

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Jeļena Pečerska

**KOMBINĒTĀ PIEEJA MATERIĀLO PLŪSMU
APSTRĀDES SISTĒMU MODELĒŠANAI**

Promocijas darba kopsavilkums

Rīga 2012

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Datorzinātnes un informācijas tehnoloģijas fakultāte
Informācijas tehnoloģijas institūts

Jeļena Pečerska

Doktora studiju programmas „Vadības informācijas
tehnoloģija” doktorante

**KOMBINĒTĀ PIEEJA MATERIĀLO PLŪSMU
APSTRĀDES SISTĒMU MODELĒŠANAI**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskā vadītāja
Dr.habil.sc., prof.
G. MERKURJEVA

Zinātniskais konsultants
Dr.habil.sc.ing., J. TOLUJEVS

RTU Izdevniecība
Rīga 2012

UDK 004.94+658.7](043.2)

Pe 096 k

Pečerska, J. Kombinētā pieeja materiālo plūsmu apstrādes sistēmu modelēšanai. Promocijas darba kopsavilkums.-R.: RTU, 2012.-36.lpp.

Iespiests saskaņā ar Informācijas tehnoloģijas institūta 2012.gada 2. marta Padomes sēdes lēmumu, protokols Nr. 12-02.



Šis darbs ir izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projekta „Atbalsts doktora studiju programmu īstenošanai” projekta „Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai” ietvaros.

ISBN 978-9934-10-365-0

PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ
INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2012.g. 3. decembrī plkst. 14³⁰ Rīgas Tehniskās universitātes Datorzinātnes un informācijas tehnoloģijas fakultātē, Meža ielā 1/3, 202. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Dr.math., profesors Kārlis Šadurskis
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Dr.sc.ing., asociētais profesors Egils Stalidzāns
Latvijas Lauksaimniecības universitāte, Latvija

Dr.habil.sc.ing., profesors Thomas Schulze
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Vācija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājusi šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Jeļena Pečerska.....(Paraksts)

Datums: 2012.g. 24. oktobris

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 4 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 8 pielikumus, 65 attēlus un 14 tabulas, kopā 128 lappuses (160 lappuses ar pielikumiem). Literatūras sarakstā ir 107 avoti.

VISPĀRĪGS DARBA RAKSTUROJUMS

Promocijas darbs ir izstrādāts imitācijas modelēšanas jomā un ir veltīts jaunas, kombinētās modelēšanas pieejas izstrādei, kas paaugstina metodes pielietojšanas efektivitāti materiālo plūsmu apstrādes sistēmu analīzei. Kombinētā modelēšanas pieeja ir svarīga loģistikas un ražošanas sistēmu pētījumos, kuras tiek interpretētas un analizētas kā diskreto notikumu sistēmas (*discrete event systems – DES*).

Tēmas aktualitāte

Materiālo plūsmu apstrādes sistēmu kā pētījuma objekta izvēles aktualitāti apstiprina statistisko radītāju, kas raksturo biznesa aktivitāšu apjomu un to pieauguma ātrumu nozarēs, kas ir tieši saistītas ar materiālo plūsmu apstrādi ražošanā, celtniecībā, transporta pakalpojumu un citās sfērās, analīze.

Pēdējos gados attīstītās valstīs tautsaimniecībā tiek novērota tendence iekļaut imitācijas modeļus, kā neatņemamu projekta sastāvdaļu, jaunu sistēmu izveidošanas un esošo sistēmu pilnveidošanas projektos ražošanas, apkalpošanas, loģistikas un transporta nozarēs [17, 24]. Šī tendence atspoguļo arī pieaugušo vadības speciālistu uzticību imitācijas modelēšanai, it īpaši stohastisko sistēmu modelēšanai, kā vienai no informācijas tehnoloģijas metodēm [6, 13 u.c.].

Par nozīmīgu un perspektīvu virzienu imitācijas modelēšanā ir uzskatāma materiālo plūsmu apstrādes sistēmu (MPAS) modelēšanas metožu attīstība. Ar materiālo plūsmu (MP) vispārējā nozīmē bieži saprot kādu dinamisku parādību, kas var aizņemt ievērojamu vietu apkārtējās pasaules parastajā trīsdimensiju telpā. MP, kā vispārīzplatīti dažādas dabas sarežģītu sistēmu elementi, nodrošina gan sistēmas elementu mijiedarbību, gan sistēmas saiti ar apkārtējo vidi, līdz ar to vairākas sarežģītas sistēmas var tikt interpretētas un analizētas kā materiālo plūsmu apstrādes sistēmas. Tādēļ praktiski visi mūsdienu imitācijas modelēšanas programmlīdzekļi piedāvā rīkus un komponentes materiālo plūsmu analīzei, aprakstīšanai, iekļaušanai imitācijas modeļos, tādu plūsmu modelēšanas rezultātu iegūšanai un vizualizācijai [23].

Mūsdienās MP parasti tiek modelētas, izmantojot tradicionālās, t.i., nepārtrauktu sistēmu vai diskreto notikumu sistēmu, modelēšanas pieejas [23]. Nepārtrauktu sistēmu modelēšanas pieejā plūsmas, tai skaitā materiālās, vienādojumos tiek modelētas kā mainīgo lielumu vērtības. Diskreto notikumu sistēmu modelēšanas paradigmā materiālās plūsmas tiek interpretētas kā atsevišķo materiālā rakstura objektu jeb diskreto objektu plūsmas.

Pēdējo gadu laikā daži autori piedāvā alternatīvas lietišķu pētījumu pieejas, kas tiek realizētas kā kombinētās pieejas [5, 35 u.c.]. Imitācijas modelēšanas publikāciju analīzes rezultātā tika konstatēts, ka pašlaik

kombinēto pieeju jomā praktiski netiek veikti teorētiskie pētījumi, kaut gan teorētiskā pamatojuma nepieciešamība netieši izpaužas imitācijas modelēšanas sistēmu specifiskajās funkcijās [7, 10].

Kombinētā modelēšanas pieeja ir spējīga paplašināt diskrešu notikumu sistēmu modelēšanas pielietojuma iespējas MPAS modelēšanas un analīzes jomā un paaugstināt modeļu izstrādes procesa efektivitāti un modelēšanas praktisko nozīmīgumu [7]. Promocijas darba tēmas aktualitāte ir saistīta ar materiālo plūsmu apstrādes sistēmu modelēšanas pieeju pilnveidošanas nepieciešamību.

Darba mērķis un uzdevumi

Diskrešu notikumu sistēmu modelēšanas pieejas ietvaros atsevišķos modelēšanas procesa posmos netiek pilnībā saskaņoti objektu plūsmu, notikumu plūsmu un operāciju detalizācijas līmeņi. Piemēram, modeļa konceptualizācijas posmā parasti ir pieejami apkopotie dati par modelējamo sistēmu. Dati par atsevišķiem ieejas plūsmas objektiem un operācijām tiek izdalīti no minētajiem datiem un detalizēti aprakstīti modeļa programmēšanas posmā; uzkrātie modelēšanas rezultāti ir pieejami kā apkopotie dati par notikumu plūsmām [1, 10, 11, 23, 29, 36, 42 u.c.].

Darba mērķis ir izstrādāt tādu materiālo plūsmu apstrādes sistēmu modelēšanas pieeju diskrešu notikumu modelēšanas pieejas ietvaros, kas ļauj pamatot:

- apkopotās pieejas pielietojumu materiālo plūsmu apstrādes sistēmu elementu aprakstīšanai;
- notikumu skaitu un ar notikumu apstrādi saistīto aprēķinu apjomu samazināšanu;
- pieejas pielietojuma rezultātā iegūto novērtējumu pareizumu, kas atbilst diskrešu notikumu sistēmu modelēšanas pieejas novērtējumiem.

Modelēšanas pieejai jābūt sistēmiskai, pietiekami vienkāršai – tai jāņem vērā esošā diskrešu notikumu sistēmu modelēšanas teorija, jābūt efektīvai un praktiski realizējamai. Pieejas pielietojuma rezultātā iegūstamajiem rezultātiem jābūt uzticamiem un pārbaudāmiem.

Promocijas darba mērķa sasniegšanai ir izvirzīti šādi uzdevumi:

1. Apskatīt un klasificēt materiālās plūsmas un to formalizācijas veidus.
2. Izpildīt materiālo plūsmu apstrādes sistēmu nozīmes analīzi ražošanā un loģistikā.
3. Veikt materiālo plūsmu apstrādes sistēmu modelēšanas paradigmu salīdzinošu pētījumu.
4. Izstrādāt materiālo plūsmu apstrādes sistēmu kombinēto modelēšanas pieeju.
5. Izstrādāt pamatkomponentes un modeļus kombinētās modelēšanas pieejas realizācijai.

Pētījuma objekts un priekšmets

Pētījuma objekts ir tādas materiālo plūsmu apstrādes sistēmas, kas var tikt formalizētas kā diskrētu notikumu sistēmas.

Pētījuma priekšmets ir materiālo plūsmu apstrādes sistēmu tradicionālās un kombinētās modelēšanas metodes, kuras ir balstītas uz diskrētiem notikumiem.

Pētījuma metodes un teorētiskais (metodoloģiskais) pamatojums

Šajā darbā teorētisko pētījumu veikšanai izmantota sistēmu teorija, diskrētā matemātika, sistēmu dinamika un diskrētu notikumu sistēmu modelēšana.

Promocijas darba izstrādātā kombinētā modeļa realizācijai izmantotas imitācijas modelēšanas un matemātiskās statistikas metodes.

Promocijas darba zinātniskā novitāte

Zinātniskā novitāte izpaužas šādi:

1. Izklāstītas tradicionālo imitācijas modelēšanas pieeju nepilnības MPAS modelēšanā
2. Noformulētas prasības MPAS kombinētās modelēšanas pieejas izstrādāšanai
3. Pamatota kombinēto modeļu matemātiskā shēma
4. Izstrādāta kombinētā MPAS modelēšanas pieeja
5. Pieejas aprobācijai realizēts MPAS kombinētais modelis

Aizstāvēšanai izvirzāmās tēzes

1. Materiālo plūsmu apstrādes sistēmu modelēšanas jaunas matemātiskās shēmas pamatojums.
2. Uz diskrētu notikumu modelēšanu balstītas kombinētās materiālo plūsmu apstrādes sistēmu modelēšanas pieejas izstrāde.
3. Materiālo plūsmu apstrādes sistēmas kombinētā modeļa priekšrocību analīze salīdzinājumā ar tradicionālo diskrētu notikumu sistēmu modelēšanas pieeju.

Publikācijas

Promocijas darba ietvaros veikto pētījumu rezultāti ir atspoguļoti 10 publikācijās starptautiskajos, Latvijas Zinātnes padomes atzītos, zinātniskajos izdevumos, t.i., [1 – 7, 9, 11, 12] no pretendentes publikāciju saraksta. Publikācijas var nosacīti sagrupēt šādi: metodiskās publikācijas [3, 6, 7, 9, 10, 14], lietojuma pētījumu rezultātu prezentācijas [4, 8, 13] un teorētiskās, kas saistītas ar jaunas modelēšanas pieejas izstrādi [1, 2, 7, 11, 12].

1. Pecherska J., Tolujew J. Development of Mesoscopic Simulation Model for Discrete Object Flow Analysis in a Logistic System// Proceedings of the 3rd International Doctoral Student Workshop on Logistics. - Magdeburga: The Otto

- von Guericke University, 2010. - 37.-41. lpp.
2. Pecherska J. Material Flow Simulation Using Discrete-Event and Mesoscopic Approach// Proceedings of UKSim 12th International Conference on Computer Modelling and Simulation. - Kembridža: CPS IEE Computer Society, 2010. - 159.-162. lpp. Indexed in: Scopus, DBLP, IEEE Xplore, EBSCO
 3. Merkuryeva G., Merkuryev Y., Bikovska J., Pecherska J., Petuhova J. Active Learning Logistics Management through Business Gaming. Proceedings of 4th International Conference on Interdisciplinarity in Education. Lietuva, Viļņa, 21.-22. maijs, 2009. – Viļņa, Lietuva: National Technical University of Athens, 2009. - 30.-36. lpp.
 4. Mihailovs F., Pečerska J. Imitation Modelling of Processes of a Coal Terminal// Proceedings of 11th International Conference „Maritime Transport and Infrastructure – 2009”. - Rīga: Latvian Council of Science, 2009. - 55.-60. lpp.
 5. Merkurjevs, J., Pečerska, J., Tolujevs, J. Simulation-Based Analysis of Logistic Systems// Institute of Economics, Latvian Academy of Sciences. Humanities and Social Sciences. Latvia. - Volume 4(57), 2008. - 27.-48. lpp.
 6. Merkurjevs J., Merkurjeva G., Pečerska J., Tolujevs J. Sistēmu imitācijas modelēšanas tehnoloģija. - Rīga: RTU, 2008. - 120 lpp.
 7. Merkuryev Y., Pecherska J. Discrete-Event Simulation: Methodology and Spreadsheet-Based Implementation// Warszawa, Przegląd Elektrotechniczny. 4'2006. - 49.-55. lpp. Indexed in: Scopus
 8. Pecherska, J. A Genetic Algorithm for Experiment Design in Simulation// Scientific Proceedings of the Riga Technical University, Information Technology and Management Science. - Riga, RTU, 2005. - 16-23. lpp.
 9. Merkuryev Y., Pecherska J. Teaching Simulation with Spreadsheets// Proceedings of 19th European Conference on Modelling and Simulation. ECMS 2005. Rīga: Ed. by Merkuryev Y., Zobel R. and Kerckhoffs E. - 2005. - 440.-445. lpp.
 10. Merkurjeva G., Pecherska J. Experiences Using Simulation-Based Case-Games In Logistics Management Studies// Scientific Proceedings of the Riga Technical University, Information Technology and Management Science. - Riga, RTU, 2004. - 122.-129. lpp.
 11. Merkuryev Y., Pecherska J. Inventory Systems Simulation on Spreadsheets// Scientific Proceedings of the Riga Technical University, Information Technology and Management Science. - Riga, RTU, 2002. - 128.-134. lpp.
 12. Merkuryev Y., Pecherska J. Monte Carlo Simulation on Spreadsheets// Scientific Proceedings of the Riga Technical University, Information Technology and Management Science. - Riga: RTU, 2001. - 150.-156. lpp.
 13. Millers(-Maleks) H., Landeghems R. V., Pečerska J. Izplatīšanas ekonomikas un loģistikas pievienotās vērtības finansiālo vajadzību novērtēšanas piemērs: Dis_EcoFin// Industriālo loģistikas sistēmu vadīšana: Praktiskās pielietošanas piemēri. - Rīga: RTU, 1999. - 145.-162. lpp.
 14. Иванов В., Меркурьев Ю., Кононов П., Печерская Е. Моделирование и идентификация объектов управления. Сборник лабораторных работ. - Рига: РПИ, 1984. - 109 с.

Ziņojumi zinātniskajās konferencēs un semināros

Par darba galvenajiem rezultātiem tika ziņots 8 starptautiskajās zinātniskajās konferencēs un semināros: RTU 42. starptautiskā zinātniskā konference (Rīga, 2001. gads); RTU 43. starptautiskā zinātniskā konference

(Rīga, 2002. g.); RTU 45. starptautiskā zinātniskā konference (Rīga, 2004. g.); International conference “European Conference of Modelling and Simulation”, ECMS 2005 (Rīga, 2005. g.); 11th International conference Maritime Transport and Infrastructure (Rīga, 2009. g.); 12th Conference of Young Scientists of Lithuania, „Science – Lithuania’s Future. TRANSPORT“. (Viļņa, Lietuva, 2009. g.); UKSim 12th International Conference on Computer Modelling and Simulation (Kembridža, Lielbritānija, 2010. g.); 3rd International Doctoral Student Workshop on Logistics (Magdeburga, Vācija, 2010. g.).

Promocijas darba struktūra

Promocijas darbs satur ievadu, 4 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 8 pielikumus, 65 attēlus un 14 tabulas, kopā 162 lappuses. Literatūras sarakstā ir 107 avoti. Promocijas darba struktūra ir šāda:

Ievads satur tēmas aktualitātes pamatojumu, darba mērķa un uzdevumu formulēšanu, pētījumu objekta, priekšmeta un izmantoto pētījumu metožu aprakstu, darba zinātniskā jaunieguvuma un praktiskās nozīmības aprakstu, kā arī darba rezultātu aprobācijas izklāstu.

Pirmajā nodaļā “***Materiālās plūsmas un materiālo plūsmu apstrādes sistēmas***” ir apskatīti un klasificēti materiālo plūsmu tipi un to formalizācijas veidi, ir izpildīta materiālo plūsmu apstrādes sistēmu nozīmes analīze ražošanā un loģistikā.

Otrajā nodaļā “***Materiālo plūsmu modelēšanas paradigmas***” ir paveikts materiālo plūsmu apstrādes sistēmu tradicionālo modelēšanas paradigmu salīdzinošs pētījums, ir matemātiski noformulēta kombinētās pieejas problēmas nostādne, un ir definēti problēmas nostādnes pieņēmumi.

Trešajā nodaļā “***Materiālo plūsmu kombinētās modelēšanas pieejas izstrāde***” ir izstrādāta materiālo plūsmu apstrādes sistēmu kombinētā modelēšanas pieeja, kas apvieno „īpašo stāvokļu principu” ar stāvokļa mainīgajiem, kurus raksturo gabaliem lineāras izmaiņas. Ir izstrādāti komponentu darbības algoritmi, atbilstošie stāvokļa mainīgo pārveidojumi un funkcionēšanas raksturojumu novērtējumu formulas, kas nodrošina kombinēto modeļu izstrādi un to pielietošanu modelējamo sistēmu analīzei.

Ceturtajā nodaļā “***Izstrādātās pieejas pielietojums materiālo plūsmu apstrādes sistēmas modelēšanai***” ir izstrādātas pamatkomponentes un modeļi kombinētās modelēšanas pieejas realizācijai. Nodaļā ir aprakstīta izstrādātās kombinētās modelēšanas pieejas aprobācija, veicot materiālo plūsmu apstrādes sistēmas – ogļu termināla – lietišķā pētījumā taktiskā plāna realizāciju.

Darba rezultāti un secinājumi

Literatūras saraksts

Pielikumi

PROMOCIJAS DARBA NODAĻU ĪSS IZKLĀSTS

Materiālās plūsmas un materiālo plūsmu apstrādes sistēmas

Pirmajā nodaļā ir veikts materiālo plūsmu (MP) jēdziena pētījums ar mērķi identificēt materiālo plūsmu kā imitācijas modelēšanas pētījumu objektu specifiskās īpašības, plūsmu aprakstos neatrisinātās problēmas un uzdevumus, kā arī vispārīgā līmenī definēt prasības materiālo plūsmu formalizēšanai materiālo plūsmu apstrādes sistēmu modelēšanas pētījumam. Nodaļā ir izvirzītas vispārīgas prasības MP aprakstam, kuram jāiekļaujas imitācijas modelēšanas metodoloģijā un ir izanalizēta materiālo plūsmu apstrādes sistēmu nozīme ražošanā un loģistikā.

Modelēšanas kontekstā speciālisti izceļ tādas materiālās plūsmas, kas visbiežāk tiek pētītas imitācijas modelēšanas projektos. Vispirms MP jēdzienu sāka lietot filozofi un fiziķi, tomēr šī promocijas darba nozarei labāk atbilst jēdziena „materiālā plūsma” interpretācija no vadības zinātnes viedokļa.

Autoru vairākums MP definīcijās iekļauj galvenās pazīmes: materiālo resursu kopumu, kustību vai cirkulāciju, noteiktu laika posmu; pakļautību dažādām operācijām vai funkcijām [42]. Kaut gan autori – ekonomisti un loģistikas speciālisti – iekļauj definīcijās laika faktoru, ir jāprecizē, ka pētījuma laika posmā var tikt izdalīti atsevišķi notikumi kā laika momenti, kad notiek materiālās plūsmas stāvokļa izmaiņas, un informācija par MP stāvokļa izmaiņu laika momentiem ir būtiska MP dinamiskās uzvedības noteikšanai.

Materiālo plūsmu un to definīciju diapazons ir ļoti plašs un ar **materiālo plūsmu** vispārējā nozīmē bieži saprot kādu **dinamisku parādību, kas var aizņemt ievērojamu vietu apkārtējās pasaules parastajā trīsdimensiju telpā**. Šai definīcijai ir ļoti vispārīgs raksturs un imitācijas modelēšanas pētījumu kontekstā materiālās plūsmas jēdzienu ir vēlams sašaurināt.

Materiālo plūsmu mākslīgās materiālās sistēmas bieži interpretē kā reāli novērojamu **materiālo objektu plūsmu**. Ar terminu „materiālie objekti” tiek domāti gan transporta-tehnoloģisko operāciju izpildīšanas līdzekļi (resursi), gan arī kustīgie objekti (kravas, pasažieri un transporta vienības). Šādā interpretācijā uzsvars tiek likts uz plūsmas objektu materiālo dabu un uz to skaidru atšķiramību, diskretumu.

Materiālās plūsmas kā modelēšanas objektu klase tiek analizētas dažādu sistēmu modelēšanas projektu ietvaros, un to efektīvu modelēšanas pieeju izstrādāšana ir svarīgs imitācijas modelēšanas uzdevums. Papildus MP vispārīgajam īpašību aprakstam var būt nepieciešams to detalizēts apraksts, piemēram, izmantojot MP klasifikācijā minētās īpašības.

Sistēmas, kas tiek analizētas kā diskretu notikumu sistēmas, raksturo

stāvokļa izmaiņu laika momenti, tai skaitā momenti, kas saistīti ar materiālajām plūsmām (to sākums, beigas, intensitātes izmaiņa un citu notikumu iestāšanās momenti). MP interpretācijā diskreto notikumu sistēmu modelēšanas kontekstā izmanto šādu definīciju: **Materiālā plūsma ir laikā sakārtota notikumu secība, kur katrs no tiem ir viens vai vairāku objektu vienlaicīga parādīšanās uzdotā telpas apgabalā.**

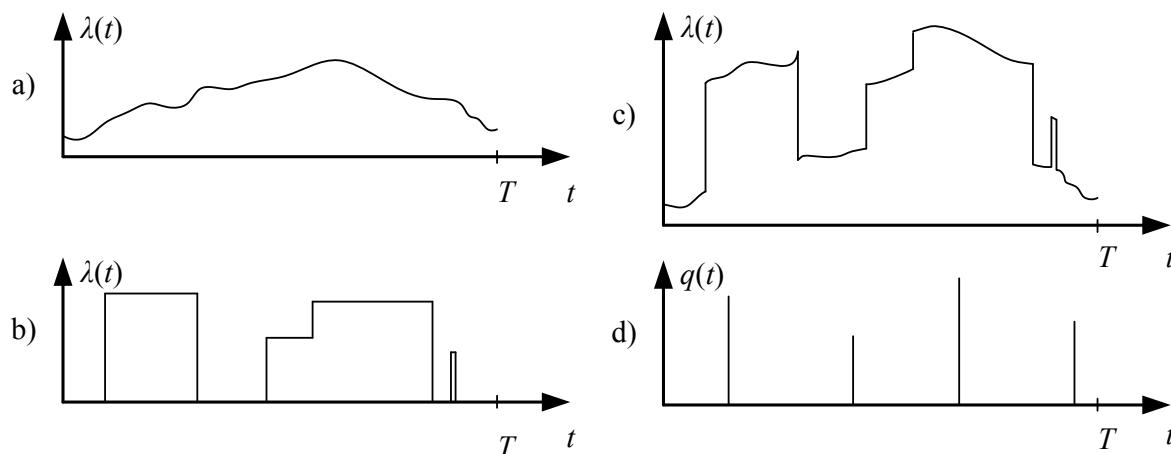
Materiālo plūsmu objekti veido plūsmu naturāli ķermenisku sastāvu un nosaka plūsmu īpašības un dabiskās mērvienības. Plūsmas parametrus raksturo tās objektu vai sastāvdaļu daudzums, kas ir pieejams noteiktā laika posmā, tātad plūsmas mērvienības ir naturālās mērvienības (gabali, kilogrami, kubikmetri u.c.) noteiktā laika posmā (sekundē, minūtē, stundā, gadā vai citā laika posmā).

Plūsmas objektus sistēmas specifiskācijas ietvaros var interpretēt, izmantojot dažādas pieejas – diskreto, nepārtraukto vai kombinēto – un attēlot kā stāvokļa trajektorijas mainīgos. Kopumā var izcelt četrus plūsmu tipus [29]:

- nepārtraukta laika plūsma ar nepārtrauktām intensitātes izmaiņām;
- nepārtraukta laika plūsma ar diskrētām intensitātes izmaiņām;
- nepārtraukta laika plūsma ar diskrēti-nepārtrauktām intensitātes izmaiņām;
- diskrēta plūsma.

Plūsmas trajektoriju piemēri ir attēloti 1. att. Plūsmas trajektoriju piemēri, kur visos piemēros uz horizontālās ass ir attēlots laiks, a), b) un c) uz vertikālās ass – objektu plūsmas intensitāte $\lambda(t)$, kuru var izteikt kā daudzumu laika vienībā, vai d) – $q(t)$, substrāta daudzums diskrētās plūsmas „porcijā”. Ar T ir apzīmēts plūsmas novērošanas laiks. Šajā attēlā uzskatāmībai c) piemērā nepārtrauktā laika plūsma ar diskrēti-nepārtrauktām intensitātes izmaiņām ir izveidota kā divu iepriekšējo – a) un b) – plūsmu apvienojums. Lielumu $\lambda(t)$ var saukt arī par nepārtrauktās plūsmas stāvokli, jo šis lielums raksturo plūsmu jebkurā laika momentā.

Materiālās plūsmas ir dažādu sistēmu neatņemamas sastāvdaļas. Pēdējo gadu laikā publikācijās diezgan bieži tiek lietoti tādi termini kā „plūsmu sistēma”, „materiālo plūsmu sistēma” un „materiālu apstrādes vai materiālo plūsmu apstrādes sistēma” (*flow system, material flow system, material handling vai material flow handling system*) [2, 5 - 9, 26, 27 u.c.]. Daži autori izdala materiālo plūsmu sistēmu no pētāmās vai projektējamās sistēmas, konstatē, ka efektīvas mijiedarbības starp plūsmu sistēmu un ražošanas sistēmu nodrošināšana ir svarīgs uzdevums, un vērtē ar materiālo plūsmu vadīšanu starp ražošanas sistēmas elementiem saistīto izdevumu apjomu kā 13-30% no kopējiem ražošanas izdevumiem [13]. Plūsmu sistēmas jēdziens ir plašāks nekā materiālo plūsmu vai materiālo plūsmu apstrādes sistēmas jēdziens un ir pielietojams dažādu tipu sistēmu aprakstīšanai. Ņemot vērā iepriekš minēto, var tikt noformulēta materiālo



1. att. Plūsmas trajektoriju piemēri

plūsmu apstrādes sistēmu definīcija: **materiālo plūsmu apstrādes sistēmas ir tehniskas vadāmās sistēmas, kas izveidotas materiālu objektu plūsmu apstrādei.** „Apstrāde” apvieno sevī visa veida operācijas, kas tiek izpildītas ar MP objektiem. Lietojot imitācijas modelēšanu, materiālo plūsmu apstrādes sistēmu vai to tīklu analīzei ir jāizveido tādi sistēmu apraksti, kas iekļauj sevī materiālo plūsmu aprakstus.

Materiālās plūsmas aprakstu ir iespējams izveidot kā saturīgu aprakstu, tabulu, formalizētu shēmu, grafisku modeli, pieņemtu standarta aprakstu vai kombinēto aprakstu [13, 23]. MP apraksti tabulu veidā ir elementāri plūsmu modeļi. MP apraksta piemērs ir attēlots 1.tabula.

Šo tabulas modeli sauc arī par materiālās plūsmas notikumu protokolu [29]. Apzīmējums Ob_{ji} attiecināms uz plūsmas j -tā tipa objektiem, kas ir novēroti t_i laika momentā, j – plūsmas objektu klases numurs, i – notikuma kārtas numurs esošajā plūsmā. Mainīgais v_i apzīmē i -tā sastāva tipu, mainīgais n_{ji} – Ob_j tipa vagonu daudzumu ierašanās momentā ar numuru i (vai sastāvā ar tādu numuru).

1.tabula

Vagonu plūsmas notikumu protokols pienākšanas parkā

Sastāva ierašanās notikuma kārtas numurs plūsmā (i)	Notikuma rašanās moments (t_i)	Sastāva tips (v_i)	Vagonu daudzums (Ob_j)					
			Ob_1	Ob_2	...	Ob_j	...	Ob_K
1.	t_1	v_1	n_{11}	n_{21}		n_{j1}		n_{K1}
2.	t_2	v_2	n_{12}	n_{22}		n_{j2}		n_{K2}
...								
i	t_i	v_i	n_{1i}	n_{2i}		n_{ji}		n_{Ki}
...								
M	t_M	v_M	n_{1M}	n_{2M}		n_{jM}		n_{KM}

Materiālo objektu (sastāvu) plūsma, kas ir aprakstīta 1.tabula, ir struktūra

$$P = \langle T, V, Ob \rangle, \quad (1)$$

kur T - laika intervāla starp sastāvu ierašanās laika momentiem stacijā nepārtrauktā sadalījuma funkcija,
 V - sastāvu tipa diskrētā sadalījuma funkcija,
 Ob - vagonu daudzuma diskrētā sadalījuma funkcija.

Materiālo plūsmu attēlošanas piemēri ar atbilstošām laika funkcijām ir attēloti 2. un 3. att. Vagonu plūsmas laika diagramma vai „daudzuma-laika” procesa grafiks diferenciālajā formā redzama 2. att., kur t_i ir ierašanās notikumu iestāšanās laika momenti, τ_i – laika intervāli starp ierašanās notikumiem, n_{ij} – j -tā tipa vagonu skaits i -tā sastāvā, v_i – i -tā sastāva tips. To pašu plūsmu attēlo 3. att., izmantojot citu attēlošanas pieeju: grafikā redzama vagonu plūsmas intensitātes laika funkcija $\lambda(t)$, intensitāte ir interpretēta kā vagonu skaits esošajā telpas punktā noteiktā laika periodā, piemēram, vagoni stundā.

Veidojot MP aprakstus, vislabākos rezultātus var sasniegt, kombinējot dažādus aprakstīšanas veidus. Nav iespējams definēt universālu materiālo plūsmu aprakstīšanas metodi vai veidu, taču dažiem aprakstu veidiem, piemēram, formāliem un grafiskiem ir lielāka pielietojamība imitācijas modelēšanas jomā.

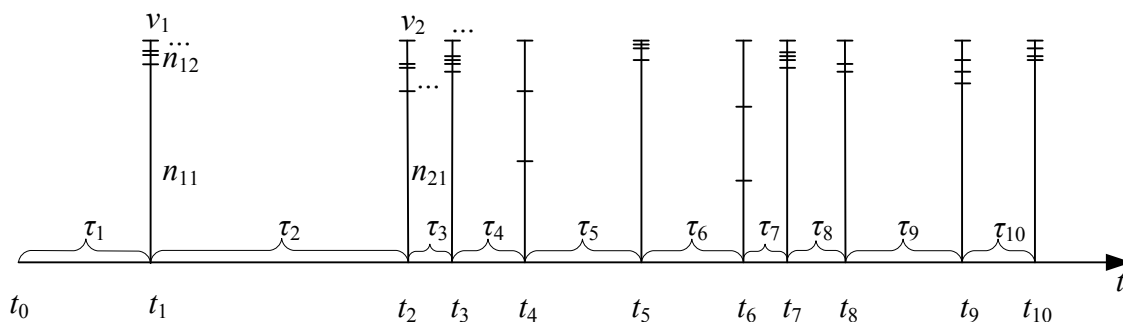
Galvenie secinājumi:

- materiālās plūsmas jēdzienam ir vispārīgs raksturs un universāla, praktiski neierobežota pielietojamības sfēra;
- materiālo plūsmu teorija un tās sastāvdaļas nodrošina metodisku pamatu MP pētījumiem mākslīgās materiālās sistēmās;
- materiālo plūsmu objekti nosaka materiālo plūsmu tipus un veido nepārtrauktas un diskrētas plūsmas;
- materiālo plūsmu apstrādi nodrošinošās sistēmas ieteicams analizēt kā materiālo plūsmu apstrādes sistēmas un/ vai MPAS tīklus;
- materiālās plūsmas, kā mākslīgo materiālo sistēmu elementi, jāapraksta, izmantojot vienu no vairākiem aprakstīšanas veidiem MP teorijas ietvaros.

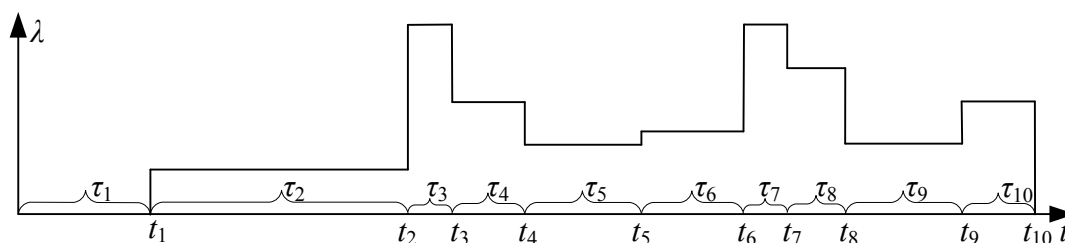
Nodaļā izvirzītas vispārīgas prasības MP aprakstam, kuram jāiekļaujas imitācijas modelēšanas metodoloģijā, izstrādāta universāla pieeja materiālo plūsmu analīzei un formalizācijai imitācijas modeļa konceptualizācijas posmā.

Materiālo plūsmu modelēšanas paradigmas

Promocijas darba 2. nodaļā ir veikts dažādu modelēšanas pieeju salīdzinošs pētījums dinamisku objektu plūsmu modelēšanas jomā ar mērķi identificēt problēmas un uzdevumus, kā arī vispārīgā līmenī definēt prasības kombinētās modelēšanas pieejai diskrētu objektu plūsmu modelēšanas jomā.



2. att. Vagonu plūsmas laika diagrammas piemērs



3. att. Vagonu plūsmas intensitātes laika funkcijas piemērs

Diskrētu objektu plūsmu modelēšana ietilpst modelēšanas pieejās, kas apskatītas šajā nodaļā, kā to neatņemama sastāvdaļa. Galvenā uzmanība tika pievērsta materiālo plūsmu modelēšanai sistēmu dinamikā, diskrētu notikumu sistēmu modelēšanas pieejā un kombinētā modelēšanas pieejā. Sistēmu dinamikas pieejas ietvaros apraksta „lielumu plūsmas” vai „procesu lielumu plūsmas”, diskrētu notikumu modelēšanā notiek atsevišķu objektu „izsekošana” plūsmās, kombinētā modelēšanas pieeja apvieno tradicionālo pieeju aspektus.

Sistēmu dinamikas nepārtrauktos modeļos laika soļi ir konstanti, laika progress ir vienmērīgs, un mainīgo vērtību izmaiņas ir tieši saistītas ar laika izmaiņām, mainīgo vērtības atspoguļo modelējamās sistēmas stāvokli jebkurā atsevišķā laika momentā. Sistēmu dinamikas nepārtrauktos modeļos objektu plūsmas var būt interpretētas kā šķidrums plūsmas caurulē, jebkurā laika momentā šķidruma apjoms var būt mainīgs, bet kopumā plūsmas ir nepārtrauktas. Plūsmu intensitātes ir nemainīgas laika soļa garumā.

Diskrētu notikumu modeļos sistēmas stāvoklis mainās tikai notikumu iestāšanās momentos. Atšķirībā no nepārtrauktiem modeļiem modelēšanas laika virzīšana uz priekšu notiek no notikuma līdz nākamajam notikumam, un laika posmi starp notikumiem vispārīgā gadījumā ir dažādi. Atsevišķi plūsmas objekti tiek novēroti notikumu momentos, caurules analogija diskrētu notikumu modeļiem izskatās citādi: jebkurā laika momentā caurule var būt „tukša” vai tajā atrodas un pārvietojas atsevišķi „spaini ar šķidrumu”. Vēl viena būtiska atšķirība ir saistīta ar izejošo plūsmu: spaini ar šķidrumu „iziet” no caurules pēc gadījuma laika intervāliem.

Efektīvās kombinētās pieejas modeļos ir iespējams apvienot plūsmu intensitātes nemainīgumu laika intervālā ar paša laika intervāla mainīgo

ilgumu, t.i., apvienot sistēmu dinamikas plūsmas intensitātes nemainīgumu laika intervālā ar laika intervāla starp diskrētiem notikumiem gadījuma ilgumu, turklāt iespējamo notikumu sarakstu var papildināt ar plūsmas izraisītiem notikumiem. Tapāt kā nepārtrauktos modeļos plūsmas veidojas no „vielas” nevis no atsevišķiem „ķermeņiem” vai diskrētiem objektiem. Ja plūsmu intensitātes ir nemainīgas starp diskrētiem notikumiem, tad sistēmas stāvokļa izmaiņas tiek konstatētas un modelētas tikai atsevišķos notikumu momentos. Laika posmos starp notikumiem modelī notiek stāvokļa lineārās izmaiņas un šeit ir redzama galvenā atšķirība no diskrētu notikumu modeļiem. Tomēr plūsmu tempu nemainīgums starp notikumiem ļauj modelēt laika virzīšanu uz priekšu no notikuma līdz notikumam bez starp aprēķiniem līdzīgi diskrētu notikumu modeļiem. Turpinot caurules analogiju, plūsma ir nepārtraukta, bet plūsmas intensitāte mainās momentāni, piemēram, ventiļu stāvokļa izmaiņu momentos.

Uzdevuma nostādne var būt noformulēta šādi: izstrādāt tādu modelēšanas pieeju, kuras ietvaros sistēmas modelis var būt realizēts kā matemātiska struktūra

$$M = \langle X, Z, Y, H, G, t \rangle, \quad (2)$$

kur	X	-	ieejas signālu kopa,
	Z	-	stāvokļu kopa,
	Y	-	izejas signālu kopa,
	H	-	pāreju operators,
	G	-	izeju operators,
	t	-	modelēšanas laiks.

Šīs nodaļas ietvaros paveiktais:

- analizētas galvenās modelēšanas pieejas no diskrētu objektu plūsmu modelēšanas viedokļa;
- aprakstīti kombinētu pieeju realizācijas pamatprincipi un iespējamie varianti;
- argumentēta kombinētās modelēšanas pieejas teorētiskā pamatojuma nepieciešamība objektu plūsmu uzticamai modelēšanai diskrētu notikumu modelēšanas pieejas ietvaros.

Galvenie secinājumi ir šādi:

- tradicionālās imitācijas modelēšanas pieejas nodrošina objektu plūsmu modelēšanu atšķirīgos detalizācijas līmeņos;
- eksistē praktiska iespēja formulēt atšķirīgu, tradicionālās modelēšanas pieejās bāzētu, kombinēto modelēšanas pieeju pamatprincipus;
- kombinētās modelēšanas pieejas realizēšana objektu plūsmu modelēšanas jomā var nodrošināt modeļu veidošanu, kas ļauj veikt MPAS efektīvāku pētīšanu, salīdzinot ar tradicionālām IM pieejām.

Nodaļas materiāls ļauj konstatēt, ka efektīvu un uzticamu kombinēto modeļu izstrādei ir nepieciešams pieejas vispārējs un pareizs teorētiskais pamatojums, kas šobrīd vēl nav noformulēts.

Materiālo plūsmu kombinētās modelēšanas pieejas izstrāde

Promocijas darba 3. nodaļā ir veikts piedāvātās kombinētās modelēšanas pieejas teorētiskā pamatojuma izklāsts, kas atbilst uzdevumā noformulētajām prasībām.

Klasiskās pieejas nepilnību, kas saistītas ar vairākiem datu pārveidojumiem, novēršanai un diskrētu notikumu pieejas atzīto pozitīvo īpašību saglabāšanai ir jādefinē diskrētu objektu plūsmu attēlošana un citu modeļu elementu raksturojumi un īpašības, kas nepieciešamas kombinētās pieejas realizācijai MP modelēšanā; jārealizē resursu izmantošanas imitācija un datu, kas uzkrāti modeļa izpildes laikā, uzskatāma apkopošana un interpretēšana modelēšanas rezultātu formā.

Pieejas realizēšanā tiek nodrošināta tāda diskrētu notikumu sistēmu modelēšana, kas iekļauj sevī plūsmas stāvokļa izmaiņas notikumus. Tādu funkciju īstenošanai ir pietiekami realizēt četras modeļa komponentes:

- 1) Plūsmas avots, kas nodrošina plūsmas objektu ierašanos modelī nepārtrauktas plūsmas veidā vai tās atsevišķās porcijās.
- 2) Plūsmas izejas punkts jeb noteka, kas ir modeļa robeželements – šeit notiek plūsmas „iztecēšana” no modeļa.
- 3) Universālais elements, kas imitē plūsmas objektu aizkavēšanu to apstrādes laikā (glabāšanas, pārkraušanas, iepakojšanas un citas darbības), jeb bunkurs.
- 4) Transportēšanas elements, kas realizē plūsmas objektu pārvietošanu starp modeļa pamata elementiem noteiktā laikā.

Nepieciešamības gadījumā var definēt papildus modeļa komponentes, kas jāizveido saskaņā ar prasībām kombinēto modeļu komponentēm, kā arī papildus vadības elementus.

Diskrētu notikumu modeļos ieejas objektu plūsmas tiek modelētas kā laikā sakārtota notikumu secība. Diskrētu notikumu un kombinētie modeļi izmanto vienu metodi modelēšanas laika skaitīšanai. Kombinētajos modeļos ir jārealizē tāda plūsmu aprakstīšana, kas atbilst kombinētās modelēšanas pieejas prasībām, t.i., plūsmas intensitātēm ir jābūt nemainīgām starp atbilstošu notikumu laika momentiem, tādas plūsmas var saukt par mezoskopiskām plūsmām [29]. Turpmāk plūsmas kombinētajos modeļos tiek interpretētas kā mezoskopiskas. Modelējamā plūsma tiek izveidota kā atsevišķu vielas vai objektu „porciju” superpozīcija. Plūsmas noteikšanai ir nepieciešami trīs gadījuma lieluma sadalījumi: laika intervāla starp porcijām, porciju ilguma un vielas vai objektu daudzuma sadalījums.

Procesi, kas ir notikumiem vadāmi, diez vai labi pakļausies nepārtrauktai modelēšanai, taču dažos gadījumos kombinētā sistēmu modelēšana labāk atbilst modelējamās sistēmas īpašībām. Sistēmas, kur nav identificējamu „objektu” vai kur ir tāds tādu objektu daudzums, ka to identifikācija ir praktiski bezjēdzīga, var būt dabiski attēlotas, izmantojot

kombinēto pieeju. Kombinētās modelēšanas pamatā ir plūsmu tempu izmaiņas īpašos laika momentos.

Kombinētās pieejas ietvaros plūsmu procesi tiek noteikti, izmantojot intensitātes $\lambda(t)$, kas nosaka plūsmas objektu skaitu, kuri nokļūst laika vienības segmentā, un kumulatīvas intensitātes funkcijas, kas raksturo uzkrāto plūsmas objektu daudzumu.

Katra plūsma ietver sevī viena tipa produktus, modelī var eksistēt vairākas paralēlas plūsmas. Modelī plūsmas tiek attēlotas „porciju” veidā, kas pārvietojas no viena modeļa mezgla līdz nākamajam kā viens objekts. Modeļa mezglu „atlikums” vai saturs veidojas kā ienākošās un izejošās plūsmas starpība. Kombinētie modeļi vispārīgā gadījumā apstrādā mazāko notikumu skaitu, salīdzinot ar diskrētu notikumu modeļiem.

Gadījumā, ja kombinētais modelis attēlo nenoslēgtu sistēmu, sistēmas robežas elementi tiek modelēti kā avots un noteka. Komponentei „avots” (turpmāk – avots) jārealizē plūsmas „ietecēšana” modelī, rezultātam laika funkcijas veidā jābūt pieejamam komponentes izejā. Vispārīgā gadījumā avots var realizēt vairāku plūsmu ģenerēšanu (daudzkanālu avots). Ir pietiekoši aprakstīt vienkanāla avotu, jo daudzkanālu avota kanāli funkcionē neatkarīgi un atšķiras tikai ar parametru vērtībām.

Avota aprakstīšanai ir jāformalizē tā galveno parametru funkcijas: laika intervāla starp objektu porcijām sadalījuma funkcija, porciju intensitātes sadalījuma funkcija un porciju ilguma sadalījuma funkcija. Vienkāršotais avota variants var būt realizēts līdzīgi diskrētu objektu avotam diskrētu notikumu modelēšanas pieejā, kas ģenerē atsevišķus plūsmas objektus, izmantojot lieluma „laika intervāls starp plūsmas objektiem” Δt sadalījuma blīvuma funkciju $f(\Delta t)$. Šajā gadījumā avota plūsmas intensitāte mainās īpašos laika momentos $t_1, t_2, \dots, t_i, \dots$ ($t_0 \leq t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_{i_{\max}} \leq T, t_0=0$ ir modeļa darba gājiena sākuma laiks, i_{\max} ir pēdējās ienākošās plūsmas intensitātes izmaiņas kārtējais numurs un T ir modeļa darba gājiena laiks). Plūsmas intensitāte ir nemainīga laika intervālā $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$, un ir vienāda ar $\lambda_i = 1/\Delta t_i$, $i = 1, i_{\max}$. Galīgā laika intervālā plūsmas intensitātes izmaiņu laika momentu skaits ir galīgs skaitlis.

No komponentes apraksta seko: avota iespējamo stāvokļu kopa ir $Z = \{\lambda, z_1\}$, avota stāvokli nosaka izejošās plūsmas intensitāte $\lambda(t)$ un laiks līdz nākamajam intensitātes izmaiņas momentam $z_1(t)$. Jebkurā laika momentā $t \in (0, T)$ avots atrodas vienā no iespējamiem kopas Z stāvokļiem. Izejošās plūsmas intensitāte λ ir laika funkcijas $\lambda(t)$ vērtība un ir reāls skaitlis $0 \leq \lambda(t) \leq \lambda_{\max}$. Laiks līdz nākamajam intensitātes izmaiņas laika momentam ir reāls skaitlis $z_1(t) \geq 0$. Avota stāvoklis patvaļīgā laika momentā $t > t_0$ tiek noteikts ar operatoru H , šis stāvoklis nav atkarīgs no iepriekšējā avota stāvokļa:

$$z(t) = H[z(t_0)], \quad (3)$$

Operatora H veids ir atkarīgs no tā, vai aplūkojamā laika intervālā tiek novēroti avota stāvokļa izmaiņas laika momenti. Stāvokļa izmaiņas notiek lēcienveidīgi. Vispārīgā gadījumā esošajam $z(t_0)$ stāvoklim atbilst nevis viens konkrētais $z(t)$, bet vairāki ar kādu sadalījuma likumu, kas ir atkarīgs no operatora H veida.

Modelēšanas sākuma laika momentā $t=t_0$ izejošās plūsmas intensitāte $\lambda_0=0$. Laika momentos τ_i uz avotu iedarbojas vadības iedarbes g , kur g ir vadības signālu kopas Γ elements un τ_i laika momentus nosaka gadījuma lieluma $\Delta\tau$ sadalījuma blīvuma funkcija $f(\Delta\tau)$.

Vadības iedarbes uztveršanas laika momentā mainās avota stāvoklis. Pieņemsim, ka galīgā laika intervālā avots uztver galīgu vadības iedarbju skaitu. Turpmāk tiek apskatīta apvienotā laika momentu kopa, kas ietver sevī gan plūsmas intensitātes izmaiņu, gan vadības signāla uztveršanas laika momentus.

Avota izejā veidojas signāls y , kas ir vienāds ar izejošās plūsmas intensitāti, t.i., avota izejas signāls ir vienāds ar avota stāvokļa λ vērtību jebkurā laika momentā. Izejas signāls tiek formēts no avota stāvokļa $z(t)$ saskaņā ar operatoru G , kas var būt aprakstīts šādi:

$$y(t_i) = G[z(t)] = \frac{1}{\Delta t_i}, \quad i = 1, i_{\max}, \quad (4)$$

Ir jāapskata ne tikai avota stāvoklis $z(t)$, bet arī $z(t+0)$. Pieņemsim, ka jebkuram $t_i > t$ moments $t+0$ pieder intervālam $(t, t_i]$. Avots pāriet no stāvokļa $z(t)$ uz stāvokli $z(t+0)$ momentāni vadības iedarbes brīdī. Vienkanāla avota vienkāršotais grafiskais attēls ir aplūkojams 4. a) att., izejas signāla piemērs 4. b) att.

No komponentes apraksta izriet, ka avots var būt formāli aprakstīts kā gabaliem lineārs agregāts, kuram nav ieejas signāla un ir vienkāršs pārejas operators H un izejas operators G .

Avota īpašības nosaka šīs komponentes modelēšanas rezultātu veidus. Kopējais plūsmas apjoms A , kas tika novērots komponentes izejā modeļa darba gājiena laikā:

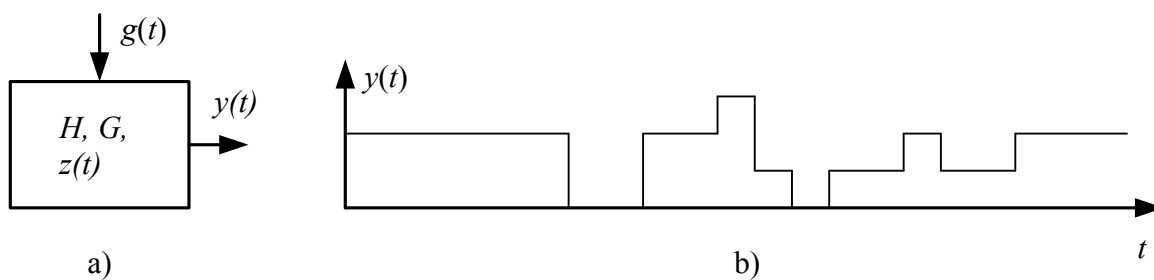
$$A = \int_0^T \lambda(t) dt = \sum_1^{i_{\max}} \lambda_i \Delta t_i, \quad (5)$$

kur $i = \overline{1, i_{\max}}$, i_{\max} ir pēdējās plūsmas porcijas numurs modeļa darba gājiena laikā T un pēdējais laika intervāls $\Delta t_{i_{\max}} = T - t_{i_{\max}-1}$.

Vidējā izejošās plūsmas intensitāte modeļa darba gājiena laikā T :

$$\bar{\lambda} = \int_0^T \lambda(t) dt / T = \sum_1^{i_{\max}} \lambda_i \Delta t_i / \sum_1^{i_{\max}} \Delta t_i = \sum_1^{i_{\max}} \lambda_i \Delta t_i / T, \quad (6)$$

No avota plūsmas jābūt novirzītai uz kādu no citām kombinētā modeļa komponentēm.



4. att. Vienkanāla avota a) vienkāršotais attēls, b) izejas signāla piemērs

Kombinēto modeļu bāzes komponente ir „bunkurs” (turpmāk tekstā – bunkurs), komponente, kas imitē plūsmas porciju apstrādes, pārveidošanas un glabāšanas procesus, t.i., bunkurs modelī var attēlot atsevišķu darbavietu, apstrādes punktu, ražošanas iecirkni vai pat veselu ražošanas vai loģistikas uzņēmumu. Bunkuri var būt vienkanāla vai daudzkanālu komponentes. Aprakstīsim vienkāršu vienkanāla bunkuru.

Bunkura ieejā tiek uztverta ienākošā plūsma. Bunkura aprakstīšanai ir jādefinē tā galvenie parametri: ietilpība B_{\max} un maksimāla izejošās plūsmas intensitāte μ_{\max} . Bunkura izejā veidojas izejošā plūsma. Bunkura stāvokli jebkurā modelēšanas laika momentā t nosaka faktiskā ienākošās un izejošās plūsmas intensitāte $\lambda^{\text{ien}}(t)$ un $\lambda^{\text{iz}}(t)$, un sākuma b_0 un „esošais” saturs $b(t)$:

$$b(t) = b_0 + \int_0^t \lambda^{\text{ien}}(t) dt - \int_0^t \lambda^{\text{iz}}(t) dt. \quad (7)$$

Jāņem vērā, ka bunkurs pats var izraisīt notikumus, kas ietekmē notikumu plānošanu kombinētajā modelī, proti, bunkura iztukšošanas vai uzpildīšanas līdz B_{\max} laika momentā izejošās plūsmas intensitāte var mainīties, tādi laika momenti var būt aprēķināti un iekļauti plānoto notikumu sarakstā. Pieņemsim, ka laika momentos $t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, (t_0 \leq t_i \leq t_{i_{\max}} \leq T)$ notiek ienākošās vai izejošās plūsmas intensitātes momentānas izmaiņas, $t_0 = 0$ ir modeļa darba gājiena sākuma laiks, i_{\max} ir pēdējās ienākošās vai izejošās plūsmas intensitātes izmaiņas kārtējais numurs modeļa darba gājiena laikā un T ir modeļa darba gājiena laiks. Tad vienādojumi, kas apraksta bunkura uzvedību laikā ir šādi:

$$\lambda^{\text{iz}}(t) = \begin{cases} 0, & \text{ja } \lambda^{\text{ien}}(t) = 0 \text{ un } b(t) = 0; \\ \lambda^{\text{ien}}(t), & \text{ja } \lambda^{\text{ien}}(t) > 0 \text{ un } b(t) = 0; \\ \mu_{\max}, & \text{ja } b(t) > 0, \end{cases} \quad (8)$$

un

$$b(t_i) = b(t_{i-1}) + (\lambda_i^{\text{ien}} - \lambda_i^{\text{iz}}) \Delta t_i, \quad (9)$$

kur $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$, $\lambda_i = \lambda(\Delta t_i) = \lambda(t_i)$, $i=1, i_{\max}$, ievērojot ierobežojumus

$$\lambda^{iz}(t) \leq \mu_{\max}, b(t) \leq B_{\max}. \quad (10)$$

Jebkurā laika momentā $t \in (0, T)$ bunkurs atrodas vienā no iespējamiem stāvokļiem, kas pieder kopai Z . Vienādojumi un ierobežojumi (8., 9. un 10.) nosaka bunkura iespējamo stāvokļu kopu $Z = \{\lambda^{ien}, \lambda^{iz}, b, \tau\}$. Bunkura stāvokļa izmaiņas laikā nosaka ienākošās $\lambda^{ien}(t)$ un izejošās $\lambda^{iz}(t)$ plūsmas intensitāte, bunkura saturs $b(t)$ un laiks līdz nākamajam stāvokļa izmaiņas momentam $\tau(t)$.

Modelēšanas sākuma laika momentā $t_0 = 0$ bunkurs ir sākuma stāvoklī:

$$z_0 = \{\lambda_0^{ien}, \lambda_0^{iz}, b_0, \tau_0\},$$

kur τ_0 ir laiks līdz tuvākajam bunkura stāvokļa izmaiņas laika momentam, kas ir vienāds ar

$$\tau_0 = \begin{cases} t_1 & \text{ja } b_0 = 0, \lambda_1^{iz} = \lambda_1^{ien}, \text{ vai} \\ \frac{b_0}{\mu_{\max} - \lambda_1^{ien}} & \text{ja } b_0 > 0, \lambda_1^{iz} = \mu_{\max} \end{cases}, \quad (11)$$

kur λ_1^{ien} - ienākošās plūsmas intensitāte laika intervālā $\Delta t_1 = t_1 - t_0$.

λ_1^{iz} - izejošās plūsmas intensitāte laika intervālā $\Delta t_1 = t_1 - t_0$.

Bunkura stāvoklis patvaļīgā laika momentā $t > t_0$ tiek noteikts ar operatoru H , šis stāvoklis ir atkarīgs no iepriekšējā bunkura stāvokļa:

$$z(t) = H[z(t_0), t], \quad (12)$$

Vispārīgā gadījumā esošajam z_0 stāvoklim atbilst nevis viena konkrēta trajektorija $z(t)$, bet vairākas, kas ir gadījuma funkciju realizācijas un ir atkarīgas no operatora H veida.

Bunkura stāvoklis mainās notikumu laika momentos, kas var būt sekojoši: ienākošās plūsmas intensitātes izmaiņas laika moments, kas ir ārējs notikums attiecībā pret pašu bunkuru, bunkura uzpildīšanas līdz B_{\max} laika moments vai bunkura iztukšošanas laika moments. Bunkura ieejas signāls

$$x(t) = \lambda^{ien}(t). \quad (13)$$

Galīgā laika intervālā bunkura ieejā tiek uztverts galīgais ieejas plūsmas intensitāšu izmaiņu skaits. Galīgā laika intervālā notiek galīgais bunkura stāvokļa izmaiņu skaits.

Bunkura izejā veidojas izejas signāls

$$y(t) = \lambda^{iz}(t). \quad (14)$$

Izejas signāls veidojas atkarībā no bunkura stāvokļa $z(t)$ saskaņā ar izejas operatoru G :

$$y(t) = G[z(t)], \quad (15)$$

Bunkura funkcionēšanu var aprakstīt šādi. Modelēšanas sākuma laika momentā t_0 bunkuram ir sākotnējais stāvoklis z_0 . Pieņemsim, ka t_1 un t_2 ir ienākošās objektu plūsmas intensitātes izmaiņas laika momenti. Apskatīsim

bunkura stāvokli $z(t)$ intervālā $(t_0, t_1]$. Intervāls $(t_0, t_1]$ var būt interpretēts kā intervāls $(t_0, \tau_1, t_1]$, kur $\tau_1 \leq t_1$. τ_1 ir bunkura stāvokļa izmaiņas laika moments, un $t_1 < \tau_2 \leq t_2$.

Stāvokļa $z(t)$ izmaiņas šajā intervālā ir aprakstītas 2. tabulā.

Bunkura stāvokļa izmaiņas turpmākajos laika momentos notiek analogiski.

Saskaņā ar operatora H aprakstu, stāvokļa izmaiņas notiek īpašos laika momentos, kas ir ienākošas vai izejošas plūsmas izmaiņas laika momenti, bunkura iztukšošanas vai papildīšanas laika momenti.

No iepriekš teiktā izriet, ka aprakstītais vienkāršais vienkanāla bunkurs ir objekts, kas var būt apskatīts kā vienkāršots agregāts, kam piemīt noteiktas īpašības [40]:

- nav paredzēta vadības iedarbe, kas maina bunkura īpašības;
- ieejas iedarbe ir gabaliem konstanta laika funkcija;
- izejas signāls ir gabaliem konstanta laika funkcija;
- bunkura stāvokļa funkcijas trajektorija $z(t)$ ir gabaliem lineārā laika funkcija.

Bunkurs kombinētos modeļos izpilda funkcijas, kas diskrētu notikumu modeļos izpilda procesa tipa komponentes vai „iekārtas”, t.i., aiztur uz noteiktu laiku diskrētus objektus, kas pienāk ar noteiktu intensitāti un pēc apstrādes ļauj objektiem turpināt kustību.

2. tabula

Bunkura stāvoklis $z(t)$ intervālā $(t_0, t_1]$

λ_1^{ien}	τ_1	$z(t)$
$\lambda_1^{ien} \leq \mu_{max}$	$b_0 > 0$ $\tau_1 = \frac{b_0}{\mu_{max} - \lambda_1^{ien}}$	$z(\tau_1) = H[z(t_0), \tau_1] = \{\lambda_1^{ien}, \mu_{max}, 0, t_1 - \tau_1\}$ $z(\tau_1 + 0) = \{\lambda_1^{ien}, \lambda_1^{iz}, 0, t_1 - \tau_1\}$ $z(t_1) = H[z(\tau_1, t_1)] = \{\lambda_1^{ien}, \lambda_1^{iz}, 0, 0\}$ $z(t_1 + 0) = \{\lambda_2^{ien}, \lambda_2^{iz}, 0, \tau_2\}$
$\lambda_1^{ien} \leq \mu_{max}$	$b_0 = 0 \quad \tau_1 = t_1$	$z(t_1) = H[z(t_0), t_1] = \{\lambda_1^{ien}, \lambda_1^{iz}, 0, 0\}$ $z(t_1 + 0) = \{\lambda_2^{ien}, \lambda_2^{iz}, 0, \tau_2\}$
$\lambda_1^{ien} > \mu_{max}$	$\tau_1 = \frac{B_{max} - b_0}{\lambda_1^{ien} - \mu_{max}} \leq t_1$	$z(\tau_1) = H[z(t_0), \tau_1] = \{\lambda_1^{ien}, \mu_{max}, B_{max}, t_1 - \tau_1\}$ $z(\tau_1 + 0) = \{\mu_{max}, \mu_{max}, B_{max}, t_1 - \tau_1\}$ $z(t_1) = H[z(\tau_1, t_1)] = \{\mu_{max}, \mu_{max}, B_{max}, 0\}$ $z(t_1 + 0) = \{\lambda_2^{ien}, \mu_{max}, B_{max}, \tau_2\}$
$\lambda_1^{ien} > \mu_{max}$	$\tau_1 = \frac{B_{max} - b_0}{\lambda_1^{ien} - \mu_{max}} > t_1$	$z(t_1) = H[z(t_0), \tau_1] = \{\lambda_1^{ien}, \mu_{max}, B_{max}, 0\}$ $z(t_1 + 0) = \{\lambda_2^{ien}, \mu_{max}, B_{max}, \tau_2\}$

Modelēšanas rezultātiem, kas raksturo bunkura funkcionēšanu, jānodrošina informācijas iegūšana par bunkuram cauri ejošo kopējo plūsmas apjomu, par bunkura apjoma „izmantošanu”, vidējo bunkurā esošo plūsmas apjomu un plūsmas objektu vidējo aizturēšanas laiku bunkurā modeļa darba gājiena laikā. Tādus modelēšanas rezultātus nodrošina tradicionālā diskreto notikumu sistēmu modelēšanas pieeja.

Kombinētās pieejas ietvaros modelēšanas procesa vienkāršošanai jāsamazina stāvokļa pāreju daudzums. Tas ir iespējams pie nosacījuma, ka sistēmas stāvokļa izmaiņu trajektorija var būt sadalīta secīgu notikumu momentu apakškopās $(t_q, t_{q+1}, \dots, t_{m-1}, t_m)$, $t_q \leq t_{q+1} \leq \dots \leq t_m$, tādās, ka notikums e_m ar atbilstošu notikuma laiku t_m un visi starpstāvokļi $z(t)$, $t \in (t_q, t_m)$ var būt tiešā veidā iegūti no $z(t_q)$ izmantojot aprēķinus, nevis modelējot notikumus intervālā (t_q, t_m) , t.i., ja ir spēkā dekompozīcijas nosacījumi. Pārbaudīsim, vai ir iespējams ievērot dekompozīcijas nosacījumus jaunās pieejas ietvaros.

Lai varētu korekti aizvietot diskreto objektu plūsmu ar gabaliem nemainīgu plūsmu, ir jāpārlicinās, ka modelēšanas laikā iegūtie rādītāji sniedz modelētājam identisku informāciju par komponentu darbības rezultātiem.

Apskatīsim modeļa darba gājiena realizācijas piemēru komponentēm *iekārta* un *bunkurs* ar identiskiem parametriem.

Vienkanāla bunkura funkcionēšanas procesa raksturojumu aprēķināšanai pieņemsim, ka notikumi modeļa darba gājiena laikā notiek tajos pašos laika momentos, kā diskreto notikumu modelī. Pieņemsim, ka bunkura maksimālā ietilpība jeb kapacitāte $B_{\max} = 1$. Ņemot vērā bunkura funkcionēšanas īpašības, ir iespējams attēlot laika intervālus un stāvokļa funkcijas izmaiņas tabulā (sk. 3. tab.). Atbilstošās laika funkcijas modeļa darba gājiena laikā ir attēlotas 5. b), c) un d) attēlos. Bunkura noslodzes koeficients modeļa darba gājiena laikā var būt aprēķināts kā bunkura maksimālās pieejamās ietilpības $B_{\max} \cdot T$ modeļa darba gājiena laikā izmantotā daļa. 6. attēlā ir redzams detalizēts bunkura stāvokļa funkcijas attēls, kas ir nepieciešams turpmāko aprēķinu skaidrojumiem. Pieejamās ietilpības izmantotā daļa ir vienāda ar $z_k(t)$ funkcijas integrāli intervālā $[0, T]$. Aprēķināsim integrāļa vērtību, sākot ar laika momentu t_1 (sk. 6. att.). Integrāļa vērtība ir vienāda ar laukumu zem $z_k(t)$ funkcijas līknes un var būt interpretēta kā poligona laukumu summa:

$$\int_0^T z_k(t) dt = S_{t_1 z_1 t_2} + S_{t_2 z_2 t_3} + S_{t_3 z_3 t_4} + S_{t_4 z_4 t_5} + \dots + S_{t_{i \max} z_{i \max} t_{i \max+1}}$$

Turklāt poligona $t_3 z_3 t_4$ laukums ir vienāds ar trīsstūru $t_3 z_3 t_4$ un $t_3 z_4 t_4$ laukumu summu, kas dod iespēju apskatīt kopējo laukumu zem $z_k(t)$ funkcijas līknes kā atsevišķu porciju poligona laukumu summu (sk. 7. attēlā). Vienīgais īpašais loceklis šajā summā ir pēdējā poligona laukums:

$$\int_0^T z_k(t) dt = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + \dots + S_{i_{\max} z_{i_{\max}} z_{i_{\max}+1} T}$$

Nemot vērā 3. tabulas izteiksmes, pēc vienkāršiem pārveidojumiem varam pierakstīt j -tā poligona laukuma izteiksmi:

$$S_j = \frac{1}{2} \cdot \Delta t_{2j} + \frac{1}{2} \Delta t_{2j+2}, j = \frac{i+1}{2}, i = 1, 3, \dots, j_{\max}$$

Tad

$$\int_0^T z_k(t) dt = \sum_1^{i_{\max}} S_j = \frac{1}{2} \cdot \Delta t_2 + \sum_2^{i_{\max}} \Delta t_{2i} + \frac{1}{2} \Delta t_{i_{\max}} = \sum_2^{i_{\max}} \Delta t_{2i} + \frac{1}{2} (\Delta t_2 + \Delta t_{i_{\max}})$$

Bunkura noslodze modeļa darba gājiena laikā:

$$U_k = \frac{\sum_2^{i_{\max}} \Delta t_{2i} + \frac{1}{2} (\Delta t_2 + \Delta t_{i_{\max}})}{B_{\max} T} = \frac{\sum_2^{i_{\max}} \Delta t_{2i} + \frac{1}{2} (\Delta t_2 + \Delta t_{i_{\max}})}{T} = U_d - \frac{\Delta t_2 + \Delta t_{i_{\max}}}{2T},$$

kur U_d ir diskrētas iekārtas noslodze

Bunkura kumulatīvā caurlaidspēja modeļa darba gājiena laikā:

$$N_k = \int_0^T \lambda^{iz}(t) dt = (i_{\max+1}) \text{div } 2 + \frac{T - t_{i_{\max}}}{\Delta t_{i_{\max}}^*} = N_d + \Delta^*,$$

kur $\frac{1}{\Delta t_{i_{\max}}^*}$ ir izejošās plūsmas intensitāte laika intervālā $(T - t_{i_{\max}})$, tā vērtība

ir atkarīga no T vērtības un notikumiem, kas plānoti pēc modeļa darba gājiena laika nobeiguma, N_d – diskrētās iekārtas kumulatīvā caurlaidspēja, kas atšķiras no N_k uz Δ^* .

No iegūtajiem modelēšanas datiem var secināt, ka noslodzes un caurlaidspējas novērtējumu rezultāti diskrētu notikumu un kombinētā pieejā atšķiras, turklāt pie lielām T vērtībām:

$$\Delta U = U_d - U_k = \frac{\Delta t_2 + \Delta t_{i_{\max}}}{2T} \rightarrow 0.$$

Tātad bunkura funkcionēšanas procesa raksturojumi pieejas ietvaros var sniegt nepieciešamu un precīzu informāciju par komponentes noslodzi un caurlaidspēju.

Kaut gan pieejas ietvaros ir pieņemts, ka atsevišķu plūsmas objektu identifikācija un izdalīšana nav nepieciešamas, ir iespējams novērtēt tādu rādītāju, kā vidējais plūsmas objekta pavadītais laiks bunkurā:

$$\bar{t}_b = \frac{1}{\bar{\lambda}^{iz}(t)} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i_{\max}} \lambda_i^{iz} \Delta t_i / \sum_{i=1}^{i_{\max}} \Delta t_i}, \quad (16)$$

kur λ_i^{iz} ir izejošās plūsmas intensitāte, $\lambda_i^{iz} > 0$.

3. tabula. Bunkura stāvokļa funkcijas vērtības modeļa darba gājiena laikā

Notikuma kārtējais numurs i	Notikuma laiks t_i	Laika intervāls no iepriekšējā notikuma Δt_i	Ienākošās plūsmas intensitāte $\lambda^{\text{ien}}(t_i) = \lambda^{\text{ien}}(\Delta t_i)$	Izejošās plūsmas intensitāte $\lambda^{\text{iz}}(t_i) = \lambda^{\text{iz}}(\Delta t_i)$	Stāvokļa funkcija $z_k(t_i)$
0	t_0	$\Delta t_0 = 0$	0	0	$z_k(t_0) = 0$
1	t_1	$\Delta t_1 = t_1 - t_0$	$1/(t_3 - t_1) = 1/(\Delta t_3 + \Delta t_2)$	0	$z_k(t_1) = z_k(t_0) + (\lambda^{\text{ien}}(\Delta t_1) - (\lambda^{\text{iz}}(\Delta t_1))) \cdot \Delta t_1$
2	t_2	$\Delta t_2 = t_2 - t_1$	$1/(t_3 - t_1) = 1/(\Delta t_3 + \Delta t_2)$	$1/(t_4 - t_2) = 1/(\Delta t_4 + \Delta t_3)$	$z_k(t_2) = z_k(t_1) + (\lambda^{\text{ien}}(\Delta t_2) - (\lambda^{\text{iz}}(\Delta t_2))) \cdot \Delta t_2$
3	t_3	$\Delta t_3 = t_3 - t_2$	$1/(t_5 - t_3) = 1/(\Delta t_5 + \Delta t_4)$	$1/(t_4 - t_2) = 1/(\Delta t_4 + \Delta t_3)$	$z_k(t_3) = z_k(t_2) + (\lambda^{\text{ien}}(\Delta t_3) - (\lambda^{\text{iz}}(\Delta t_3))) \cdot \Delta t_3$
...
i	t_i	$\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$	$1/(t_{i+2} - t_i) = 1/(\Delta t_{i+2} + \Delta t_{i+1})$, ja $i=2k+1$, vai $1/(t_{i+1} - t_{i-1}) = 1/(\Delta t_{i+1} + \Delta t_i)$, ja $i=2k$	$1/(t_{i+1} - t_{i-1}) = 1/(\Delta t_{i+1} + \Delta t_i)$, ja $i=2k+1$, vai $1/(t_{i+2} - t_i) = 1/(\Delta t_{i+2} + \Delta t_{i+1})$, ja $i=2k$	$z_k(t_i) = z_k(t_{i-1}) + (\lambda^{\text{ien}}(\Delta t_i) - (\lambda^{\text{iz}}(\Delta t_i))) \cdot \Delta t_i$
...
i_{max}	$t_{i_{\text{max}}}$	$\Delta t_{i_{\text{max}}} = t_{i_{\text{max}}} - t_{i_{\text{max}}-1}$	pēc i -tā locekļa formulām	pēc i -tā locekļa formulām	$z_k(t_{i_{\text{max}}}) = z_k(t_{i_{\text{max}}-1}) + (\lambda^{\text{ien}}(\Delta t_{i_{\text{max}}}) - (\lambda^{\text{iz}}(\Delta t_{i_{\text{max}}})) \Delta t_{i_{\text{max}}}$
$i_{\text{max}}+1$	T	$\Delta T = T - t_{i_{\text{max}}}$	pēc i -tā locekļa formulām	pēc i -tā locekļa formulām	$z_k(T) = z_k(t_{i_{\text{max}}}) + (\lambda^{\text{ien}}(\Delta t_{i_{\text{max}}+1}) - (\lambda^{\text{iz}}(\Delta t_{i_{\text{max}}+1})) \Delta t_{i_{\text{max}}+1}$

Vispārīgā gadījumā bunkurs ir daudzkanālu komponente, kas ir jāaplūko kā apspriežamās kombinētās pieejas modeļu galveno komponenti. Katrs m -kanālu bunkura j -tais kanāls ($j=1,2,\dots,m$) atbilst vienai plūsmu objektu klasei, kura var iziet caur bunkuru. Bunkura kanāli darbojas asinhroni, tajā pašā laikā, j -tā kanāla B_{\max}^j kapacitātes un tā maksimālā caurlaidspēja μ_{\max}^j nedrīkst pārsniegt vērtības, kuras ir jāaplūko kā bunkura parametri kopumā:

$$\sum_{j=1}^m B_{\max}^j \leq B_{\max} \text{ un } \sum_{j=1}^m \mu_j \leq \mu_{\max}^j \quad (17)$$

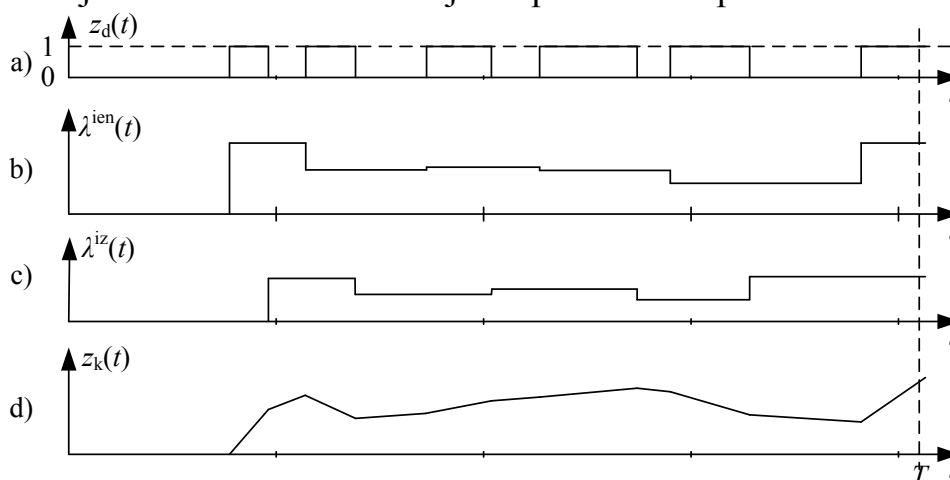
Parciālā maksimālā caurlaidspēja $\mu_j(t)$ kā regulējamais parametrs var tikt uzstādīta jebkurā laika brīdī.

Daudzkanālu bunkuru var aplūkot kā vairāku vienkanāla bunkuru apvienojumu.

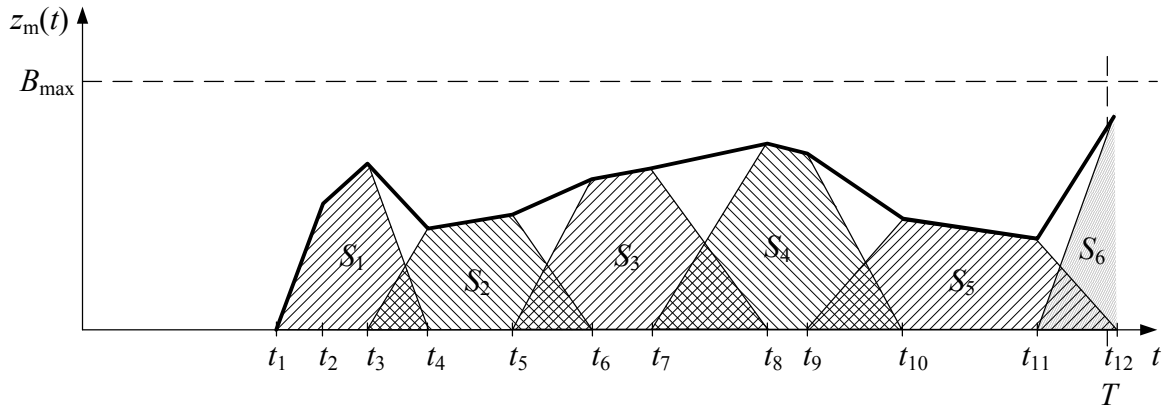
Bunkura izejas signāls var būt citas kombinētā modeļa komponentes, piemēram, cita bunkura, transporta elementa vai arī notekas izejas signāls.

Transporta elements kalpo visu ieplānoto aizturēšanu uz laiku, piemēram, pārvadājuma laika vai noliktavā uzglabāšanas laika attēlošanai modelī, ja tie modelējamam procesam ir nozīmīgi. Aizturēšana uz laiku bunkurā rodas tikai sastrēguma izveidošanās dēļ. Līdz ar to palielinās bunkura saturs. Bunkura izejas plūsmu veidošanai laiks nav nepieciešams.

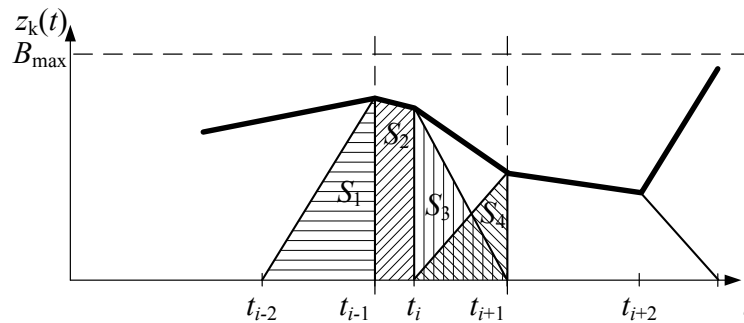
Transporta elementa ieejā tiek uztverta ienākošā plūsma ar intensitāti $\lambda^{\text{ien}}(t)$. Transporta elementa aprakstīšanai ir jādefinē tā vienīgais parametrs – aizkavēšanas laiks. Transporta elementa izejā veidojas izejošā plūsma ar intensitāti $\lambda^{\text{iz}}(t)$, kas ir identiska ienākošajai plūsmai ar aizkavējumu τ . Transporta elements, tāpat kā bunkurs, var būt vienkanāla vai daudzkanālu komponente. Funkcionēšanas laikā transporta elementā veidojas plūsmas objektu krājumi kā ienākošās un izejošās plūsmas starpība.



5. attēls. a) diskrētās iekārtas stāvokļa laika funkcija, b) bunkura ienākošās un c) izejošās plūsmas intensitātes, d) bunkura stāvokļa funkcija



6. att. Bunkura stāvokļa funkcijas $z_k(t)$ detalizācija noslodzes aprēķinam



7. att. Funkcijas $z_k(t)$ noteiktā integrāla aprēķins

Nepieciešamības gadījumā ir iespējams modelēt transporta elementa darbību ar mainīgo plūsmas objektu pārvietošanas ātrumu.

Modeļa beigu komponentes – notekas – arī var būt gan vienkānāla, gan daudzkanālu. Šīs komponentes jālieto gadījumos, kad modelējamā sistēma nav noslēgta sistēma. Apskatīsim vienkānāla notekas īpašības un modelēšanas rezultātus. Noteka ir kombinētā modeļa komponente, kas ir objektu plūsmas nobeiguma punkts. Komponentes ieejas signāls ir plūsma ar intensitāti $\lambda^{\text{in}}(t)$, izejas signāla nav. Modeļa darba gājiena laikā tiek uzkrāti dati par plūsmas apjomu komponentes ieejā un modeļa darba gājiena beigās ir pieejams uzkrātais plūsmas apjoms.

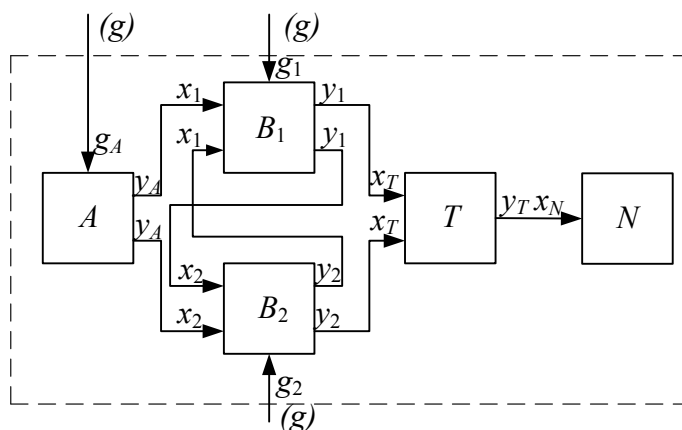
Iepriekš tika aprakstītas kombinēto modeļu nepieciešamās galvenās vai bāzes komponentes, kas nodrošina plūsmu imitācijas iespēju. No komponentu aprakstiem ir zināms, ka visas bāzes komponentes var būt formalizētas kā vienkārši agregāti. Modeļa veidošanas procesā notiek atsevišķo komponentu apvienošana atbilstoši modelējamās sistēmas struktūrai. Savienojums ir iespējams, jo komponentu ieejas iedarbes un izejas signāli tiek formalizēti kā mezoskiopiskās plūsmas. Bāzes komponentu apvienošanas piemērs vienkāršās sistēmas modelī ir attēlots 8. att.

8. attēlā aplūkojamais kombinētais modelis iekļauj sevī objektu plūsmas avotu A , divus bunkurus B_1, B_2 , transporta elementu T un noteku N . Punktotā līnija apzīmē kombinētā modeļa robežas. Komponentes uztver vadības

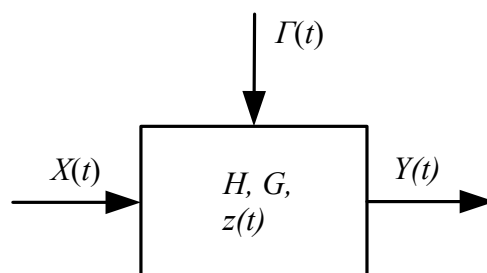
signālus, kas veido vadības signālu kopu $\Gamma = \{g_A, g_1, g_2\}$. Šajā piemērā avots nodrošina ieejas plūsmas ģenerēšanu, līdz ar to netiek definēta modeļa ieejas iedarbe. Transporta elementa izejā veidojas signāls $Y = \{y_T\}$, kas vienlaikus ir notekas ieejas signāls. Komponentu signāliem ir iekšējais raksturs.

Dinamiskie kombinētie modeļi ir instrumenti, kas kalpo informācijas iegūšanai par pētāmām sistēmām. Plūsmas, kas ir tādu modeļu neatņemamas un svarīgas sastāvdaļas, attēlo reālo sistēmu objektu plūsmas apkopotā veidā, un modelēšanas rezultātu detalizācijas līmenis atbilst objektu plūsmu mezoskopiskajam detalizācijas līmenim, t.i., kombinētās modelēšanas pieejas ietvaros modelēšanas dati ir atspoguļoti apkopotā veidā. Varam atcerēties, ka parastā diskrētu notikumu sistēmu imitācijas modelēšana bieži vien tiek izmantota kā ceļš, kas ved no tīri apkopotu uzdevumu nostādņēm uz datiem, kuri arī ir apkopoti. Taču modelēšanas datu iegūšana ir saistīta ar oriģināldatu dekompozīciju un arī ar modeļa darba gājienā iegūtā notikumu protokola datu agregatizācija. Datu sagrozījumi un zudumi šajā posmā ir neizbēgami. Kombinētās modelēšanas pieejas principiālā priekšrocība pamatojas uz sākotnējo datu, kas detalizēti mezoskopiskajā līmenī, dinamisko pārveidošanu datus, kas arī ir detalizēti mezoskopiskajā līmenī.

Runājot par kombinēto modeli kā par atsevišķo komponentu savienojumu, varam pieņemt agregāta koncepciju [40], tad kombinētais modelis var būt formalizēts kā klasiskais gabaliem lineārais agregāts (sk. 9. att.).



8. att. Kombinētā modeļa komponentu apvienošanas piemērs



9. att. Kombinētā modeļa attēlošana agregāta veidā

9. attēlā $X(t)$, $\Gamma(t)$ un $Y(t)$ ir ieejas, vadības un izejas signālu kopas, $z(t)$ ir modeļa stāvoklis, H – modeļa pāreju operators un G – modeļa izeju operators. Agregātu sistēmas iekšējo agregātu, kas uztver ieejas vai vadības signālus no apkārtējās vides, ieejas vai vadības signāli veido ienākošo vai vadības signālu kopu. Agregātu sistēmas izejošo signālu kopu veido to iekšējo agregātu izejas signāli, kas ir visas sistēmas izejošie signāli. Kombinētās modelēšanas pieejas pieņemtā ieejas un izejas plūsmu koncepcija ļauj apgalvot, ka kombinētā modeļa ienākošie un izejošie signāli eksistē plūsmu veidā. Līdz ar to ir iespējams noteikt modeļa funkcionēšanas raksturojumu veidus un to iegūšanai nepieciešamās analītiskās izteiksmes. Tāpat kā atsevišķas komponentes arī kombinētais modelis var būt vienkānā vai daudzkanālu agregāts.

Apskatīsim vienkānā kombinētā modeļa funkcionēšanas procesa raksturojumus.

Kopējais plūsmas objektu daudzums modelī jebkurā modeļa darba gājiena laika momentā t var būt aprēķināts šādi:

$$B_m(t) = B_m(0) + \int_0^t \lambda_m^{\text{ien}}(t) dt - \int_0^t \lambda_m^{\text{iz}}(t) dt,$$

kur indekss „m” norāda uz to, ka rezultāti tiek aprēķināti modelim;

$B_m(0)$ ir plūsmas objektu sākuma daudzums modelī;

$\lambda_m^{\text{ien}}(t)$ un $\lambda_m^{\text{iz}}(t)$ ir ienākošās un izejošās objektu plūsmas intensitātes laika funkcijas.

Kopējais plūsmas apjoms, kas tiek novērots uz modeļa izejas:

$$B_m^{\text{iz}} = \int_0^t \lambda_m^{\text{iz}}(t) dt.$$

Modeļa ienākošās un izejošās plūsmas vidējā intensitāte:

$$\bar{\lambda}_m^{\text{ien}} = \frac{\int_0^t \lambda_m^{\text{ien}}(t) dt}{t}, \quad \bar{\lambda}_m^{\text{iz}} = \frac{\int_0^t \lambda_m^{\text{iz}}(t) dt}{t}.$$

Vidējais plūsmas vienības atrašanās laiks modelī:

$$\bar{t}_m = \frac{1}{\bar{\lambda}_m^{\text{iz}}(t)}.$$

Kā atsevišķs gadījums var būt atzīmēts tādu sistēmu modeļu realizācijas gadījums, kur notiek atsevišķu plūsmu apvienošana vai sadalīšana sistēmas iekšienē. Tādos gadījumos tiek veikta plūsmu kompozīcija vai dekompozīcija un atbilstošo rezultātu aprēķināšana.

Šajā nodaļā minētie modeļa funkcionēšanas procesa raksturojumu veidi attiecas uz vienu atsevišķu modeļa darba gājieni. Skaidrs, ka atkārtoto modeļa darba gājieni datus ir iespējams izmantot nepieciešamiem raksturojumu vērtējumu aprēķiniem, izmantojot parastās matemātiskās

statistikas metodes atbilstošo raksturojumu punktu un intervālu novērtējumu aprēķināšanai.

Sasniegtie rezultāti ir šādi: ir izstrādāts diskrešu notikumu kombinētās modelēšanas pieejas teorētiskais pamatojums; vispārīgā līmenī ir izstrādātas kombinētā modeļa komponentes un noformulētas prasības komponentšu savienojumiem.

Galvenie secinājumi ir šādi:

- piedāvātā kombinētā modelēšanas pieeja pamatojas uz materiālo plūsmu teorijas jēdzieniem;
- piedāvātā kombinētā modelēšanas pieeja nodrošina vienkāršotu, salīdzinot ar tradicionāliem diskrešu notikumu, modeļu izveidošanu;
- kombinētie modeļi nodrošina efektīvu un uzticamu modelēšanas datu iegūšanu.

Izstrādātās pieejas pielietojums materiālo plūsmu apstrādes sistēmas modelēšanai

Ceturtajā nodaļā ir aprakstīts kombinētās modelēšanas pieejas pielietojums MPAS modelēšanai, apskatot pieostas dzelzceļa mezgla sistēmas modeļus.

Apskatāmā pieostas dzelzceļa mezgla sistēmas modelēšana tiek veikta tradicionālā diskrešu notikumu sistēmu modelēšanas paradigmā un realizējot izstrādātās kombinētās pieejas teorētiskos pamatus. Galvenais modeļu izveidošanas mērķis ir parādīt izstrādātās kombinētās pieejas pielietojuma priekšrocības, salīdzinot ar diskrešu notikumu modelēšanas pieeju. Diskrešu notikumu un kombinētā modeļa eksperimentu rezultāti tiek savstarpēji salīdzināti.

Modelējamā sistēma ir materiālo plūsmu apstrādes sistēma – pieostas dzelzceļa stacija – transporta mezgls, kas realizē dzelzceļa sastāvu pieņemšanu, to atbilstošu „apstrādi” un nosūtīšanu uz citiem dzelzceļa mezgliem. Sistēmā tiek novērotas intensīvas kustīgu objektu – sastāvu un vagonu – plūsmas.

Modelējamās sistēmas dažas īpašības, svarīgu elementu apraksti, atsevišķu parametru vērtības, gadījuma lielumu sadalījuma funkcijas un papildus informācija, kas tika izmantota imitācijas modeļa izstrādei, un diskrešu notikumu modeļa attēli ir ievietoti darba pielikumos.

Pētījumā tika izstrādāts pieostas dzelzceļa transporta mezgla diskrešu notikumu modelis. Modeļa adekvātums tika pārbaudīts, veicot tā verifikāciju un validāciju. Eksperimentos iegūti dati, kas izmantoti galvenokārt vagonu un lokomotīves izmantošanas efektivitātes pētījumam [14].

Modelēšanas dati ietver sevī tādas sistēmas funkcionēšanas raksturojumu novērtējumus kā:

- ienākošo un izejošo sastāvu skaits;
- ostas aprīkojuma izpildīto operāciju skaits un noslodze;

- ostas lokomotīvu izpildīto operāciju skaits un noslodze;
- atsevišķu vagonu tipu laiks, kuru tie pavadīja pieostas dzelzceļa stacijā u.c.

Modelēšanas dati tika izmantoti likumsakarību starp lokomotīvu pieejamību un vagonu pavadītā laika sistēmā analīzei, lokomotīvu un dzelzceļa ceļa posmu noslodzes novērtējumu iegūšanai.

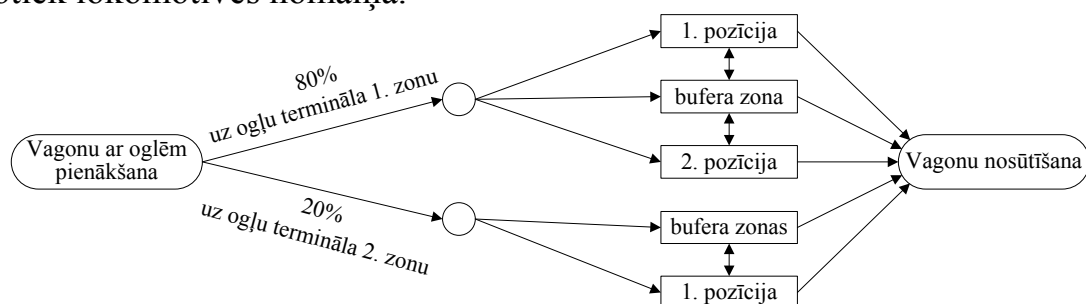
Par eksperimentālā kombinētā modeļa pētījuma objektu ir izvēlēta modelējamās sistēmas apakšsistēma – ogļu termināla 1. zona, kas apstrādā 80% no ienākošajiem ogļu sastāviem. Modelējamās sistēmas struktūra ir attēlota 10. att.

Ogļu termināls, vai vienkārši – termināls, atrodas pieostas dzelzceļa transporta mezgla teritorijā. Terminālā tiek „apstrādāti” (t.i., iekrauti vai izkrauti) ogļu pusvagonu sastāvi, kas tiek pārvietoti no uzkrāšanas ceļiem. Pārvietošanu izpilda 1. ostas lokomotīve. Gan laika intervāli starp sastāviem, gan sastāvu garumi ir gadījuma lielumi. Ogļu termināla galvenie parametri, darbības algoritma īpašības un ogļu pusvagonu plūsmas parametri ir aplūkojami darba pielikumos.

Izmantojot esošo informāciju par sistēmas funkcionēšanas algoritmu un tās parametriem, tika izstrādāts termināla diskrešu notikumu modelis, kas ir izmantots kombinētā modeļa adekvātuma pārbaudei.

Modelēšanas uzdevuma nostādnes analīze ļauj konstatēt, ka ir iespējams izskatīt modelējamo sistēmu kā materiālo plūsmu apstrādes sistēmu, turklāt uzdevuma nostādnē izmantotie plūsmu raksturojumi ļauj pielietot gan tradicionālo diskrešu notikumu modelēšanas pieeju, gan kombinēto modelēšanas pieeju sistēmas funkcionēšanas procesa raksturojumu novērtēšanai.

Kombinētā modeļa veidošanu var uzsākt ar konceptuālā modeļa izstrādāšanu. Ogļu termināla 1. zonas vienkāršotajā procesa diagrammā 11. a) att. ir atzīmēti modelējamās sistēmas elementi, kas tiek modelēti ar atbilstošām kombinētajām komponentēm: avots *A1* – ogļu sastāvu ierašanās punkts, *B1, B2* un *B3* – bunkuri, kas imitē attiecīgi pirmo pozīciju, bufera zonu un 2. pozīciju. Transporta elementi no *T1* līdz *T7* atbilst plūsmu objektu pārvietošanas procesa posmiem līdz ogļu termināla robežai. Punktā *Z1* notiek lokomotīves nomainīšana.



10. att. Ogļu termināla vienkāršota struktūra

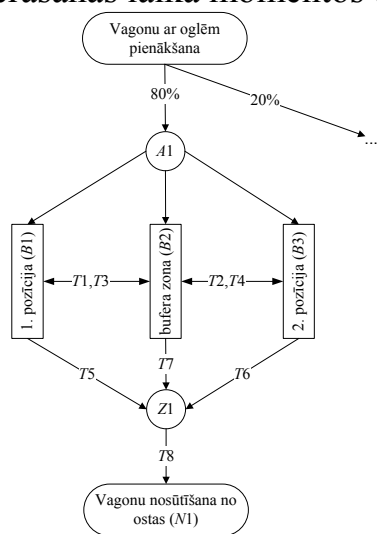
Transporta elements $T8$ imitē plūsmas objektu pārvietošanas posmu no ogļu termināla robežas līdz dzelzceļa termināla robežai. Transporta elementi ir nepieciešami tādu pārvietošanu imitācijai, kuru realizācijai ir nepieciešams resurss – lokomotīve un laiks. Modelī ir iekļauti vairāki pieņēmumi un vienkāršojumi. Piemēram, tukšas lokomotīves pārvietošanas laiks starp sastāviem netiek imitēts atsevišķi, bet tas tiek iekļauts jaunā sastāva kopējā pārvietošanas laikā, lokomotīves mašīnisti strādā bez pārtraukumiem un lokomotīves vienmēr ir darbaspējīgā stāvoklī. Procesa diagrammai atbilstošā kombinētā modeļa shēma ir aplūkojama 11. b) att.

Kombinētais modelis ir izveidots ar diskreto notikumu modelēšanas līdzekļa palīdzību, kas iekļauj sevī sistēmu dinamikas modelēšanas objektus, t.i., *rezervuārus* un *plūsmas*, un ļauj mainīt standarta komponentu īpašības, izmantojot iebūvēto skriptu.

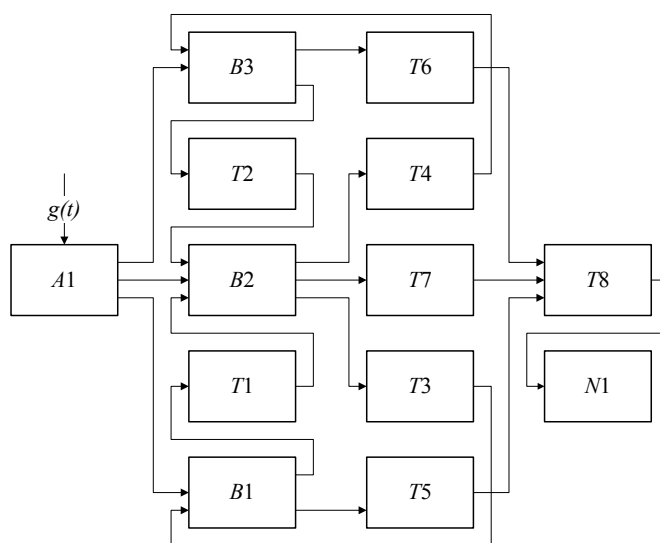
Kā tika konstatēts iepriekš, kombinētās pieejas ietvaros plūsmu procesi tiek noteikti, izmantojot intensitātes $\lambda(t)$ un kumulatīvās intensitātes funkcijas. Apskatītajā objektā, ogļu terminālā, plūsma ietver sevī viena tipa objektus – ogļu pusvagonus, bet dzelzceļa mezglā kopumā eksistē vairākas plūsmas, kas ietver sevī citus vagonu tipus. Modelī ienākošā plūsma tiek attēlota impulsu veidā, kas ir vagonu „porcijas” jeb sastāvi. Modeļa komponentu „atlikums” jeb saturs veidojas kā vagonu ienākošās un izejošās plūsmas starpība.

Ogļu termināla zonas kombinētais modelis ir izveidots uz 1. zonas procesa diagrammas pamata, kas attēlota 11. a) att.

Modelēsīm sastāvu ierašanos kā vagonu plūsmas impulsus. Tāda plūsmas ģenerēšana nodrošina vagonu skaita momentānu pieaugumu sastāva ierašanās laika momentos termināla teritorijā.



a) Ogļu termināla 1. zonas procesa diagramma



b) Ogļu termināla 1. zonas kombinētā modeļa struktūra

11. att. Ogļu termināla 1. zonas konceptuālā modeļa shematisks attēlojums

Kombinētā modeļa plūsmas avots $A1$ imitē vagonu plūsmas porciju ierašanos sistēmā. Laika intervāli starp plūsmas porcijām ir gadījuma lieluma vērtības, un ierašanās laika momentus ir iespējams noteikt, lietojot tradicionālas diskrētu notikumu programmatūras objektu avotu.

Pēc ierašanās ogļu terminālā vagonu sastāvi tiek ievietoti vienā no divām izkraušanas pozīcijām $B1$, $B3$ vai bufera zonā $B2$. Termināla kombinētajā modelī gan bufera zona, gan izkraušanas pozīcijas tiek modelētas kā bunkuri. Bunkuri tiek realizēti ar diviem diskrētu notikumu sistēmu (DNS) modelēšanas programmatūras nestandarta objektiem – *Tank* un *Pipe*, kas izpilda visas bunkura funkcijas: *Tank* nodrošina bunkura apjoma modelēšanu un *Pipe* – ienākošo un izejošo vagonu plūsmas ar noteiktām intensitātēm.

Transportēšanas laiks starp avotu $A1$ un bunkuriem $B1$, $B2$ un $B3$ netiek ņemts vērā, un diskrētu objektu plūsmas objekti momentāni tiek ievietoti vienā no diviem bunkuriem $B1$ vai $B2$, kas imitē iekraušanas/izkraušanas operācijas, vai bunkurā – bufera zonā – $B3$, ja bunkuri $B1$ un $B2$ nav tukši. Vienā bunkurā ievietotas plūsmas porcijas apjoms ir vienāds ar vagonu skaitu. Bunkurs tiek izvēlēts atkarībā no uzkrātajiem modelēšanas rezultātiem, t.i., nākamā plūsmas porcija tiek ievietota bunkurā, kura noslodzes koeficients uz kārtējās porcijas ierašanās laika momentu ir mazāks. Izejošo plūsmu intensitāte $\lambda_{1,2}^{iz}$ ir vienāda abiem bunkuriem un tās vērtība ir 25 vagoni/stundā vai 0,416(6) vagoni/minūtē.

Pēc iekraušanas/izkraušanas operācijām vai pēc gaidīšanas ir jāmodelē dažādas pārvietošanas, piemēram, no izkraušanas pozīcijas līdz ogļu termināla robežai. Pārvietošanas procesa posmus ir iespējams imitēt ar transporta elementiem, kas DNS modelēšanas vidē tiek realizēti ar objektu *Process Oven* un *Tank* kombināciju.

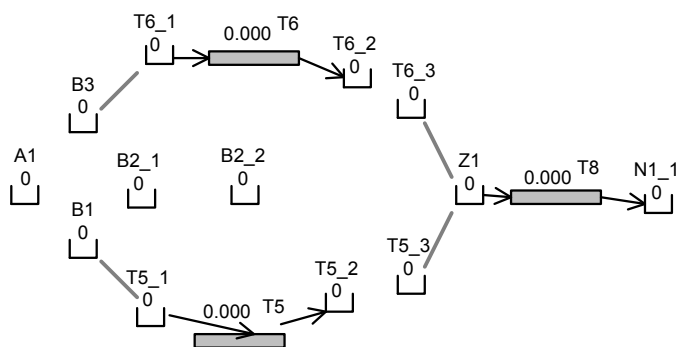
Pēc transportēšanas līdz ogļu termināla robežai notiek transportēšana līdz dzelzceļa mezgla robežai, kas aizņem vidēji 32,5 minūtes vienam sastāvam. Šis procesa posms tiek modelēts kā vēl viens transporta elements - $T8$.

Pēc visu procesa posmu modelēšanas noteka $M1$ imitē plūsmas beigšanos.

Izstrādātā kombinētā modeļa attēls ir aplūkojams 12. att.

Kombinētās modelēšanas pieejas izstrādes procesā tika izveidoti dažādas sarežģītības modeļi, kas imitē pieostas dzelzceļa transporta mezgla darbības gan kopumā, gan tā atsevišķu rajonu darbību. Šajā nodaļā ir apskatīti un izanalizēti iegūtie mezgla kopējie un ogļu termināla diskrētu notikumu modeļu dati un ogļu termināla kombinētā modeļa dati, kā arī savstarpēji tie salīdzināti.

Skaitliskie funkcionēšanas procesa raksturojumu novērtējumi ir apkopoti 4. tabulā. Salīdzināšanai ir izvēlēti modeļa objektu raksturojumi, kas tiek izmantoti modelējamā objekta funkcionēšanas efektivitātes analīzei.



12. att. Ogļu termināla 1. zonas kombinētā modeļa attēls

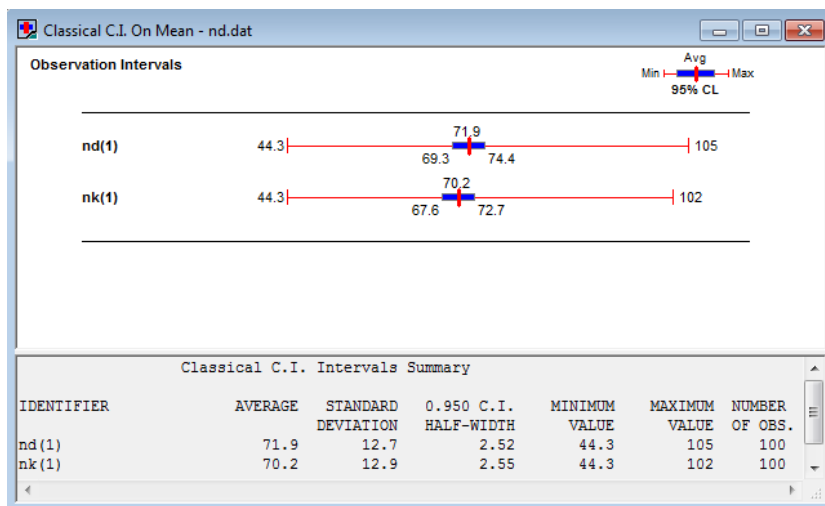
Apskatītajā modelī tiek novērtēta iekraušanas/izkraušanas pozīciju noslodze un ostas lokomotīvu noslodze.

Tika izpildīta modelēšanas rezultātu salīdzināšana, kura ļauj apgalvot, ka diskrētu notikumu un kombinētā modeļa raksturojumu vidējo vērtību atšķirība nav statistiski nozīmīga. Raksturojumu novērtējumu salīdzināšanas piemērs ir aplūkojams 13. att.

4. tabula

Diskrētu notikumu un kombinētā modeļa raksturojumu novērtējumi no 100 mēģinājumiem ar ticamības varbūtību 95%

Raksturojuma nosaukums	Diskrētu notikumu modelis	Kombinētais modelis
Summārā divu apstrādes pozīciju noslodze (%)	71,85±2,55	70,19±2,63
Kopējais termināla apstrādāto plūsmas objektu daudzums (vagoni)	578,34±21,20	582,04±20,99
Brīvostas lokomotīves noslodze (%)	21,06±0,78	21,30±0,79
Otras lokomotīves noslodze (%)	22,50±0,82	23,08±0,85
Vidējais apstrādes operāciju skaits modelī	578,34±21,20	14,20±0,52



13. att. Diskrētu notikumu un kombinētā modeļa apstrādes pozīciju noslodzes novērtējumu salīdzināšana ar varbūtību 95%

Šajā nodaļā ir realizēta kombinētā modeļa komponentes DNS modelēšanas pakotne, ir izstrādāts MPAS kombinētais modelis un iegūti tā modelēšanas rezultāti, ir nodefinēti to prezentācijas un interpretācijas veidi.

Pēc paveiktās modeļa izstrādes var secināt, ka kombinēto pieeju ir iespējams lietot MPAS modelēšanai; kombinētajā pieejā bāzēti modeļi ir efektīvi pielietojami un ļauj veikt MPAS imitāciju un raksturojumu uzticamu novērtēšanu.

DARBA GALVENIE REZULTĀTI

Promocijas darbā ir izstrādāta kombinētā modelēšanas pieeja, kas ir paredzēta tādu materiālo plūsmu apstrādes sistēmu modelēšanai, kuras tiek formalizētas tā, ka diskrētu notikumu sistēmas, un tajās novērotās materiālās plūsmas ir attēlojamas kā gabaliem konstantas laika funkcijas. Pieveja ir balstīta uz materiālo plūsmu apstrādes sistēmas elementu apkopotu aprakstīšanu. Pieejas ietvaros tiek lietota materiālo plūsmu vienkāršota formalizācija, kas veicina modeļa funkcionēšanas efektivitātes paaugstināšanos, samazinot ar notikumu apstrādi saistīto aprēķinu apjomu.

Pētījumā ir izstrādāts pieejas pilnīgais un korektais teorētiskais pamatojums. Tradicionālās imitācijas modelēšanas pieejas nodrošina objektu plūsmu modelēšanu atšķirīgos detalizācijas līmeņos. Taču kombinētā MPAS modelēšanas pieeja nodrošina tādu modeļu veidošanu, kas ļauj veikt efektīvāku pētīšanu, salīdzinot ar tradicionālajām pieejām.

Risinot promocijas darba uzdevumus, ir sasniegti šādi rezultāti:

- Izveidotais materiālo plūsmu teoriju un materiālo plūsmu tipu apskats ir ņemts par pamatu izmantoto materiālo plūsmu formalizācijas veidu un materiālo plūsmu apstrādes sistēmu jaunā funkcionēšanas principa definēšanai.
- Paveiktā imitācijas modelēšanas pieeju salīdzinošā analīze materiālo plūsmu apstrādes sistēmu modelēšanas jomā ir ļāvusi noteikt pieeju vājās vietas un izvirzīt prasības materiālo plūsmu apstrādes sistēmu (MPAS) modelēšanai.
- Jaunā galveno komponentu kopa un to darbības algoritmi nodrošina MPAS konceptuālā modeļa izstrādi, kuru veic kombinētās pieejas ietvaros.
- Izstrādātā materiālo plūsmu apstrādes sistēmu kombinētā modelēšanas pieeja apvieno diskrētu notikumu laika skaitīšanas principu ar stāvokļa mainīgajiem, kurus raksturo gabaliem lineāras izmaiņas. Salīdzinājumā ar tradicionālo diskrētu notikumu modelēšanas pieeju tas ļauj efektīvāk modelēt MPAS.
- Izstrādātie komponentu darbības algoritmi, atbilstošie stāvokļa mainīgo pārveidošanas noteikumi un funkcionēšanas raksturojumu novērtējumu formulas nodrošina MPAS kombinētu modeļu izstrādi un to pielietojumu modelējamo sistēmu analīzei.

- Izstrādātās MPAS kombinētās pieejas aprobācija veikta ogļu termināla lietišķā pētījumā. Iegūtie rezultāti apliecina pieejas un izstrādātā kombinētā modeļa izmantošanas efektivitāti. Apstrādājamo notikumu skaits tiek būtiski samazināts, vienlaikus nodrošinot precīzu funkcionēšanas procesa raksturojumu aprēķinu.

Izstrādāto pieeju var pielietot MPAS analīzei gadījumos, kad ir apgrūtināta citu pieeju pielietošana ražošanā, loģistikā un citās materiālo plūsmu pastāvēšanas sfērās.

Pēc darba rezultātu apkopošanas ir iespējams saskatīt tālākas piedāvātās pieejas pilnveidošanas un attīstīšanas iespējas, piemēram: a) kombinētās pieejas specializētas modelēšanas programmatūras izstrāde; b) kombinētās pieejas pielietošanas sfēras paplašināšana; c) kombinēto modeļu vizualizācijas koncepcijas izstrāde.

GALVENIE INFORMĀCIJAS AVOTI

1. Banks J., Carson J. S. II, Nelson B. L. and Nicol D.M. Discrete-Event System Simulation. 4th ed. - Upper Saddle River: Prentice-Hall, Inc., 2004. - 608 p.
2. Bodner D. A., Wang K., Xu S. Advanced Decision Logic in Simulation of Material Flow Processing Networks// Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference. - Orlando: eds. Kuhl M. E., Steiger N. M., Armstrong F. B., Joines J. A., 2005. - 1359-1365 pp.
3. Burghout W. Hybrid microscopic-mesosopic traffic simulation: Doctoral Dissertation. - Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology, 2004. - 185 p.
4. Checkland P. Systems Thinking, Systems Practice. - Chichester: John Wiley & Sons, 1981. - 344 p.
5. Damiron C., Nastasi A. Discrete Rate Simulation Using Linear Programming// Proceedings of Winter Simulation Conference. - Miami: eds. Jefferson T., Fowler J., Mason S. et. al., 2008. - 740-749 pp.
6. Hangos K.M., Cameron I. Process Modelling and Model Analysis. - Harcourt Place: Academic Press, 2001. - 543 p.
7. Imagine That Inc. ExtendSim User Guide. - San Jose: Imagine That Inc., 2007. - 780 p.
8. Joschko P., Page B., Wohlgemuth V. Combination of Job Oriented Simulation with Ecological Material Flow Analysis as Integrated Analysis Tool for Business Production Processes// Proceedings of Winter Simulation Conference. - Austin: eds. Dunkin A., Ingalls R., Yücesan E. et. al., 2009. - 1456-1465 p.
9. Karlsson, S. Man and materials flows - towards sustainable materials management. - Uppsala: Uppsala University, 1997. - 52p.
10. Kouikoglou V.S., Phillis Y. A. Hybrid Simulation Models of Production Networks. - New York: Kluwer Academic, 2001. - 206 p.
11. Law A. M. Simulation Modeling and Analysis. - Boston: McGraw-Hill Higher Education, 4th ed., 2007. - 768 p.
12. Liljenström H., Svedin U. Micro meso Macro: Addressing Complex Systems Couplings. - River Edge: World Scientific Publishing Company, Inc., 2005. - 375 p.

13. Material flow systems in manufacturing. Edited by Tanchoco J.M.A. - Springer, 1994 - 420 p.
14. Mihailovs F., Pečerska J. Imitation Modelling of Processes of a Coal Terminal// Proceedings of 11th International Conference "Maritime Transport and Infrastructure - 2009". - Rīga: Latvian Council of Science, 2009. - 55.-60. lpp.
15. Moeller A. Continuous Simulation in Material Flow Networks// Complexity and Integrated Resources Management. Transactions of the 2nd Biennial Meeting of the International Modelling and Software Society. - Osnabrück: eds. Pahl-Wostl C., Schmidt S., Rizzoli A. E., Jakeman A. J., 2004. - 379 - 384 pp.
16. Moeller A., Prox M., Schmidt M. Simulation and Optimization of Material and Energy Flow Systems// Proceedings of Winter Simulation Conference. - Austin: eds. Dunkin A., Ingalls R., Yücesan E. et. al., 2009. - 1444-1455 p.
17. Moore J. H., Weatherford L. R. Decision Modeling with Microsoft Excel. - Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001. - 1018 p.
18. Mudriková A., Košťál P. Material Flow in Automated Manufacturing. Machine Design, 2010, 331-334 pp.
19. Pecherska J. Material Flow Simulation Using Discrete-Event and Mesoscopic Approach// Proceedings of UKSim 12th International Conference on Computer Modelling and Simulation. - Kembriža: CPS IEE Computer Society, 2010. - 159.-162. lpp.
20. Pecherska J., Tolujew J. Development of Mesoscopic Simulation Model for Discrete Object Flow Analysis in a Logistic System// Proceedings of the 3rd International Doctoral Student Workshop on Logistics. - Magdeburga: The Otto von Guericke University, 2010. - 37.-41. lpp.
21. Reggelin T. A Mesoscopic Approach to Modeling and Simulation and its Application for a Logistics Hub// COMEC. Santa Clara, 2008.
22. Research and Practical Issues of Enterprise Information Systems II Volume 2. Eds. Xu L., Tjoa A.M., Chaudhry S. - New York: Springer, 2008. - 808 p.
23. Robinson S. Simulation. The Practice of Model Development and Use. - Chichester: John Wiley&Sons, 2004. - 316 p.
24. S. Sarker, Lee A.S. Does the Use of Computer-Based BPC Tools Contribute to Redesign Effectiveness? Insights From a Hermeneutic Study// IEEE Transactions on Engineering Management. - 2006. - Vol. 53, No. 1. - 130-145 p.
25. Saouma V., Sivaselvan M.V. (editors). Hybrid simulation : theory, implementation and applications. - London: Taylor & Francis Group, 2008. - 226 p.
26. Savrasov M. Flow Systems Analysis: Methods and Approaches// Computer Modelling and New Technologies. - Rīga: Transport and Telecommunication Institute, 2008. - Vol.12, No.4. - 7 - 15 pp.
27. Savrasov M. Overview of Flow Systems Investigation and Analysis Methods// Proceedings of the 8th International Conference "RELIABILITY and STATISTICS in TRANSPORTATION and COMMUNICATION. - Riga, 2008. - 273-280 pp.
28. Savrasovs M. Urban Transport Corridor Mesoscopic Simulation// Proceedings of 25th European Conference on Modelling and Simulation. - Krakow: Cracow University of Technology, 2011. - 587 - 593 pp.
29. Schenk, M., Tolujew, J., Reggelin, T. Mesoskopische Simulation von Flusssystemen: algorithmisch steuern und analytisch berechnen. In: Beiträge zu einer Theorie der Logistik / P. Nyhuis (Hrsg.). - Springer, 2008. - 463 - 485. p.

30. Shou Bo X. A New Discipline in the Era of Knowledge Economy: Material Flow Science and Technology// Systems Research and Behavioral Science. - 2006. - Nr.23. - 251 - 257 pp.
31. Shoubo X. The concept and theory of material flow// Information Systems. Frontiers archive. 2008. Volume 10, Issue 5, November. - 601 - 609 pp.
32. Song B., Xu S. The Theory of Material Flow Substance// Systems Research and Behavioral Science. - 2009. - Nr.26. - 251-258 pp.
33. The Site about Railways of Russia, C.I.S., and the Baltics.http://www.parovoz.com/gallery/LV/20071208_110863.jpg
34. Tolujew J., Alcalá F. A Mesoscopic Approach to Modeling and Simulation of Pedestrian Traffic Flows// Proceedings of the 18th European Simulation Multiconference, SCS International. - Ghent: Horton G (ed), 2004. 123 - 128 pp.
35. Tolujew J., Savrasov M. Transport System Mesoscopic Model Validation Using Simulation on Microlevel// Proc. of the 8th International Conference, Reliability and Statistics in Transportation and Communication. - Riga: Transport and Telecommunication Institute, Kabashkin I. V., Yatskiv I. V. (eds.), 2008. - 297-304 pp.
36. Wohlgemuth V., Page B., Kreutzer W. Combining Discrete Event Simulation and Material Flow Analysis in a Component-Based Approach to Industrial Environmental Protection// Environmental Modelling & Software. - 2006. - Nr. 21. - 1607-1617 pp.
37. Zeigler B. P. Multifaceted Modelling and Discrete Event Simulation. - London: Academic Press, 1984. - 372 p.
38. Zeigler B. P. Theory of Modelling and Simulation. - Malabar: Krieger Pub Co, 1984. - 435 p.
39. Zeigler B. P., Praehofer H. and Kim T.G. Theory of modelling and simulation. Integrating Discrete event and Continuous Complex Dynamic Systems. - San Diego: Academic Press, 2000. - 510 p.
40. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. - Москва: Наука, 1968. -356 с.
41. Бусленко Н.П.,Юркевич О.М. Об операциях над агрегатами в сложных системах// Техническая кибернетика. - 1964. - Nr.2.
42. Толуев Ю.И. Имитационное моделирование логистических сетей // Логистика и управление сетями поставок. - 2008. - № 2/25. - 53-63 с.
43. Толуев Ю.И., Некрасов А.Г., Морозов С.И. Анализ и моделирование материальных потоков в сетях поставок // Интегрированная логистика. - 2005, №5. - 7-14 с.
44. Швецов В.И. Математическое моделирование транспортных потоков// Автоматика и телемеханика. - 2003. - № 11. - 3 - 46 с.