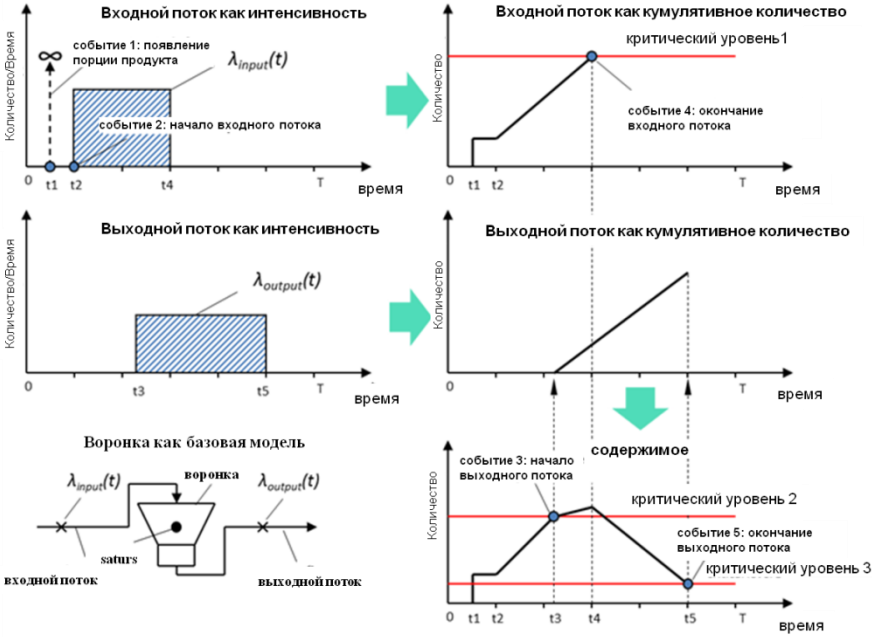


Рис. 3. *Планирование событий для непрерывного процесса*

Для всех остальных событий определяются конкретные условия:

- Событие 3: Выходной поток воронки может начать движение, только когда его уровень накопления достигает критического уровня 2.
- Событие 4: Входной поток воронки заканчивается, когда общее количество продуктов в потоке достигло критического уровня 1.
- Событие 5: Выходной поток воронки заканчивается, когда его уровень накопления достиг критического уровня 3.

Времена t3, t4 и t5 можно точно рассчитать и ввести их в цепь будущих событий. В конечном итоге в рамках переменного временного интервала Δt обрабатываться должны только пять событий. С точки зрения эффективности, преимущество этого типа изменения времени над шагом с фиксированным временем Δt очевидно. Для мезоскопического моделирования можно выбрать два возможных типа шага времени: шаг с фиксированным временем (fixed time step) и шаг с переменным временем (variable time step). Использование шага с переменным временем придает модели больше гибкости, что в итоге позволяет получить более точный выходной результат, с одной стороны, с другой стороны – шаг с фиксированным временем проще реализовать в виде программы. На рис. 4 представлены основные различия между обоими случаями: применение шага с фиксированным временем и использование шага с переменным временем.

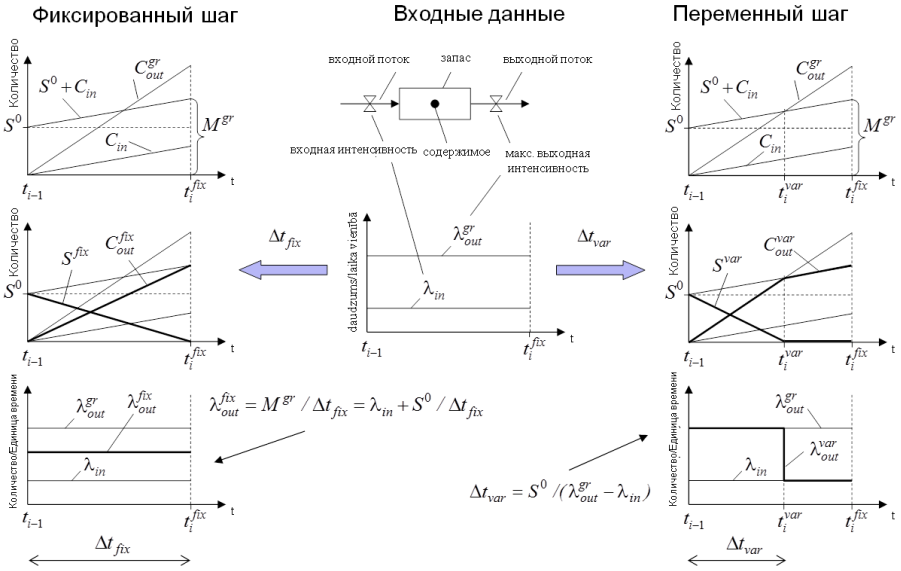


***Рис. 4**. Мезоскопическое моделирование с использованием шага с фиксированным временем и шага с переменным временем*

Главной особенностью мезоскопического моделирования является то, что все значения интенсивности потоков λ(t) внутри каждого шага Δt для момента времени t остаются постоянными. В то же время величине шага Δt можно придать постоянное значение, или ее можно рассчитать для каждого нового шага. Эта ситуация будет описана ниже, основываясь на простом накопителе (рис. 4).

Предполагается, что текущее время процесса равно t_{i-1}. Даются следующие значения:

- уровень запаса $S(t_{i-1})$ во время t_{i-1}, равен S^0;
- шаг с фиксированным временем Δt_{fix} ;
- постоянная интенсивность входного потока λ_{in};
- максимальное значение интенсивности выходного потока λ_{out}^{gr}.

В случае использования шага с фиксированным временем следующий момент времени определяется по формуле:

$$t_i^{fix} = t_{i-1} + \Delta t_{fix} \quad (1)$$

Если выходной поток накопителя не будет принят в расчёт, то уровень накопления применительно ко времени t_i^{fix} будет равен:

$$S(t_i^{fix}) = S^0 + C_{in}(t_i^{fix}) = S^0 + \lambda_{in}\Delta t_{fix} = M^{gr} \quad (2)$$

Если максимальное значение интенсивности выходного потока λ_{out}^{gr} настолько мало, что выполняется нижеследующее условие:

$$C_{out}^{gr}(t_i^{fix}) = \lambda_{out}^{gr}\Delta t_{fix} \le M^{gr}, \quad (3)$$

то реальная интенсивность выходного потока λ_{out}^{fix} внутри всех интервалов будет равна Δt_{fix}. Далее будет описан случай, когда условие 3 не соблюдается. Это означает, что уровень накопления может быть уменьшен до 0, пока не будет достигнут момент t_i^{fix}. В этом случае интенсивность выходного потока λ_{out}^{fix} не может составлять λ_{out}^{gr} внутри временного интервала Δt_{fix}, так как это приведет к отрицательным значениям уровня запаса в момент t_i^{fix}.

На рисунке 4 представлены следующие два случая:

- Следующий момент времени для процесса t_i^{fix} определяется шагом с фиксированным временем Δt_{fix};
- Следующий временной шаг процесса Δt_{var} определяется моментом времени Δt_{fix}, когда возникнет событие (уровень накопления достигнет 0).

Для фиксированного шага Δt_{fix} внутри временного интервала, никакие изменения в потоках не могут быть отражены. Предполагается, что в конце временного интервала Δt_{fix} суммарный объем выходного потока составит M^{gr}. Это означает, что можно определить фиксированную интенсивность λ_{out}^{fix} с помощью следующего выражения:

$$\lambda_{out}^{fix}\Delta t_{fix} = M^{gr} \quad (4)$$

Из выражений 3 и 4 следует:

$$\lambda_{out}^{fix} = \frac{M^{gr}}{\Delta t_{fix}} = \frac{\left(S^0 + \lambda_{in}\Delta t_{fix}\right)}{\Delta t_{fix}} = \lambda_{in} + S^0/\Delta t_{fix} \quad (5)$$

Постоянная интенсивность λ_{out}^{fix} также означает, что уровень запаса $S^{fix}(t)$ внутри интервала будет равномерно (линейно) уменьшаться до 0. В этом случае нельзя определить реальный момент t_i^{var}, когда запас достигнет нуля.

С другой стороны, моделирование с помощью шага с переменным временем Δt_{var} основано на предварительных расчётах моментов времени t_i^{var}, тогда определенные условия являются верными. В приводимом примере такими условиями являются:

$$S^0 + \lambda_{in}\Delta t_{var} = \lambda_{out}^{gr}\Delta t_{var} \quad (6)$$

Из выражения 6 следует:

$$\Delta t_{var} = S^0/\left(\lambda_{out}^{gr} - \lambda_{in}\right) \quad (7)$$

и

$$\mathrm{t}_i^{var} = t_{i-1} + \Delta t_{var} \quad (8)$$

Таким образом, используя моделирование с помощью шага с переменным временем, были созданы два временных интервала (t_{i-1}, t_i^{var}) и $\left(t_i^{var}, t_i^{fix}\right)$. Во время первого интервала реальная интенсивность λ_{out}^{var} равна максимальному значению λ_{out}^{gr}, однако во время второго интервала она равняется λ_{in}. Уровень запаса в конце первого интервала уменьшается до 0 и остается на этом уровне в течение всего интервала $\left(t_i^{var}, t_i^{fix}\right)$.

Все вышеописанные подходы моделирования можно подразделить на группы в зависимости от уровня детализации. Дискретно-событийное моделирование и моделирование на основе агентов в основном используются на микроскопическом уровне. Системная динамика применяется на макроскопическом уровне. Из рисунка 5 можно видеть, что использование макроскопического подхода зачастую связано с такой операцией, как агрегирование данных; вот почему конечные результаты часто не отличаются особой точностью и имеют агрегированный характер. Применение микроскопических подходов связано с операцией декомпозиции

данных. Вследствие этого построение модели и экспериментирование с ней являются длительным процессом.

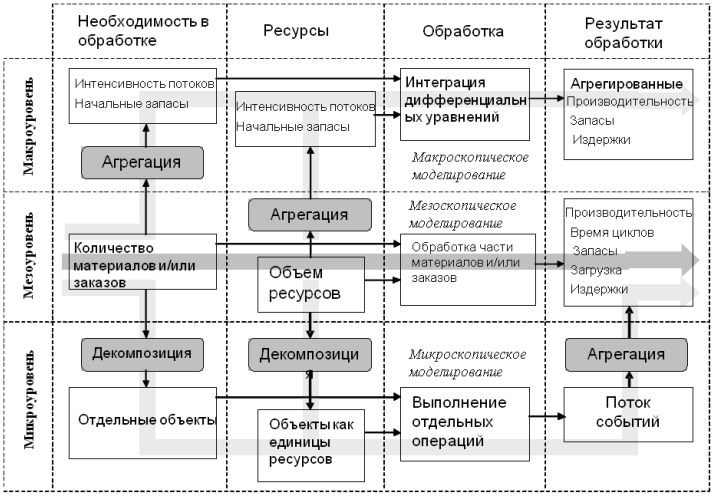


Рис. 5. *Отношения между уровнями*

Глава 3 (Разработка концепции мезоскопической DR модели транспортного потока)

Как упоминалось выше, мезоскопические принципы в основном используются для моделирования логистических систем. Вот почему мезоскопический подход формулируется главным образом применительно к потоковым логистическим системам. Цель данной главы усовершенствовать подход DR и трансформировать его для задачи моделирования транспортных потоков. Моделирование транспортных потоков – весьма специфическая область, что объясняется существующим различием между процессами, характерными для транспортного потока, и процессами, характерными для логистических систем. В главе сформулированы две математические модели: первая предназначена для незагруженной сети, вторая для загруженной сети. Обобщая, можно сказать, что модель для загруженной сети должна рассматриваться тогда, когда в расчёт принимаются возможные очереди в транспортной системе.

А. Незагруженная сеть. Рассмотрим транспортную сеть, состоящую из двух перекрёстков со светофорным регулированием, соединённых дорогой. На рисунке 6 представлен пример такой сети с обозначениями, используемыми для описания математической

модели. Как видно из рисунка 6, внутри транспортной системы имеется некоторое число входящих потоков, поступающих с различных направлений, обозначенных $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$. В то же время значения интенсивности исходящих потоков обозначены $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$. По сравнению с логистическими системами, здесь наблюдается весьма сложное взаимодействие между потоками. Это взаимодействие обусловлено разветвлением входящих потоков по различным направлениям, и в то же время для определения очерёдности потоков должен быть использован механизм управления. Взаимодействия потоков описаны на рисунке 7, который является более детальным представлением рисунка 6.

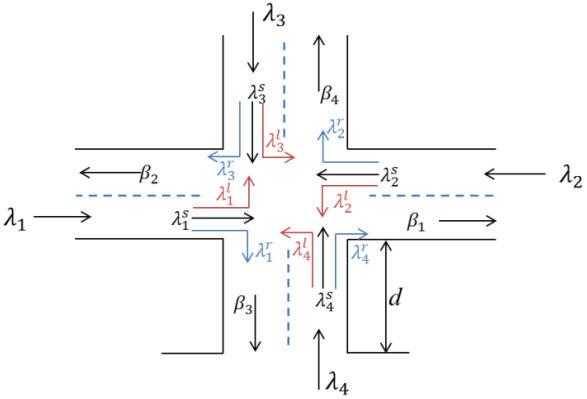


Рис. 6. *Пример транспортной сети*

Транспортная сеть (рис. 6) может также быть представлена, согласно нотации DR, с воронками и элементом транспортировки, как показано на рисунке 7. Как видно из рисунка, описывается транспортная сеть, использующая 5 воронок и 1 элемент транспортировки. Можно привести следующее описание используемых обозначений:

λ_i – интенсивность входного потока, поступающего с направления *i=1..5* (используемые единицы: PCU (passenger car unit – единица пассажирского транспорта) на единицу времени);

$\lambda_i^l, \lambda_i^s, \lambda_i^r$ – интенсивность потока на поворотах (*l – налево; s – прямо; r – направо*) с направления *i=1..5* (используемые единицы: PCU на единицу времени);

b_i^l, b_i^s, b_i^r – длина очереди на поворотах (*l – налево; s – прямо; r – направо*) с направления *i=1..5* (используемые единицы: PCU);

μ_i^l, μ_i^s, μ_i^r– пропускная способность на поворотах (*l – налево; s – прямо; r – направо*) с направления *i=1..5* (используемые единицы: PCU на единицу времени);

β_i^l, β_i^s, β_i^r– интенсивность исходящего потока на поворотах (*l – налево; s – прямо; r – направо*) с направления *i=1..5* (используемые единицы: PCU на единицу времени);

β_i – общий исходящий поток в направлении *i=1..5* (используемые единицы: PCU на единицу времени);

B_5^{cap} – максимальное значение длины очереди для направления 5 (используемые единицы: PCU).

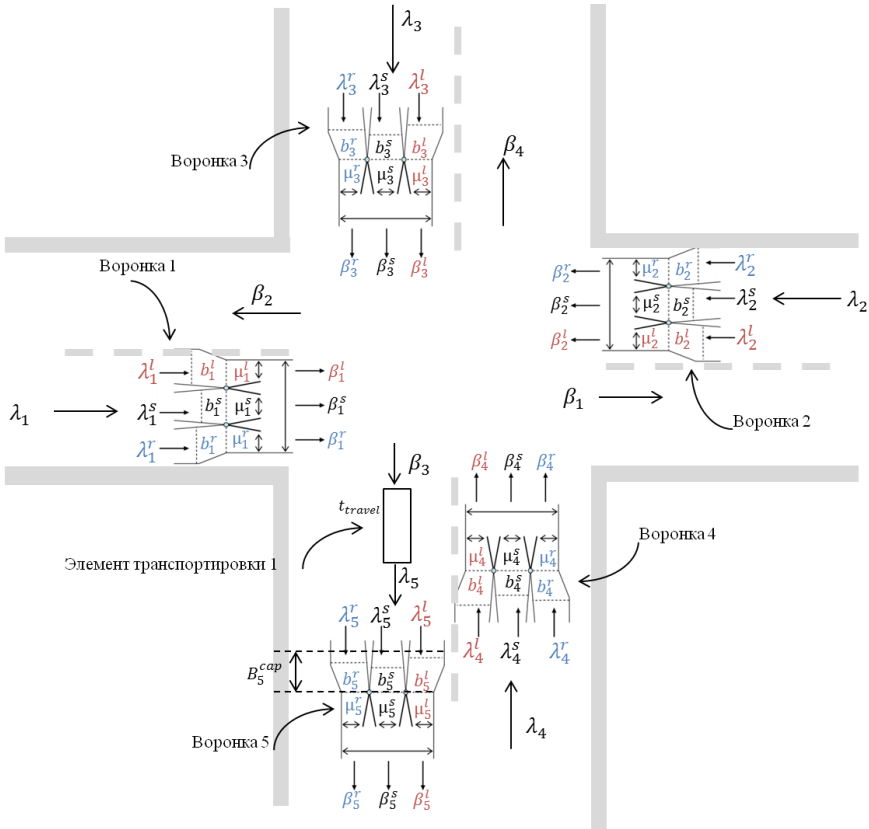


Рис. 7. *Транспортная сеть в нотации Discrete Rate*

Можно написать следующие выражения, определяющие интенсивность потока по направлению и по поворотам:

$$\begin{cases} \lambda_i^r(t) = \lambda_i(t) p_i^r \\ \lambda_i^s(t) = \lambda_i(t) p_i^s \\ \lambda_i^l(t) = \lambda_i(t) p_i^l \\ p_i^r + p_i^s + p_i^l = 1 \end{cases} \quad (9)$$

где p_i^r, p_i^s, p_i^l – вероятность поворота (l – *налево;* s – *прямо;* r – *направо*) с направления i=*1..5;*

t – текущее время.

$$\begin{cases} \beta_1(t) = \beta_1^s(t) + \beta_4^r(t) + \beta_3^l(t) \\ \beta_2(t) = \beta_2^s(t) + \beta_3^r(t) + \beta_4^l(t) \\ \beta_3(t) = \beta_3^s(t) + \beta_1^r(t) + \beta_2^l(t) \\ \beta_4(t) = \beta_4^s(t) + \beta_1^r(t) + \beta_2^l(t) \\ \beta_5(t) = \beta_5^s(t) + \beta_5^r(t) + \beta_5^l(t) \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \mu_i^r(t) = f_i^r(\Delta t(t)) \\ \mu_i^s(t) = f_i^s(\Delta t(t)) \end{cases} \quad (11)$$

где $\Delta t(t)$ – временной шаг на момент времени t (в данном примере равный продолжительности зелёной фазы, для упрощения t_{green} является одинаковым для всех направлений и всех перекрестков;

$f_i^n()$ – функция прохождения, определяющая пропускную способность с направления i=*1..5* и поворота $n \in (l, s, r)$.

Форма вышеприведённой функции может быть установлена эмпирическим путём в процессе наблюдений за реальным транспортным потоком, эта задача была решена в главе 5.

$$\beta_{i\in(1,2,4,5)}^s(t) = \begin{cases} 0,\ \lambda_i^s(t) = 0\ and\ b_i^s(t) = 0 \\ \lambda_i^s(t), \lambda_i^s(t) > 0\ and\ \lambda_i^s(t) \le \mu_i^s\ and\ b_i^s(t) = 0 \\ \mu_i^s, b_i^s(t) > 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$\beta_{i\in(2,3,4,5)}^r(t) = \begin{cases} 0,\ \lambda_i^r(t) = 0\ and\ b_i^r(t) = 0 \\ \lambda_i^r(t), \lambda_i^r(t) > 0\ and\ \lambda_i^r(t) \le \mu_i^r\ and\ b_i^r(t) = 0 \\ \mu_i^r, b_i^r(t) > 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \mu_1^l = f_1^l\left(t_{green} - f_2^{s^{-1}}\left(\beta_2^s(t)\right)\right) + h \\ \mu_2^l = f_2^l\left(t_{green} - f_1^{s^{-1}}\left(\beta_1^s(t)\right)\right) + h \\ \mu_3^l = f_3^l\left(t_{green} - f_4^{s^{-1}}\left(\beta_4^s(t)\right)\right) + h \\ \mu_5^l = f_5^l(t_{green}) + h \end{cases} \quad (14)$$

где h – дополнительная пропускная способность, объясняемая пересечением перекрёстка в течение жёлтого сигнала светофора;

$f_i^{n-1}()$ – обратная функция, определяющая время, необходимое для проезда перекрестка заданным числом транспортных средств.

$$\beta_{i\in(1,3,5)}^{l}(t) = \begin{cases} 0,\ \lambda_i^l(t) = 0\ and\ b_i^l(t) = 0 \\ \lambda_i^l(t), \lambda_i^l(t) > 0\ and\ \lambda_i^l(t) \le \mu_i^l\ and\ b_i^l(t) = 0 \\ \mu_i^l, b_i^l(t) > 0 \end{cases} \quad (15)$$

$$\Delta b_5(t) = B_5^{cap} - b_5^r(t)\ - b_5^s(t)\ - b_5^l(t) \quad (16)$$

$$\beta_1^r(t) = \\ = \begin{cases} 0,\ \lambda_1^r(t) = 0\ and\ b_1^r(t) = 0 \\ \lambda_1^r(t), \lambda_1^r(t) > 0\ and\ \lambda_1^r(t) \le \mu_1^r\ and\ b_1^r(t) = 0\ and\ \lambda_1^r(t) \le \Delta b_5(t) \\ \mu_1^r, b_1^r(t) = 0,\ \mu_1^r \le \Delta b_5 \\ \Delta b_5\ , b_1^r(t) = 0 \end{cases} \quad (17)$$

$$\beta_3^s(t) = \\ = \begin{cases} 0,\ \lambda_3^s(t) = 0\ and\ b_3^s(t) = 0 \\ \lambda_3^s(t),\ \lambda_3^s(t) > 0\ and\ \lambda_3^s(t) \le \mu_3^s\ and\ b_3^s(t) = 0\ and\ \lambda_3^s(t) \le \Delta b_5(t) \\ \mu_3^s, b_3^s(t) = 0, \mu_3^s \le \Delta b_5 \\ \Delta b_5\ , b_3^s(t) = 0 \end{cases} \quad (18)$$

$$\mu_2^l = f_2^l\left(t_{green} - f_1^{r\,-1}\left(\beta_1^r(t)\right)\right) + h \quad (19)$$

$$\beta_2^l(t) = \\ = \begin{cases} 0,\ \lambda_2^l(t) = 0\ and\ b_2^l(t) = 0 \\ \lambda_2^l(t),\ \lambda_2^l(t) > 0\ and\ \lambda_2^l(t) \le \mu_2^l\ and\ b_1^r(t) = 0\ and\ \lambda_2^l(t) \le \Delta b_5(t) \\ \mu_2^l, b_2^l(t) = 0, \mu_2^l \le \Delta b_5 \\ \Delta b_5\ , b_2^l(t) = 0 \end{cases} \quad (20)$$

Б. Загруженная сеть. Вторая модель, необходима для моделирования транспортных потоков в загруженной сети. В целом модель базируется на ранее описанной модели, но учитывает длину пути между перекрёстками, интенсивность роста очереди и время проезда между перекрёстками. Чтобы учесть эти факторы, модель загруженной сети должна быть усовершенствована следующим путём (рисунок 8).

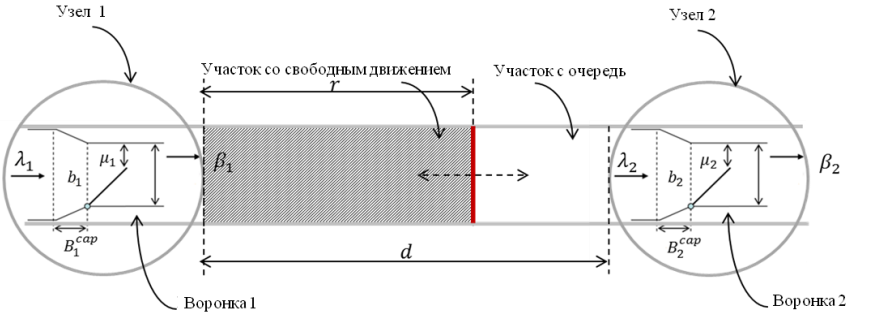


Рис. 8. *Модель загруженной сети*

Описание обозначений:
d – расстояние между перекрестками (измеряется в PCU);
r – длина движущейся части дороги (измеряется в PCU);
d-r – длина ожидающей части дороги (измеряется в PCU);
λ_1 – интенсивность входного потока для воронки 1 (измеряется в PCU в единицу времени);
λ_2 – интенсивность входного потока для воронки 2 (измеряется в PCU в единицу времени);
$B_1^{cap} = \infty$ – максимальная длина для воронки 1 (измеряется в PCU);
$B_2^{cap} = d$ – максимальная длина очереди для воронки 2 (измеряется в PCU);
b_1 – длина очереди для воронки 1 (измеряется в PCU);
b_2 – длина очереди для воронки 2 (измеряется в PCU);
μ_1 – пропускная способность для воронки 1 (измеряется в PCU в единицу времени);
μ_2 – пропускная способность воронки 2 (измеряется в PCU в единицу времени);
β_1 – интенсивность выходящего потока для воронки 1 (измеряется в PCU в единицу времени);
β_2 – интенсивность выходящего потока для воронки 2 (измеряется в PCU в единицу времени).

Нет необходимости описывать способ обработки потока, проходящего через воронки, так как он был описан в предыдущем подразделе. Поэтому делается акцент на механизм, позволяющий моделировать загруженную сеть. Основная проблема предыдущей модели – отсутствие учёта роста очереди транспортных средств и заполнение части дороги. Вот почему в этой модели предлагается следующий механизм. Путь между перекрёстками (назовём его «отрезком») делится на две части: движущуюся и ожидающую часть.

Деление на две части динамично, это значит, что при моделировании движущаяся часть может увеличиваться или уменьшаться в зависимости от ожидающей части. Длина ожидающей части равна длине очереди воронки 2. Это можно записать как:

$$r(t) = d - b_2(t) \tag{21}$$

Движущаяся часть отрезка используется для движения. Время перемещения, может быть вычислено с применением одной из хорошо известных в транспортном моделировании функций (VDF), пример которой представлен ниже:

$$\begin{cases} t_{cur} = t_0(1 + a \cdot sat^b), if\ sat < sat_{crit} \\ t_{cur} = t_0(1 + a \cdot sat^b) + (q - q_{max})d, if\ sat \geq sat_{crit} \end{cases}$$
$$sat = \frac{q}{q_{max}c} \tag{22}$$
$$sat_{crit} = 1$$

где t_0 – время проезда пути в свободном потоке (измеряется в единицах времени);

q – объём транспортного потока в движущейся части пути (измеряется в PCU);

$q_{max} = r$ – пропускная способность отрезка (измеряется в PCU);

t_{cur}– время проезда в загруженной сети (измеряется в единицах времени);

a, b, c, d – параметры VDF.

Время проезда в свободном потоке t_0 может быть определено следующим выражением:

$$t_0 = \frac{r}{v},$$

где v – разрешённая скорость на отрезке.

Глава 4 (Сравнение разработанного подхода с микромоделированием. Примеры)

Цель примеров, представленных в этой главе, показать, что транспортная модель может быть разработана на базе DRTRM. Также одной из основных задач является валидация выходов модели с применением статистических методов (классические статистические тесты, Naive тест, Novel test и т.д.).

Пример 1: Моделирование перекрестка

Моделируемым объектом является симметричный перекрёсток со светофорным управлением. Транспортные потоки создаются в

источниках 1 – 4. Они могут проходить перекрёсток, используя следующие направления: правое (r), прямое (s) и левое (l). Два противоположных источника в то же время имеют зелёную фазу. В течение этого времени два остальных источника имеют красную фазу. Это значит, что они не препятствуют один другому. Задача моделирования – оценить динамику всех очередей. Заданы транспортные потоки и продолжительность каждой фазы светофора.

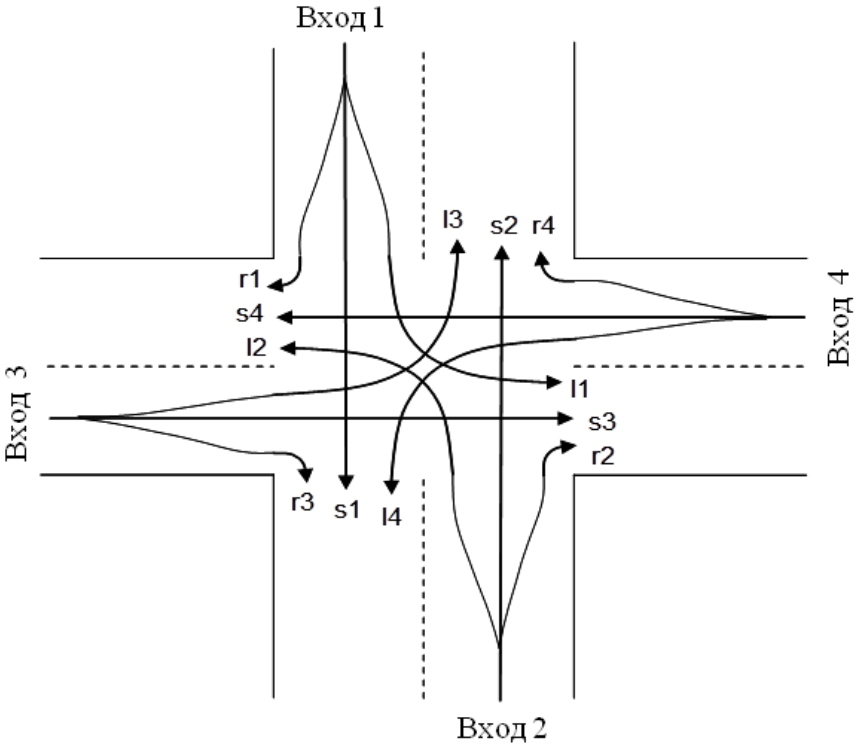


Рис. 9. *Концептуальная модель перекрёстка*

Для определения всех 12 входных потоков используются случайные величины. Функция (рис. 10) применяется для создания более реалистичного процесса проезда перекрёстка. Функция в данном примере используется для всех направлений. Эта функция применена в модели как прямая и обратная функция. Рисунок 10 показывает, что в течение первых 25.5 секунд цикла светофора транспортный поток длинной *q1*=122 м может пересечь перекрёсток, а в течение первых 32.5 секунд – поток длинной *q2*=185 м.

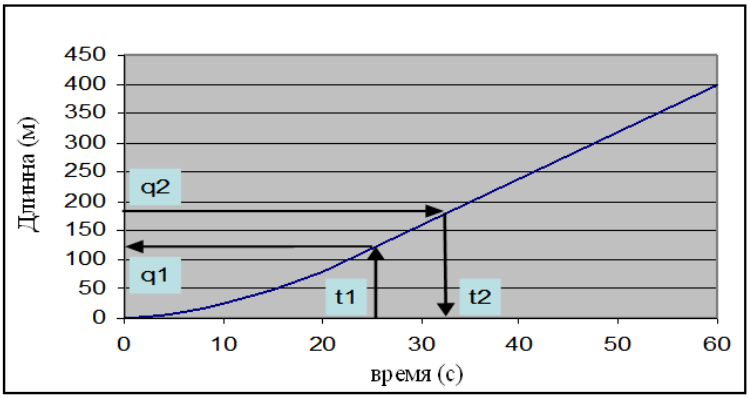


Рис. 10. *Динамика транспортного потока при пересечении перекрёстка*

Структура модели перекрёстка представлена на рисунке 11. Модель состоит из четырёх автономных компонентов, поскольку не существует прямых соотношений между транспортными потоками из четырёх направлений. Каждая компонента имеет три параллельных канала. Каналы генерируют, замедляют и пропускают транспортные потоки. Замедление и пропускание осуществляются многоканальными воронками. Содержимое каждого канала каждой воронки численно равно длине очереди. Контрольный компонент модели определяет количество транспортных средств, которые могут пересечь перекрёсток для каждого светофорного цикла.

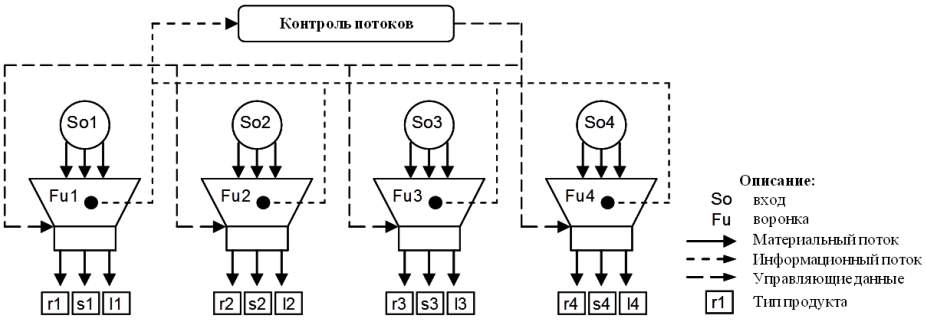


Рис. 11. *Структура мезоскопической модели*

Собственно модель была разработана в Microsoft Excel 2003 с применением Visual Basic for Application (VBA). Выбор средств разработки предполагает использование внутренних табличных

расчётов, встроенного языка программирования и внутренних средств визуализации в виде графов.

Таблица 1 представляет результаты 20 циклов моделирования. Ячейки “input (sum)” и “output (sum)” показывают общие величины длин входов и выходов воронок. Данные в ячейке “queue (maximum)” представляют максимальные длины очередей в течение выполнения модели. Длины очередей меняются в течение цикла светофора.

Таблица 1. Выходные данные мезоскопической модели

Cycle number:	20 of 20			Time (s):	1000						
Funnel 1											
input (sum)				output (sum)				queue (maximum)			
right	straight	left	total	right	straight	left	total	right	straight	left	total
330.9	1115.9	187.5	1634.3	335.9	1108.4	188.2	1632.5	12.6	69.3	18.1	96.3
Funnel 2											
input (sum)				output (sum)				queue (maximum)			
right	straight	left	total	right	straight	left	total	right	straight	left	total
352.4	1117.0	161.6	1630.9	357.4	1127.0	159.3	1643.7	15.4	50.4	15.2	72.1
Funnel 3											
input (sum)				output (sum)				queue (maximum)			
right	straight	left	total	right	straight	left	total	right	straight	left	total
275.1	886.8	159.9	1321.8	280.1	896.8	164.9	1341.8	10.9	34.5	12.8	54.9
Funnel 4											
input (sum)				output (sum)				queue (maximum)			
right	straight	left	total	right	straight	left	total	right	straight	left	total
345.4	1173.1	186.2	1704.8	350.4	1183.1	191.2	1724.8	16.8	54.6	15.1	86.4

Динамика всех 4-х очередей может быть также представлена на рисунке 12.

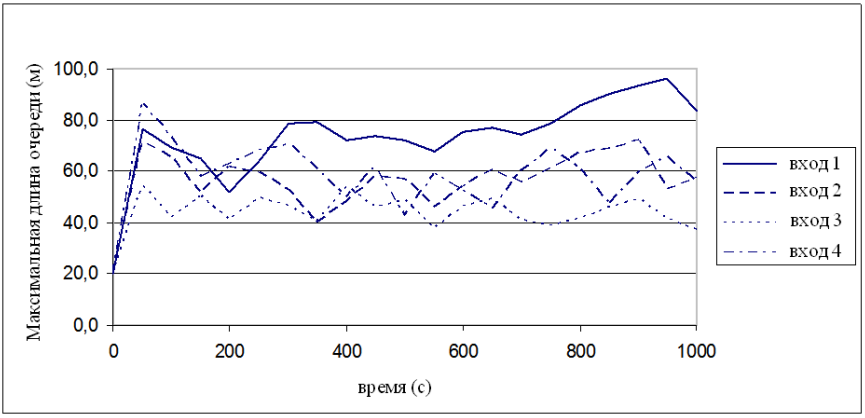


Рис. 12. *Динамика очередей входных потоков*

Пример 2: Моделирование двух связанных перекрёстков

Объектом моделирования является фрагмент транспортной сети. Концептуальная модель представлена на рисунке 13.

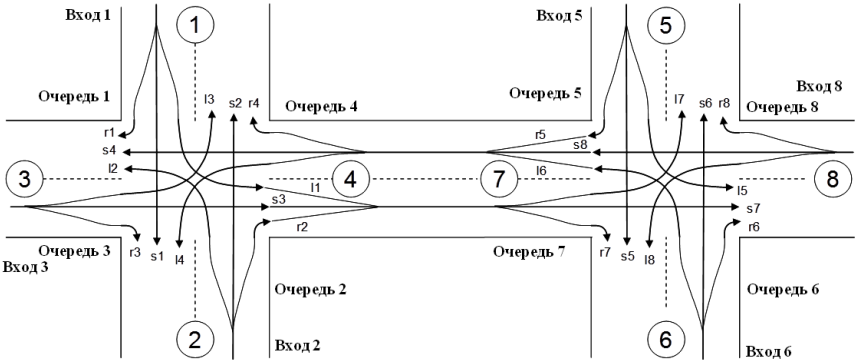


Рис. 13. *Концептуальная модель фрагмента транспортной сети*

Фрагмент состоит из двух симметричных оборудованных светофорами перекрёстков, связанных дорогой, которая является частью модели. Транспортный поток входит в сеть через 6 зон, пронумерованных как 1, 2, 3, 5, 6 и 8. Каждый входящий поток делится на три направления движения: правое (*r*), прямое (*s*) и левое (*l*). Геометрия перекрёстков построена так, что транспортные средства, входящие в сеть из одной зоны и относящиеся к одному направлению *r*, *s* и *l*, могут достигать и проезжать перекрёсток независимо от других направлений. Только транспортные средства, поворачивающие налево (поток *l*), зависят от потока *s*, который проходит перекрёсток в прямом противоположном направлении в течение зелёной фазы светофора.

Все конструкции модели такие же, как в первом примере с учётом наличия двух перекрёстков и дороги между ними. Для валидации разработанной мезоскопической модели используется микроскопическая модель. В соответствии с концептуальной моделью (рис. 13), микроскопическая модель перекрёстков была разработана с помощью профессионального программного обеспечения PTV VISION VISSIM. Для проверки адекватности разработанной модели использовалась валидация на базе анимации и статистические процедуры.

Валидация на основе анимации: исходя из наблюдений за анимацией микроскопической модели, можно заключить, что мезоскопическая модель на качественном уровне представляет микроскопическую модель.

Сравнение динамики очередей: согласно наблюдениям за динамикой очередей, можно сделать вывод, что мезоскопическая модель на качественном уровне представляет микроскопический уровень.

Тест на однородность: Были проведены *t* тест Стьюдента и *u* тест Манна-Уитни. Поскольку для некоторых очередей выходные данные не соответствуют нормальному распределению, *t* тест не будет использован для очереди 7, очереди 6 и очереди 3, но *u* тест был использован для всех очередей. Полученные результаты доказывают, что гипотеза об однородности данных не может быть отвергнута при $\alpha=0.05$, поэтому мезоскопическая модель валидна.

Тест на основе доверительных интервалов: Результаты применения теста показывают, что нет существенной разницы в среднем между величинами, полученными из микроскопической модели и мезоскопической модели при $\alpha=0.05$.

Naive тест: Применение теста позволяет сделать вывод, что для большинства наборов данных модель валидна, кроме очереди 4 и очереди 7. Анализ причин отрицательного результата для Naive теста связан с тем, что Naive тест требует выполнения условия n.i.i.d. (Normally, Identically, and Independently Distributed – нормально, идентично, независимо распределены). Для очереди 7 условие не выполняется. Для очереди 4 стоит отметить, что величина F_{naive} очень близка к области принятия гипотезы.

Novel тест: Применение *Novel* теста к данным дает следующие результаты: для очереди 1, очереди 3, очереди 5 нулевая гипотеза не отвергается и для всех других наборов данных F_{novel} не принимается.

Принимая во внимание все полученные в ходе валидации результаты, можно составить следующую таблицу и сделать вывод, что в целом мезоскопическая модель валидна.

Таблица 2. Итоги результатов валидации

Набор данных	Качественная валидация (анимация)	Тест на однородность	Тест на основе доверительных интервалов	Naive тест	Novel тест
Очередь 1	Валидна	Валидна	Валидна	Валидна	Валидна
Очередь 2	Валидна	Валидна	Валидна	Валидна	Не валидна
Очередь 3	Валидна	Валидна	Валидна	Валидна	Валидна
Очередь 4	Валидна	Валидна	Валидна	Не валидна	Не валидна
Очередь 5	Валидна	Валидна	Валидна	Валидна	Валидна
Очередь 6	Валидна	Валидна	Валидна	Валидна	Не валидна
Очередь 7	Валидна	Валидна	Валидна	Не валидна	Не валидна
Очередь 8	Валидна	Валидна	Валидна	Верно	Не валидна

Глава 5 (Мезоскопическое моделирование городского транспортного коридора)

В этой главе показан пример применения предложенной модели DRTRM для моделирования транспортных потоков на существующем объекте с реальными данными, с учётом светофорного управления. Объектом исследования является транспортный коридор в Риге, состоящий из 10 перекрёстков. Этот транспортный коридор связывает центр города и жилые районы в городе и за городом. Протяжённость исследуемой части транспортного коридора примерно 1500 метров. Схема транспортного коридора представлена на рисунке 14.

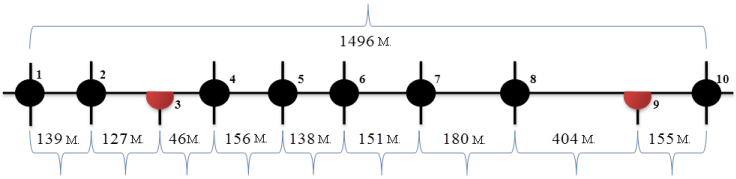


Рис. 14. *Схема транспортного коридора*

Для упрощения ссылок на перекрёстки транспортного коридора все они пронумерованы. При этом считается, что направление от центра города идёт слева направо. Основная часть перекрёстков регулируется светофорами, кроме перекрёстков 3 и 9. Данные по светофорам показывают продолжительность цикла и продолжительность каждой фазы. Интенсивность транспортного потока получена путём натурного обследования. Подсчёт интенсивности проводился по утрам в часы пик 8:00–9:00 в октябре 2010 года. В ходе подсчёта выделяли различные типы транспортных средств: велосипеды, мотоциклы, пассажирские автомобили, лёгкие грузовики, тяжёлые грузовики, автобусы, одинарные троллейбусы и сдвоенные троллейбусы. Мезоскопический подход в текущей формулировке не учитывает типы транспортных средств; поэтому все собранные данные по интенсивности были агрегированы в PCU (passenger car unit – единица пассажирского транспорта).

Общая информация о транспортном коридоре следующая:

- разрешённая скорость – 50 км/ч;
- транспортный коридор имеет две полосы движения в каждом направлении;
- все остановки общественного транспорта устроены вне основной дороги и находятся в «карманах»;

- управление светофорами создаёт зелёную волну через весь транспортный коридор.

Основная задача связана с моделированием описанного транспортного коридора и определением для каждого перекрёстка показателя LOS (level of service – уровень комфорта). Здесь необходимо отметить, что LOS вычисляется на основе средней величины задержки на перекрёстке согласно стандарту HCM.

Используя данные, собранные во время реальных наблюдений, как транспортные средства проезжают перекрёсток, можно определить форму и вид функции прохождения. Для получения формы и вида функции прохождения на основе собранных данных были построены 6 различных регрессионных моделей. Посредством анализа полученных регрессионных моделей был сделан выбор функции прохождения (выражение 23), которая затем была использована в разработанной модели.

$$q^* = -1.1479 + 0.794 t - 0.01113 t^2 + 0.00026 t^3 \qquad (23)$$

где q^* – оцениваемый объем транспортного потока;

t – время.

Для построения имитационной модели применялось программное обеспечение ExtendSim со встроенной библиотекой, которая реализует подход DR. Конечно, не все блоки библиотеки DR подходят для построения транспортной модели. Таблица 3 демонстрирует роль блоков библиотеки DR в транспортном моделировании.

Таблица 3. Основные функции блоков в транспортной модели

Блок	Название	Функция в транспортной модели
	Convey flow	Можно использовать для моделирования движения между двумя географическими пунктами (напр., двумя перекрёстками)
	Diverge	Можно использовать для моделирования разделения транспортного потока по различным направлениям (напр., левый поворот на перекрёстках, правый поворот, движение вперед)
	Merge	Можно использовать для объединения транспортных потоков
	Sensor	Можно использовать как основной источник информации для управления потоками
	Tank	Можно использовать как источник и как накопитель. А также для моделирования пропускной способности дороги
	Valve	Управление, отслеживание, пропускание транспортного потока

Иерархическая структура модели была создана при помощи приложения ExtendSim. Блоки пользовательской библиотеки создавались для упрощения процесса разработки модели: они называются “node_sig” и “node”. Эти блоки представляют перекрёстки с различной стратегией управления:

- Оборудованные светофорным управлением (node sig) – перекрёстки, управляемые светофорами с определенной длиной цикла. Эта группа включает 8 перекрёстков (номера перекрестков: 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8 и 10).
- Необорудованные светофорным управлением (node) – перекрёстки, не управляемые светофорами. Эта группа включает только 2 перекрёстка (перекрёстки: 3 и 9).

Часть модели высокого уровня представлена на рисунке 15. Пример блочной структуры для неё виден на рисунке 16.

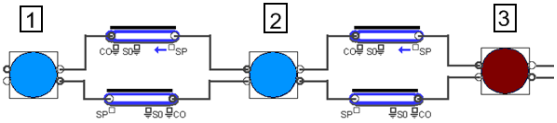


Рис. 15. *Пример разработанной модели высокого уровня*

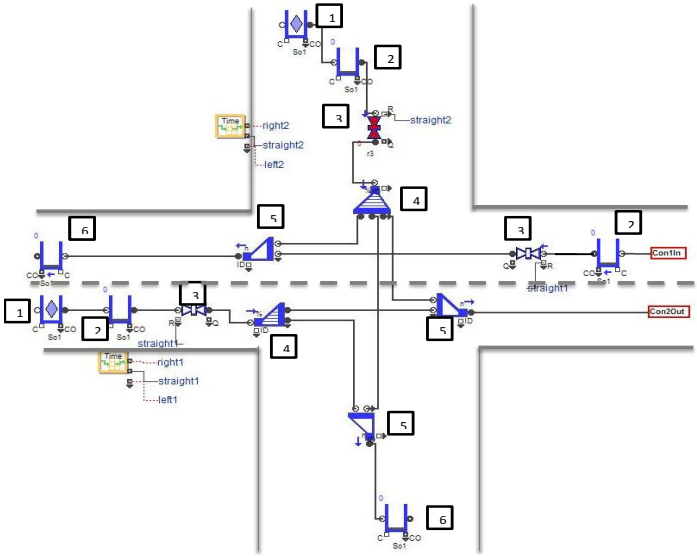


Рис. 16. *Пример внутренней структуры блока “node_sig”*

Внутренняя структура блока “node_sig” для 1-го перекрёстка состоит из 14 основных и 2-х дополнительных блоков. Дополнительные блоки требуются для моделирования работы светофоров. Основные блоки определяют поведение транспортного потока.

Результаты сравнения валидной микроскопической модели этой части транспортного коридора и разработанной мезоскопической модели представлены в таблице 4.

Таблица 4. Сравнение времени задержки и LOS

Номер перекрестка	Микромодель		Мезомодель	
	LOS	Среднее время задержки (с)	LOS	Среднее время задержки (с)
1	B	14.5	B	18.6
2	B	13.8	B	17.5
3	A	1.6	A	1.2
4	B	17.3	B	17.6
5	B	18.1	C	21.6
6	B	11.2	B	14.3
7	C	20.6	C	30.8
8	C	31.2	D	45.5
9	A	2.1	A	1.2
10	D	41.5	E	55.6

Исходя из полученных результатов, видно, что уровень комфорта (LOS) для перекрёстков в микроскопической и мезоскопической модели сравним. Конечно, следует отметить, что время задержки различается, но в большинстве случаев это не оказывает влияния на конечный показатель – уровень комфорта (LOS). Для перекрёстков 10, 8, и 5 уровень комфорта различается на один уровень, но стоит отметить, что для перекрёстка 10 и 8 разница достигает 14 секунд, а для перекрёстка 5 разница всего 3 секунды.

В целом по полученным результатам можно сказать, что разработанная мезоскопическая модель отражает реальное поведение транспортных потоков. Разницу в выходных данных можно объяснить более высоким уровнем абстракции мезоскопической модели. В то же время скорость разработки мезоскопической модели в 3 раза меньше.

В целом существенная разница во времени разработки модели связана с упрощением представления сети в мезоскопической модели. Разница между выходными данными несущественна. Главные преимущества подхода мезоскопической модели таковы: существенное снижение времени разработки модели и времени, затрачиваемого на проведение экспериментов. Детальное сравнение времени, затрачиваемого на моделирование, представлено в таблице 5.

Таблица 5. Время, затраченное на моделирование для микро- и мезоскопической модели

Разработка и эксперименты (мин)	**Микроскопическая модель**	**Мезоскопическая модель**
Моделирование транспортной сети	175	60
Моделирование светофорного управления	60	30
Реализация конфликтных участков и правил приоритета	115	60
Моделирования маршрутов движения	30	30
Определение транспортных потоков	30	60
Время, затраченное на проведение экспериментов	350	10
Общее время реализации и экспериментирования	**760**	**250**

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В рамках данной работы была разработана концепция новой мезоскопической имитационной модели транспортного потока, которая основана на подходе Discrete Rate. Возможность использования разработанной модели DRTRM была проверена при реализации моделей с искусственными и реальными данными. Данные, полученные в ходе этих экспериментов, позволяют нам сделать вывод, что предложенная концепция может быть полезным средством для транспортных планировщиков и исследователей в области анализа транспортных потоков. Были решены следующие задачи и получены следующие результаты:

1. Проведен обзор текущей и будущей роли имитационных моделей в транспортной сфере; это позволяет сделать вывод, что в будущем имитационное моделирование будет широко использоваться, так как оно является мощным и точным инструментом для анализа транспортных потоков.
2. Выполнен детальный анализ существующих средств анализа транспортных потоков и описана роль каждого из этих средств; это позволяет показать место имитационных моделей среди различного рода инструментов анализа транспортных потоков; показано, что традиционные методы имитационного моделирования основываются на так называемых микроскопическом и макроскопическом подходах, каждый из которых характеризуется наличием определённых неустранимых недостатков.
3. Установлено, что известные попытки построения моделей, объединяющих в себе положительные качества как микроскопических, так и макроскопических моделей, ещё не привели к созданию нового, чётко определённого класса моделей, которые принято называть мезоскопическими; как правило, такие модели являются лишь произвольными комбинациями микроскопических и макроскопических моделей; проведен обзор существующих в настоящий момент мезоскопических моделей.
4. Обоснован выбор относительно новой парадигмы моделирования потоковых систем, которая называется Discrete Rate, в качестве основы для построения мезоскопических моделей транспортных систем; исследованы возможности планирования событий для кусочно-непрерывных процессов, на моделировании которых основывается подход Discrete Rate;

показано, что такое планирование событий значительно ускоряет процесс обработки мезоскопических моделей потоковых систем.

5. Сформулирована и разработана в математической форме модель DRTRM, демонстрирующая основные постулируемые идеи в предложенной новой мезоскопической имитационной модели.
6. Разработана методика построения моделей транспортных потоков на основе DRTRM; описаны примеры применения этой методики при построении как двух демонстрационных моделей сложных перекрёстков, так и модели реальной системы.
7. Проведена валидация разработанной модели, основанная на экспериментальных данных с использованием различных методов, как качественных, так и количественных. Результаты валидации показывают, что модели, разработанные с использованием DRTRM, валидны; показано, что практическая польза от применения нового класса мезоскопических моделей заключается в сокращении времени, которое требуется как на разработку моделей, так и на их обработку на компьютере.
8. Представлен пример применения предложенной концепции к реальному объекту в Риге со сравнением реальных данных, полученных в ходе исследования.

AUTORA PUBLIKĀCIJAS
PUBLICATIONS WITH AUTHOR'S PARTICIPATIONS
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА

Raksti
Scientific Papers
Статьи

1. M. Savrasovs, "Traffic Flow Simulation on Discrete Rate Approach Base", *Transport and Telecommunication*, Vol. 13, No. 2, 2012, pp. 167-173. [Citated in SCOPUS]
2. M. Savrasovs, "Urban transport corridor mesoscopic simulation", in *25th European Conference on Modelling and Simulation (ECMS'2011)*, Krakow, 2011, pp. 587-593. [Citated in SCOPUS]
3. M. Savrasovs, "The application of a discrete rate approach to traffic flow simulation," in *10th International Conference* "*Reliability and Statistics in Transportation and Communication*", Riga, 2010, pp. 433-439.
4. M. Savrasovs, "Mesoscopic simulation concept for transport corridor". *12th World Conference on Transport Research (WCTR 2010*), 2010, Lisbon, Portugal. pp.1-20.
5. M. Savrasovs, I. Yatskiv, "Development of Riga-Minsk transport corridor simulation model", *Transport and Telecommunication*, Vol. 11, No. 1, 2010, pp. 38-47. [Citated in SCOPUS]
6. I. Yatskiv, M. Savrasovs, E. Yurshevich, A. Medvedevs, "Simulation as a tool of decision support process: Latvia-based case study", in *1st International Conference on Road and Rail Infrastructure (CETRA'2010)*, Opatija, 2010, pp. 217-22.
7. I. Yatskiv, M. Savrasov and E. Yurshevich. "Use of Transport Models in the Process of Decision-Making Support", *Bulletin of State Technical University. Physics, mathematics, informatics*. 2009, pp. 98-101. (In Russian)
8. I. Yatskiv, M. Savrasovs, "Riga-Minsk transport corridor simulation model development," in *9th International Conference* "*Reliability and Statistics in Transportation and Communication*", Riga, 2009, pp. 394-403.
9. M. Savrasovs, "Overview of traffic mesoscopic models", in *2nd International Magdeburg Logistics PhD Students Workshop*, Magdeburg, 2009, pp. 71-79.

10. I. Yatskiv, E. Yurshevich, M. Savrasovs, "Practical aspects of modelling in the transport node reconstruction in Riga", in *23rd European Simulation Conference on Modelling and Simulation (ECMS'2009)*, Madrid, 2009, pp. 295-300. [Citated in SCOPUS]
11. M. Savrasovs, "Flow systems analysis: methods and approaches", *Computer Modelling and New Tehnologies*, vol. 12, no. 4, pp. 7-15, 2008.
12. M. Savrasov, E. Yurshevich and I. Yatskiv. "Transport Streams Modelling as Urban Logistic Tasks Decision-Making Support". *Proceedings of International Research Conference "Together to Efficient Traffic"*. 2008. pp. 51-56. (In Russian)
13. M. Savrasovs, J. Tolujew, "Transport system's mesoscopic model validation using simulation on microlevel". *8th International Conference* "*Reliability and Statistics in Transportation and Communication*", 2008. pp. 297-304.
14. M. Savrasovs, "Overview of flow systems investigation and analysis methods," in *8th International Conference* "*Reliability and Statistics in Transportation and Communication*", Riga, 2008, pp. 273-280.
15. Y. Tolujew, M. Savrasovs, "Mesoscopic approach to modelling a traffic system", *International Conference, Modelling of Business, Industrial and Transport Systems*, 2008. pp. 147-151.
16. M. Savrasovs, "Development of Liepaja city macroscopic model for decision-making", *Transport and Telecommunication*, vol. 8, no. 2, pp. 38-46, 2007. [Citated in SCOPUS]
17. M. Savrasovs, Y. Toluyew, "Application of Mesoscopic Modelling for Queuing Systems Research". *7th International Conference* "*Reliability and Statistics in Transportation and Communication*", Riga, 2007. pp. 94-99.
18. I. Yatskiv, E. Yurshevich, M. Savrasovs, "Investigation of Riga Transport Node Capacity on the Basis of Microscopic Simulation", in *European Simulation Conference on Modelling and Simulation (ECMS'2007)*, Prague, 2007, pp. 584-589. [Citated in SCOPUS]