

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

**Jeļena Pečerska**

**Kombinētā pieeja materiālo plūsmu  
apstrādes sistēmu modelēšanai**

**PROMOCIJAS DARBS**

**2012**

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

Datorzinātnes un informācijas tehnoloģijas fakultāte

Informācijas tehnoloģijas institūts

**Jelena Pečerska**

Vadības informācijas tehnoloģijas doktora programmas doktorante

**KOMBINĒTĀ PIEEJA MATERIĀLO PLŪSMU**

**APSTRĀDES SISTĒMU MODELĒŠANAI**

**Promocijas darbs**

Zinātniskā vadītāja

Dr.habil., prof.

G. MERKURJEVA

Zinātniskais konsultants

PD Dr. rer. nat. habil. J. TOLUJEVS

**Rīga 2012**

Šis darbs ir izstrādāts Rīgas Tehniskajā universitātē, Informācijas Tehnoloģijas institūtā  
Zinātniskā vadītāja Dr.habil., prof. Gaļina MERKURJEVA  
Zinātniskais konsultants PD Dr. rer. nat. habil. Jurijs TOLUJEVS

Šis darbs ir iesniegts RTU Informācijas tehnoloģijas zinātņu nozares Promocijas padomei  
„RTU P-07” 2012. gada jūnijā

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

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE  
DATORZINĀTNES UN INFORMĀCIJAS TEHNOLOĢIJAS FAKULTĀTE

Informācijas tehnoloģijas institūts

KOMBINĒTĀ PIEEJA MATERIĀLO PLŪSMU  
APSTRĀDES SISTĒMU MODELĒŠANAI

Jeļena Pečerska

**Anotācija**

Promocijas darbs ir izstrādāts materiālu plūsmu apstrādes sistēmu imitācijas modelēšanas jomā. 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 pieejas, kuras ir pamatotas uz diskrētiem notikumiem.

Promocijas darbā ir apskatīti un klasificēti materiālo plūsmu tipi un to formalizācijas veidi, ir izpildīta materiālo plūsmu apstrādes sistēmu nozīmes analīze ražošanā un loģistikā. Ir paveikts materiālo plūsmu apstrādes sistēmu tradicionālo modelēšanas paradigmu salīdzinošs pētījums, matemātiski noformulēta kombinētās pieejas problēmas nostādne, un definēti problēmas nostādnes pieņēmumi.

Pamatojoties uz izpildītajiem apskatiem, 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 kombinētu modeļu izstrādi un to pielietošanu modelējamo sistēmu analīzei.

Uz jaunas pieejas bāzes ir izstrādātas modeļa veidošanas pamatkomponentes un sistēmas modeļi kombinētās modelēšanas pieejas realizācijai. Ir aprakstīta izstrādātās kombinētās modelēšanas pieejas aprobācija, veicot materiālo plūsmu apstrādes sistēmas – ogļu termināla – lietišķā pētījuma taktiskā plāna realizāciju.

Promocijas darba apjoms – 160 lappuses, 14 tabulas, 65 attēli un 8 pielikumi

RIGA TECHNICAL UNIVERSITY  
FACULTY OF COMPUTER SCIENCE AND INFORMATION TECHNOLOGY  
Institute of Information Technology  
A COMBINED APPROACH TO THE SIMULATION OF  
MATERIAL FLOW HANDLING SYSTEMS

Jeļena Pečerska

**Abstract**

The thesis is elaborated in the area of modelling and simulation and deals with the development of a new combined approach to the simulation of material flow handling systems. The research objects are material flow handling systems, which could be formalised as the discrete event systems. The research subject is a set of material flow handling systems traditional and combined modelling methods, based on the discrete events.

The types of material flows and the ways of flow formalisation are examined and classified, the importance of material flow handling systems in manufacturing and logistics is analysed. The comparative analysis of material flow handling systems traditional modelling paradigms is carried out, the mathematical formulation of the problem as well as the necessary assumptions are defined.

On the basis of the surveys a combined approach to the simulation of the material flow handling systems is developed. The new approach unites the discrete event system simulation time tracking principle with the state variables, characterized by the piecewise-linear changes. The operation algorithms of the components, the corresponding state variable conversions and performance measure evaluation formulas are developed what provide possibility to create combined models and to apply these models for the simulated systems analysis.

Basic model components and system models for the realization of the combined approach are worked out. The developed combined approach approval based on the MFHS example - the realization of the tactical plan for the applied research of a coal terminal is described.

The doctoral thesis contains 160 pages, 14 tables, 65 figures and 8 appendixes.

## SATURS

IEVADS .....	11
Tēmas izvēles aktualitātes pamatojums .....	11
Darba mērķis un uzdevumi .....	13
Pētījuma objekts un priekšmets .....	14
Pētījuma metodes un teorētiskais (metodoloģiskais) pamatojums .....	14
Promocijas darba zinātniskā novitāte .....	15
Aizstāvēšanai izvirzāmās tēzes .....	15
Publikācijas .....	15
Ziņojumi zinātniskajās konferencēs un semināros .....	16
Darba apjoms un īsas nodaļu satura anotācijas .....	17
1. MATERIĀLĀS PLŪSMAS UN MATERIĀLO PLŪSMU APSTRĀDES SISTĒMAS ...	18
1.1. Materiālās plūsmas jēdziens .....	18
1.2. Materiālo plūsmu objekti .....	27
1.3. Materiālo plūsmu apstrādes sistēmas .....	29
1.4. Materiālo plūsmu tīkli .....	30
1.5. Materiālo plūsmu aprakstīšanas veidi .....	31
1.6. Kopsavilkums un secinājumi .....	35
2. MATERIĀLO PLŪSMU MODELĒŠANAS PARADIGMAS .....	37
2.1. Analītiskā modelēšana .....	38
2.2. Imitācijas modelēšana .....	42
2.2.1. <i>Sistēmu dinamika</i> .....	42
2.2.2. <i>Diskrētu notikumu sistēmu modelēšana</i> .....	49
2.2.3. <i>Kombinētā modelēšanas pieeja</i> .....	58
2.2.4. <i>Hibrīdā diskrētu notikumu modelēšanas pieeja</i> .....	61
2.2.5. <i>Diskrēto objektu plūsmu detalizācijas līmeni imitācijas modeļos</i> .....	62
2.2.6. <i>Kombinētā transporta tīklu modelēšanas pieeja</i> .....	65
2.2.7. <i>Mūsdienu pētījumi kombinētas modelēšanas pielietošanas jomā</i> .....	66
2.3. Alternatīvās modelēšanas metodes .....	67
2.3.1. <i>Montekarlo modelēšana</i> .....	67
2.3.2. <i>Stāvokļu/darbību modelēšanas pieeja</i> .....	68
2.3.3. <i>Aģentu modeļi</i> .....	68
2.3.4. <i>Tīkla modeļi</i> .....	69
2.3.5. <i>Materiālo plūsmu tīkli</i> .....	69

2.3.6. <i>Piltuvveida loģistikas sistēmu modeļi</i> .....	70
2.4. Kopsavilkums un secinājumi .....	71
3. MATERIĀLO PLŪSMU KOMBINĒTĀS MODELĒŠANAS PIEEJAS IZSTRĀDE .....	74
3.1. Materiālo plūsmu attēlošana kombinētajā pieejā.....	75
3.2. Kombinētā modeļa galvenās komponentes un to darbības algoritmi .....	77
3.2.1. <i>Kombinētu modeļu pamatprocesu īpašības</i> .....	77
3.2.2. <i>Komponente „avots”</i> .....	78
3.2.3. <i>Komponente „bunkurs”</i> .....	82
3.2.4. <i>Komponente „transporta elements”</i> .....	91
3.2.5. <i>Komponente „noteka”</i> .....	92
3.3. Kombinētā modeļa komponentu izveidošanas un mijiedarbības principi.....	92
3.4. Kombinētu modeļu pamatstruktūras attēlošana .....	93
3.5. Kombinētu modeļu rezultātu veidi .....	94
3.6. Kopsavilkums un secinājumi .....	96
4. IZSTRĀDĀTĀS PIEEJAS PIELIETOJUMS MATERIĀLO PLŪSMU APSTRĀDES SISTĒMAS MODELĒŠANAI .....	98
4.1. Lietojuma pētījuma problēmas formulēšana .....	98
4.2. Dzelzceļa mezgla konceptuālais modelis .....	100
4.3. Prasības modelēšanas programmatūrai .....	102
4.4. Kombinētā modeļa izstrāde .....	103
4.5. Imitācijas eksperimentu realizācija.....	108
4.5.1. <i>Dzelzceļa mezgla diskrētu notikumu imitācijas modelis</i> .....	108
4.5.2. <i>Ogļu termināla diskrētu notikumu imitācijas modelis</i> .....	112
4.5.3. <i>Ogļu termināla kombinētais modelis</i> .....	114
4.5.4. <i>Izstrādāto modeļu rezultātu salīdzināšana</i> .....	118
4.6. Kopsavilkums un secinājumi .....	120
GALVENIE REZULTĀTI UN SECINĀJUMI .....	74
LITERATŪRAS SARAKSTS .....	123
PIELIKUMI.....	129
P1. Komponente „iekārta” diskrētu notikumu sistēmu modelēšanā.....	130
P2. Sarežģītu dinamisku sistēmu aprakstīšana uz agregātu bāzes .....	133
P3. <i>DEVS</i> formālisms un gabaliem lineārā agregāta shēma .....	136
P4. Modelējamā dzelzceļa mezgla struktūra .....	140

P5. Pieostas dzelzceļa mezgla imitācijas modeļa galvenie parametri, struktūra un funkcionēšanas īpašības.....	141
P6. Ogļu termināla galvenie parametri un funkcionēšanas algoritma īpašības .....	143
P7. Kombinētā modeļa procesa diagramma, shēma un skripta fragments .....	152
P8. Modelēšanas rezultāti (diskrētu notikumu modelis, kombinētais modelis) .....	155

## ATTĒLI

1.1. att. Materiālo plūsmu vispārīga klasifikācija, adaptēts no [74].....	22
1.2. att. Materiālo plūsmu klasifikācija pēc <i>MFORT</i> atribūtiem, adaptēts no [83].....	23
1.3. att. Plūsmas trajektoriju piemēri.....	29
1.4. att. Sastāvu apstrādes procesa diagrammas piemērs.....	34
1.5. att. Vagonu plūsmas laika diagrammas piemērs.....	34
1.6. att. Vagonu plūsmas intensitātes laika funkcijas piemērs.....	34
1.7. att. Vagonu plūsmas <i>Sankey</i> diagrammu piemēri.....	34
2.1. att. Modelējamās dināmiskās sistēmas attēls, adaptēts no [16].....	39
2.2. att. Transporta mezgla grafa modelis.....	41
2.3. att. Transporta mezgla rindu sistēmas tīkla modeļa fragments.....	41
2.4. att. Sistēmu dinamikas modeļa piemērs.....	43
2.5. att. Mainīgo aprēķini laika momentā $t_k$ , adaptēts no [19].....	45
2.6. att. Krājuma aproksimācija ar taisnes nogriežņiem.....	47
2.7. att. Stāvokļa mainīgā „krājums” trajektorijas piemērs.....	47
2.8. att. Uzņēmuma iekšējās loģistikas sistēmu dinamikas modelis un krājumu diagrammas no [71].....	49
2.9. att. <i>DEVS</i> modeļa trajektoriju piemērs.....	53
2.10. att. Krājumu sistēmas procesa diskrētu notikumu modeļa fragmenti.....	57
2.11. att. Modeļu trajektorijas, atkarībā no laika un stāvokļa diskretizācijas variantiem.....	60
2.12. att. Kombinētā modeļa ar mezoskopiskām plūsmām trajektoriju attēlošanas piemērs [40].....	65
2.13. att. Kombinētā modeļa ar mezoskopiskiem elementiem struktūras piemērs [40].....	65
2.14. att. Piltuvveida loģistikas sistēmas modeļa shēma, adaptēts no [93].....	71
3.1. att. Mezoskopisku plūsmu trajektorijas.....	77
3.2. att. Vienkanāla avota a) vienkāršotais attēls, b) izejas signāla piemērs.....	81
3.3. att. Vienkanāla bunkura vienkāršotais attēls.....	85
3.4. att. a) diskrētās iekārtas stāvokļa laika funkcija, b) bunkura ienākošās un c) izejošās plūsmas intensitātes, d) bunkura stāvokļa funkcija.....	88
3.5. att. Bunkura stāvokļa funkcijas $z_k(t)$ detalizācija noslodzes aprēķinam.....	89
3.6. att. Funkcijas $z_k(t)$ noteiktā integrāla aprēķins.....	89
3.7. att. Komponentes caurlaidspējas raksturojuma precizitātes novērtējums.....	89
3.8. att. Daudzkanālu bunkurs kā agregātu sistēma.....	91

3.9. att. Kombinētā modeļa komponentu apvienošanas piemērs .....	93
3.10. att. Kombinētā modeļa attēlošana agregātā veidā .....	95
4.1. att. Ogļu termināla vienkāršota struktūra .....	101
4.2. att. Ogļu termināla 1. zonas konceptuālā modeļa shematiskais attēlojums.....	104
4.3. att. DNS modelēšanas programmatūras objektu <i>Tank</i> un <i>Pipe</i> galvenie logi .....	106
4.4. att. DNS modelēšanas programmatūras objekta <i>Process Oven</i> parametru noteikšanas logi .....	107
4.5. att. Ogļu termināla 1. zonas kombinētā imitācijas modeļa attēls .....	108
4.6. att. Dzelzceļa mezgla diskretu notikumu modeļa laika diagramma trijos mēģinājumos. Vagonu skaits uzkrāšanas ceļos modelēšanas mēģinājumu sākumā.....	109
4.7. att. Dzelzceļa mezgla diskretu notikumu modeļa vagonu skaita uzkrāšanas ceļos kumulatīvo vidējo vērtību laika funkcijas.....	111
4.8. att. Diskretu notikumu modeļa 1. un 2. apstrādes pozīcijas raksturojumu novērtējumi .	114
4.9. att. Kombinētā modeļa avota <i>A1</i> ienākošās plūsmas laika diagramma .....	115
4.10. att. Kombinētā modeļa bunkuru <i>B1</i> un <i>B3</i> raksturojumu novērtējumi.....	116
4.11. att. Kombinētā modeļa transporta elementu <i>T5</i> , <i>T6</i> un <i>T8</i> raksturojumu novērtējumi..	116
4.12. att. Transporta elementu <i>T5</i> , <i>T6</i> un <i>T8</i> plūsmu laika diagrammas .....	118
4.13. att. Diskretu notikumu un kombinētā modeļa objektu laika diagrammas .....	119
P1.1. att. Vienkāršotas diskretas iekārtas stāvokļa laika diagrammas piemērs .....	131
P2.1. att. Agregāta shematiskais attēls.....	134
P4.1. att. Modelējamā dzelzceļa mezgla struktūras vienkāršots attēlojums .....	140
P5.1. att. Laika intervāla empīriskā sadalījuma histogramma.....	142
P6.1. att. Ogļu vagonu sastāvu ierašanās laika intervāla empīriskā sadalījuma blīvuma funkcijas histogramma .....	143
P6.2. att. Ogļu vagonu sastāvu ierašanās laika intervāla empīriskā sadalījuma parametru novērtējumi .....	143
P6.3. Ogļu vagonu sastāvu ierašanās laika intervāla autokorelācijas funkcija.....	144
P6.4. att. Ogļu vagonu sastāvu vagonu skaita empīriskā sadalījuma masas funkcija .....	144
P6.5. att. Ogļu vagonu sastāvu vagonu skaita empīriskā sadalījuma parametru novērtējumi	145
P6.6. att. Ogļu vagonu sastāvu vagonu skaita empīriskā sadalījuma autokorelācijas funkcija .....	145
P6.7. att. Pieostas dzelzceļa transporta mezgla diskretu notikumu modeļa attēls.....	146
P7.1. att. Ogļu termināla 1. zonas procesa vienkāršota diagramma.....	152
P7.2. att. Ogļu termināla 1. zonas kombinētā modeļa shēma.....	153

P7.3. att. Ogļu termināla 1. zonas kombinētā modeļa skripta fragments.....	154
P8.1. att. 1. izlases sadalījuma atbilstība dažiem teorētiskiem sadalījumiem.....	157
P8.2. att. 1. izlases sadalījuma atbilstības dažiem teorētiskiem sadalījumiem kvalitāte.....	157
P8.3. att. 1. izlases sadalījuma blīvuma funkcijas salīdzinājums ar normāla sadalījuma blīvuma funkciju.....	158
P8.4. att. 2. izlases sadalījuma atbilstība dažiem teorētiskiem sadalījumiem.....	158
P8.5. att. 2. izlases sadalījuma atbilstības dažiem teorētiskiem sadalījumiem kvalitāte.....	159
P8.5. att. 2. izlases sadalījuma blīvuma funkcijas salīdzinājums ar normāla sadalījuma blīvuma funkciju.....	159

## IEVADS

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*).

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.

Pēc *Eurostat* (Eiropas Savienības Statistikas birojs) datiem veiksmīgajā 2008. gadā pievienotā bruto vērtība (*GVA, Gross Value Added*) Eiropas Savienībā un Latvijā (skaitļi iekavās) veidojās no 20,1% (13,8%) ražošanā, no 6,5% (8,9%) celtniecībā un no 21,0% (29,8%) transportā un komunikāciju sfērās. Tas nozīmē, ka gan Eiropā, gan Latvijā pievienotā bruto vērtība lielākā mērā, t.i., 47,6% (52,5%) no kopējā apjoma [17], veidojas tautsaimniecības nozarēs, kur formējas un darbojas intensīvās materiālās plūsmas. Turklāt attiecīgā nozaru attīstības statistika apliecina, ka kopējam saražotās produkcijas apjomam šajās nozarēs piemīt pieaugšanas tendence: par 5% gadā – ražošanā (2003.-2008. g.), par 8 - 8.5% – transportā un par 7 % – noliktavu un pārvadājumu pakalpojumu sfērā (2006.-2008. g.) [17].

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 [1, 52, 63]. Tendences iemesls ir projektēšanas izdevumu samazināšanas un patērētāja kvalitātes paaugstināšanas nepieciešamība apstākļos, kad strauji pieaug konkurence pasaules produkcijas, transportēšanas un pakalpojumu tirgū. Šī tendence atspoguļo arī pieaugušo vadības speciālistu uzticību imitācijas modelēšanai, it īpaši stohastisko sistēmu modelēšanai, kā vienai no informācijas tehnoloģijas metodēm [21, 22, 37, 96 u.c.].

### **Tēmas izvēles aktualitātes pamatojums**

Dabas un sociālo procesu imitācijas modelēšanas lietišķo pētījumu efektivitāte balstās uz atbilstošu pieeju teorētiskajiem pamatiem [28]. Par nozīmīgu un perspektīvu virzienu imitācijas modelēšanā ir uzskatāma materiālo plūsmu apstrādes sistēmu (MPAS) modelēšanas

metožu attīstība. Materiālās plūsmas kā vispārizplatīti dažādas dabas sarežģītu sistēmu elementi nodrošina gan sistēmas elementu mijiedarbību, gan sistēmas saiti ar apkārtējo vidi, līdz ar to vairākas sarežģītās sistēmas var tikt interpretētas un analizētas kā materiālo plūsmu apstrādes sistēmas. Tādēļ praktiski visi mūsdienu imitācijas modelēšanas programmlīdzekļi piedāvā lietotājiem rīkus un komponentes materiālo plūsmu analīzei, aprakstīšanai, iekļaušanai imitācijas modeļos, rezultātu iegūšanai un vizualizācijai [62].

Neraugoties uz materiālo plūsmu modelēšanas konstrukciju pašsaprotamu iekļaušanu imitācijas modeļos, modelēšanas profesionāļu loka pārstāvji to izmantošanu bieži saprot un pielieto, izmantojot tradicionālās, t.i., nepārtrauktu sistēmu vai diskrētu notikumu sistēmu, modelēšanas pieejas [62]. Nepārtrauktu sistēmu modelēšanas pieejā plūsmas, tai skaitā materiālās, vienādojumos tiek modelētas kā mainīgo lielumu vērtības. Diskrētu notikumu sistēmu modelēšanas paradigmā materiālās plūsmas tiek interpretētas kā atsevišķo materiālā rakstura objektu jeb diskrēto objektu plūsmas.

Tradicionālo pieeju principiālā atšķirība var tikt izteikta, izmantojot sistēmas stāvokļa jēdzienu. Modeļa stāvoklis imitē sistēmas stāvokli un tiek interpretēts kā stāvokļa mainīgo, kas mainās laikā, kopa. Minētajām pieejām atbilst stāvokļa mainīgo interpretēšana kā nepārtraukto mainīgo vai gabaliem konstanto mainīgo, kas mainās īpašos laika momentos. Īpašos laika momentus sauc arī par diskrētu notikumu laika momentiem. Nepārtrauktie modeļi tiek lietoti galvenokārt nepārtrauktā stāvokļa sistēmu modelēšanai, bet diskrētu notikumu modeļi – sistēmu, kuru stāvoklis var tikt interpretēts kā diskrētais, t.i., diskrētu notikumu sistēmu jeb *DES* modelēšanai [55].

Abu tradicionālo imitācijas modelēšanas pieeju teorētiskie pamati ir noformējušies, taču pieeju pielietošana diskrētu notikumu sistēmu modelēšanai, kurās tiek novēroti nepārtrauktie stāvokļa mainīgie vai tādi stāvokļa mainīgie, kas var tikt interpretēti kā nepārtraukti, gabaliem konstanti vai gabaliem lineāri, ne vienmēr ir efektīva [31]. Pēdējo gadu laikā daži autori piedāvā lietišķos pētījumus, kas heuristiski izmanto alternatīvas pieejas stāvokļa izmaiņu noteikšanai [13, 84 u.c.]. Alternatīvas pieejas savā starpā atšķiras un parasti tiek realizētas kā kombinētās pieejas, t.i., kā diskrētu izmaiņu ieviešana nepārtrauktos modeļos un nepārtrauktu vai gabaliem lineāro stāvokļa mainīgo ieviešana diskrētos modeļos. Imitācijas modelēšanas teorijas publikāciju analīzes rezultātā tika konstatēts fakts, ka pēdējo gadu laikā kombinētu pieeju jomā praktiski netiek veikti teorētiskie pētījumi, kaut gan teorētiskā pamatojuma nepieciešamība netieši izpaužas imitācijas modelēšanas sistēmu specifiskajās funkcijās [25, 31].

Diskrētu objektu plūsmas ir novērojamas visās dabas un mākslīgajās materiālās

sistēmās, kas ir imitācijas modelēšanas pētījumu objekti, un tiek iekļautas modeļos kā to obligātas un neatņemamas sastāvdaļas [4]. Objektu plūsmu pētīšanai ir svarīga nozīme sarežģītu sistēmu funkcionēšanas padziļinātā analizē [51]. Imitācijas modeļu intensīva pielietošana uzņēmējdarbībā rada tādu metožu un pieeju izstrādes nepieciešamību, kas varētu piedāvāt teorētisku pamatojumu alternatīvām objektu plūsmu formalizācijas un modelēšanas pieejām un nodrošināt savstarpēji saprotamu saskarsmi starp konkrētas lietišķās un modelēšanas nozares speciālistiem. Materiālo plūsmu apstrādes sistēmu imitācijas modelēšanas alternatīvo kombinēto teorētisko pieeju realizācija modelēšanas projektos var saīsināt modeļa konceptualizācijas un programmēšanas posmu ilgumus un paaugstināt modeļa ieejas datu, paša modeļa un modelēšanas rezultātu uzskatāmību [69]. Pētījums virzīts uz objektu plūsmu raksturīgo īpašību atklāšanu un analīzi materiālo plūsmu apstrādes sistēmās un var veicināt materiālo plūsmu apstrādes sistēmu modelēšanas pieejas attīstīšanu kā esošo modelēšanas pieeju ietvaros, tā arī kā atsevišķu imitācijas modelēšanas virzienu.

Kombinētā modelēšanas pieeja var paplašināt diskreto notikumu sistēmu modelēšanas pielietošanas iespējas materiālo plūsmu apstrādes sistēmu modelēšanas un analīzes jomā un paaugstināt modeļu izstrādes procesa efektivitāti un modelēšanas praktisko nozīmīgumu, turklāt pieejas realizācijas iespējamība var tikt nodrošināta ar modernu imitācijas modelēšanas programmatūru, kas iekļauj pieejai nepieciešamās funkcijas [25].

Promocijas darba tēmas aktualitāte ir saistīta ar materiālo plūsmu apstrādes sistēmu modelēšanas pieeju pilnveidošanas nepieciešamību.

## **Darba mērķis un uzdevumi**

Diskreto 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 [4, 6, 31, 32, 62, 71, 87, 107, u.c.].

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

- apkopotās pieejas pielietošanu materiālo plūsmu apstrādes sistēmu elementu aprakstīšanai;
- notikumu skaitu un ar notikumu apstrādi saistīto aprēķinu apjomu samazināšanu;

- pieejas pielietošanas rezultātā iegūto novērtējumu pareizumu, kas atbilst diskrētu notikumu sistēmu modelēšanas pieejas novērtējumiem.

Modelēšanas pieejai jābūt sistēmiskai, pietiekami vienkāršai – tai jāņem vērā esošā diskrētu notikumu sistēmu modelēšanas teorija, jābūt efektīvai un praktiski realizējamai. Pieejas pielietošanas 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**

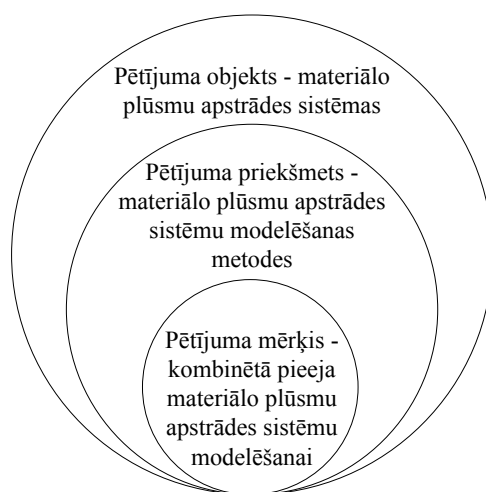
Pētījuma objekts ir tādas materiālo plūsmu apstrādes sistēmas, kas var tikt formalizētas kā diskrētu notikumu sistēmas.

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

Pētījuma objekta, priekšmeta un mērķa shematiskais apvienojums ir aplūkojams att. I.1.

### **Pētījuma metodes un teorētiskais (metodoloģiskais) pamatojums**

Šajā darbā teorētisko pētījumu veikšanai izmantota sistēmu teorija, diskrētā matemātika, sistēmu dinamika un diskrētu notikumu sistēmu modelēšana. Promocijas darbā izstrādātā kombinētā modeļa realizācijai izmantotas imitācijas modelēšanas un matemātiskās statistikas metodes.



**I.1. att. Promocijas darba kategoriju apvienojums**

## 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., [3, 4, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14] no pretendentes publikāciju saraksta. Publikācijas var nosacīti sagrupēt sekojoši: metodiskās publikācijas [1, 5, 6, 8, 9, 12], lietojuma pētījumu rezultātu prezentācijas [2, 7, 11] un teorētiskās, kas saistītas ar jaunas imitācijas modelēšanas pieejas izstrādi [3, 4, 8, 13, 14].

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 pielietojšanas 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:

1. RTU 42. starptautiskā zinātniskā konference. Apakšsekcija “Informācijas tehnoloģija un vadības zinātne”, Rīga, 2001 .gada 11.-13. oktobrī.
2. RTU 43. starptautiskā zinātniskā konference. Apakšsekcija “Informācijas tehnoloģija un vadības zinātne”, Rīga, 2002 .gada 10.-14. oktobrī.
3. RTU 45. starptautiskā zinātniskā konference. Apakšsekcija “Informācijas tehnoloģija un vadības zinātne”, Rīga, 2004 .gada 12.-14. oktobrī.
4. International conference “European Conference of Modelling and Simulation”, ECMS 2005 (Riga, Latvia, June, 2005).
5. 11th International conference Maritime Transport and Infrastructure, Rīga, 2009 .gada 23.-24. aprīlī.
6. 12th Conference of Young Scientists of Lithuania, „Science – Lithuania’s Future. TRANSPORT“. Viļņa, Lietuva, 2009. gada 14. maijā.

7. UKSim2010. UKSim 12th International Conference on Computer Modelling and Simulation. Cambridge, United Kingdom 24-26 March 2010.
8. 3rd International Doctoral Student Workshop on Logistics. Magdeburga, Vācija, 2010. g. 17. jūnijs.

## **Darba apjoms un īsas nodaļu satura anotācijas**

Promocijas darbs satur ievadu, 4 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 8 pielikumus, 65 attēlus un 14 tabulas, kopā 160 lappuses. Literatūras sarakstā ir 107 avoti. Promocijas darba struktūra ir šāda:

**Ievads** satur tēmas aktualitātes pamatojumu, darba mērķa un uzdevumu formulējumu, 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***

# 1. MATERIĀLĀS PLŪSMAS UN MATERIĀLO PLŪSMU APSTRĀDES SISTĒMAS

Imitācijas modelēšana kā universālā skaitliskā pētījumu metode tiek lietota dažādas dabas sarežģītu dinamisku – bioloģisku, sociālu, loģistikas, transporta, apkalpošanas un citu – sistēmu funkcionēšanas pētīšanai. Imitācijas modeļi tiek realizēti kā algoritmiskie modeļi specializētās datorsistēmās. Metodes pielietojšanas iespējamība ir nodrošināta ar sarežģītu dinamisku sistēmu kopējām īpašībām – saites starp sistēmu elementiem tiek īstenotas ar vielas (matērijas) un/vai enerģijas un informācijas plūsmu apmaiņu. Daudzveidīgiem plūsmas procesiem piemīt kopējās īpašības, kas ļauj lietot kopēju pētīšanas metodoloģiju. Sarežģītu dinamisku sistēmu imitācijas modeļi (simulatori, modelējošā programmatūra) mūsdienās bieži tiek realizēti kā plūsmu modeļi un tiek lietoti dažādu pētījumu veikšanai. Eksperimentu rezultātu pielietojšanas sfēras ir praktiski neierobežotas, tomēr vissvarīgākās no tām ir saistītas ar projektēšanas uzdevumu risināšanu, sistēmu eksperimentālo pētīšanu un vadīšanas lēmumu pieņemšanas atbalstu [32].

Sarežģītu sistēmu vadības funkcijas uzņēmējdarbībā, ražošanā, pakalpojumu sfērā, loģistikā un citās cilvēku darbības nozarēs var tikt interpretētas un realizētas kā materiālo plūsmu vadības funkcijas. Pieņemot šādu viedokli, ir iespējams apgalvot, ka materiālām plūsmām kā modelējamo sistēmu elementiem ir vispārīgs raksturs. Materiālo plūsmu efektīvas modelēšanas metodoloģijas izvēle ir imitācijas modelēšanas kvalitatīva pētījuma pamats. Dažādu nozaru pētījumos tiek izmantotas dažādas materiālo plūsmu definīcijas un citu ar plūsmām saistīto jēdzienu interpretācija. Tātad jāprecizē materiālo plūsmu, materiālo plūsmu objektu un materiālo plūsmu apstrādes sistēmu definīcijas un jāizvēlas to formalizācijas veidi no imitācijas modelēšanas viedokļa.

## 1.1. Materiālās plūsmas jēdziens

Modelēšanas kontekstā speciālisti izceļ tādas materiālās plūsmas, kas visbiežāk tiek pētītas imitācijas modelēšanas projektos. Vienā no sistēmu klasifikācijām sistēmu analīzes jomā, kuru piedāvā P. Čeklands (*P. Checkland*), sistēmas iedalās četrās kategorijās [11]:

- dabas sistēmas, kuru izcelsme ir saistīta ar Visuma izcelsmi, piemēram, atoms, Zemes laika sistēma, galaktikas;
- mākslīgās materiālās sistēmas, kas izstrādātas cilvēku darbības rezultātā, piemēram, māja, automašīna, rūpnīca, loģistikas sistēma;

- abstraktās sistēmas, kas izstrādātas cilvēka smadzeņu darbības rezultātā, piemēram, matemātika, literatūra;
- sociālās sistēmas, kuru izcelsme ir saistīta ar cilvēku darbībām un kas ir tīšām vai netīšām sakārtotas, piemēram, ģimene, pilsēta, politiska sistēma.

Modelējamās sistēmas var nākt no jebkuras iepriekšminētās kategorijas. Eksistē projekti, kas saistīti ar visu kategoriju sistēmu modelēšanas vai imitācijas modelēšanas pētījumiem [60]. Imitācijas modelēšanas jomā pētījuma objekti bieži ir tādi, kas saistīti ar cilvēka biznesa aktivitātēm. Daži autoritatīvi autori precīzē modelējamo sistēmu tipu, piemēram, Dž. Benks (*J.Banks*) modelējamo sistēmu klasifikācijā iekļauj [4]:

- ražošanas sistēmas, transportēšanas sistēmas, celtniecības sistēmas;
- sociālās sistēmas – veselības aprūpes, militārās, dabas resursu, sabiedriskās ēdināšanas, izklaides sistēmas;
- biznesa procesu vadīšanas un pārbūves sistēmas;
- datorsistēmas u.c.

Šo modelējamo sistēmu sarakstu var turpināt. Tomēr, runājot par vispārīga rakstura imitācijas modelēšanas pieejām, ir iespējams ierobežot modelējamo sistēmu tipu kopu ar augstākminētajām vai līdzīgām sistēmām. Turpmāk darbā ar modelējamām sistēmām, ja nav minēts speciāli, jāsaprot materiālās sistēmas, kas var tikt papildus raksturotas kā mākslīgas materiālās sistēmas, kuru pētījumiem izmanto operāciju pētīšanas metodes. Pie tādām sistēmām noteikti pieder visas sistēmas, kas ir iekļautas Benksa sarakstā.

Materiālās plūsmas (MP) jēdziens ir pamata jēdziens, veicot analīzes un modelēšanas darbus dažādās sarežģītās sistēmās, sākot ar maza un vidēja izmēra ražošanas uzņēmumiem un beidzot ar globāliem preču izplatīšanas tīkliem. Šis jēdziens tiek lietots dažādās zinātnes nozarēs un cilvēku darbības sfērās: fizikā, makro un mikroekonomikā, loģistikā, ražošanā, sociālajā sfērā, transportā un citās sfērās. Piemēram, hidrodinamika pēta hidrodinamiskas plūsmas, kas sastāv no šķidrām vielām vai gāzēm. Makroekonomikas pētījuma objektus, piemēram, eksportu un importu par noteikto laika periodu arī var raksturot kā materiālās plūsmas, kas sastāv no precēm, izejvielām un citiem materiālajiem objektiem. Sociālajā sfērā tiek pētītas darbaspēka plūsmas, pircēju vai tūristu plūsmas, kuru atsevišķie objekti ir cilvēki un kam arī var pielietot nosaukumu „materiālās plūsmas”. Vielmaiņa dzīvās sistēmās (organismos, biocenozēs, biosfērā) ir plūsmas process. Transportā plūsmas veido transporta līdzekļu, kas ir materiāla rakstura objekti, pārvietošanās pa ceļiem.

Vispirms MP jēdzienu sāka lietot filozofi un fiziķi, tomēr šī promocijas darba nozarei labāk atbilst jēdziena „materiālā plūsma” interpretācija no vadības zinātnes viedokļa.

Jebkura veida uzņēmējdarbības aktivitāte izraisa enerģijas, materiālās vai informācijas plūsmas. Šo plūsmu vadīšana ir neatņemama uzņēmuma un apkārtējās vides mijiedarbības sastāvdaļa. Pētījumi, kas saistīti ar materiālām plūsmām uzņēmējdarbībā, turpinās kopš seniem laikiem un savulaik bija pacelti teorētiskajā līmenī klasiskās politiskās ekonomijas pārstāvju darbos. Piemēram, K. Markss (*K. Marx*) ražošanas procesa pētījumus veica ar uzsvaru uz produktu plūsmām, kur produkti tika analizēti no cenu viedokļa [100]. Tuvāk mūsdienām, proti, 1981. gadā japāņu ekspertu kolektīvs izdeva grāmatu „*Handbook of Material Flow*”, kas ierosināja MP jēdziena jaunu interpretāciju [77]. Divdesmitā gadsimta 80.-to gadu vidū uz japāņu pētījumu bāzes Ķīnā turpināja attīstīties materiālo plūsmu pētījumi un tika noformulēti modernas materiālo plūsmu teorijas pamati, turklāt teorijas attīstīšanas nepieciešamība bija pamatota ar praktiskām ekonomiskām vajadzībām. Materiālo plūsmu teorijā svarīgi uzdevumi ir saistīti ar ražošanas, apgrozības un patēriņa procesiem, ar uzsvaru uz praktiskām formām [73].

Vairāki pētnieki uzskata, ka materiālo plūsmu teorija iekļauj dažādas sastāvdaļas [74]:

- vispārīgā materiālo plūsmu teorija,
- materiālo plūsmu elementu teorija,
- materiālo plūsmu dabas teorija,
- materiālo plūsmu zinātnes un tehnoloģijas teorija,
- materiālo plūsmu tehniskā teorija,
- materiālo plūsmu industriālā teorija.

Šo teoriju ietvaros materiālo plūsmu definē kā makroskopisku objektu plūsmu vai vielas plūsmu. Materiālās plūsmas ir ne tikai ekonomiska, bet arī sociāla un dabas parādība. Ekonomiskās MP galvenokārt nosaka MP būtību, bet sociālās un dabas plūsmas ir MP jēdziena pirmavoti. Nav svarīgi, vai MP tiek apskatīta dabas, sociālajās vai ekonomiskajās sistēmās. Jebkurā no gadījumiem tā ietver sevī piecus bāzes elementus: vielu, plūsmu, īpašnieku, telpas apgabalu un laiku. No šiem elementiem viela ir pamatelements [74]. Augstākminētās teorijas pēta dažādus materiālo plūsmu aspektus.

**Vispārīgā MP teorija** atklāj MP objektu būtību. MP dabas pasaulē eksistēja agrāk par cilvēku sabiedrību, jo plūsmu veidošanas stimuli drīzāk nāk no dabas pasaules, nekā no cilvēces ekonomiskajām aktivitātēm. Sociālajā pasaulē MP ir cilvēka eksistēšanas pamats, bez kura cilvēks nevar izdzīvot, MP nav ekonomisku mērķu un tās ir objektīvas, galvenās un nepieciešamas. Sociālās sfēras MP ietver sevī gan militārās loģistikas, gan katastrofu aizsardzības MP.

MP ekonomikā ir svarīga parādība, kas strauji attīstās atbilstoši ekonomiskās attīstības

prasībām. Tās ietver sevī ražošanas, tirdzniecības un uzņēmējdarbības MP, to veidošanas stimuls nāk no cilvēces ekonomiskajām aktivitātēm.

Tāpat MP ir svarīga parādība dabā, sabiedrībā un ekonomikā. Starp dažādu sfēru plūsmām veidojas saistības, un kopumā tās ir vispārīgās MP teorijas pētījumu objekti. 1.1. att. ir redzama vispārīga materiālo plūsmu klasifikācija.

**MP elementu teorija** pēta materiālu plūsmu objektu būtību. Šīs teorijas izpratnē jebkura tipa MP veidojas no sekojošiem bāzes elementiem: viela, plūsma, īpašnieks, reģions, laiks (angliski – *Material, Flow, Owner, Region, Time* – *MFORT* teorija vai piecu bāzes elementu teorija). Jebkura tipa materiālajai plūsmai (dabā, sabiedrībā, ekonomikā) ir šie pieci bāzes elementi, no kuriem „viela” šajā kontekstā ir vissvarīgākais. MP eksistēšanas nosacījums ir visu piecu bāzes elementu klātesamība [58].

**MP dabas teorija** apraksta MP dabu gan kā būtisku un patiesu, gan arī kā neraksturīgu, netipisku, tādu, kas pakļaujas cilvēka gribaspēkam. MP patiesās būtības raksturošanai izmanto 5 pazīmes, kas atbilst pieciem bāzes elementiem (*MFORT*). MP neraksturīgās būtības pazīmes ir partija, pakalpojums, vadība, tehnoloģija un saimniecība. 1.2. att. ir attēlota materiālo plūsmu klasifikācija saskaņā ar *MFORT* atribūtiem [58].

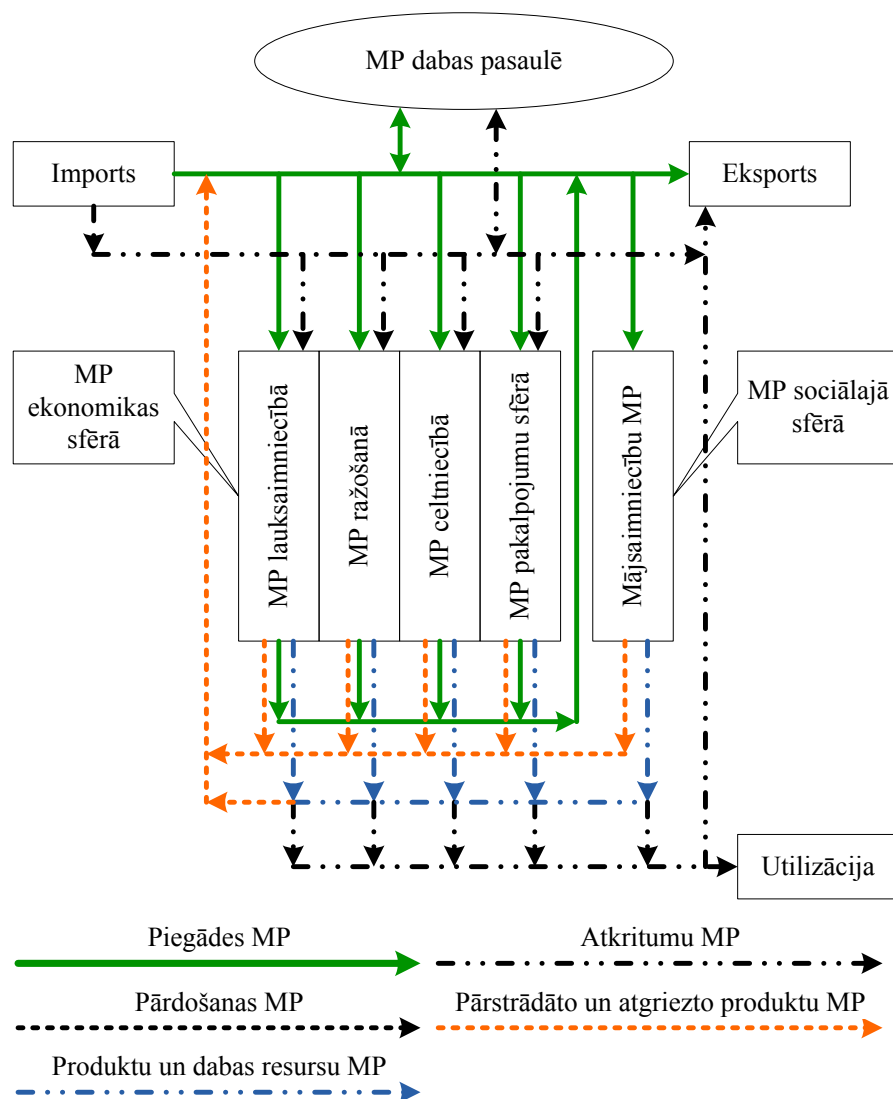
**MP zinātnes un tehnoloģijas teorija** sākotnēji attīstījās, ņemot par pamatu tikai uzņēmējdarbību. Pašlaik šī MP teorija iekļauj sevī vispārīgas MP teorijas pamatnostādnes, tehnoloģiskus, tehniskus un citus aspektus un ir jau augstākā līmenī nekā vienkārša MP vadības teorija.

**MP tehniskā teorija** apvieno MP elementus un to dzinējspēkus. MP elementi šajā teorijā ir šādi:

- MP iesaistīts darbaspēks;
- objekti, ar kuriem notiek darbības un kas ir plūsmu „vielas”;
- darba līdzekļi;
- MP darba vide;
- MP darba vietas;
- MP operāciju izpildes laiks dažādiem resursiem.

Par MP dzinējspēkiem var būt:

- darbaspēks;
- materiālie resursi (enerģija, izejvielas);



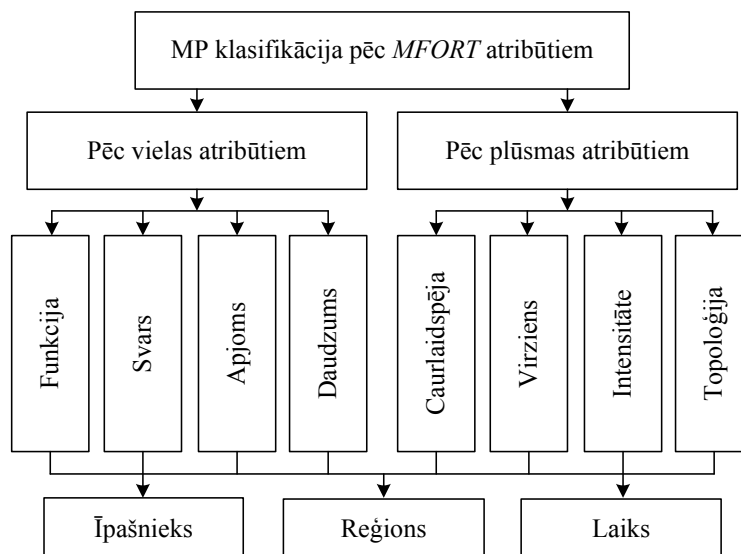
1.1. att. Materiālo plūsmu vispārīga klasifikācija, adaptēts no [74]

- dabas resursi (ūdens, teritorija, gaiss);
- transporta līdzekļi un infrastruktūra;
- laika faktori.

Nav iespējams runāt par MP tehnisko teoriju, neņemot vērā augstākminētos elementus un dzinējspēkus. MP tehniskā teorija attīstās kā vispārīga tehniskā teorija. Eksistē un attīstās nozaru teorijas, piemēram, izejvielu vai mehānismu MP tehniskās teorijas.

**MP industriālā teorija** apskata MP ražošanā, apritē un patēriņā dažādās formās: dabiskā, naudas izteiksmē vai kombinētā formā. Šī teorija uzskata, ka nacionālā ekonomika sastāv no ražošanas, materiālu plūsmām un patēriņa. Praktiskos pētījumos lieto MP galvenokārt dabiskā vai naudas izteiksmē.

Atsevišķu MP teoriju ietvaros tiek apskatīti dažādi MP aspekti. Atšķiras arī MP aprakstīšanas un analīzes pieejas atkarībā no nozares, kuras ietvaros tiek veikti pētījumi.



**1.2. att. Materiālo plūsmu klasifikācija pēc *MFORT* atribūtiem, adaptēts no [83]**

Ekonomikā materiālā plūsma tiek interpretēta kā materiālie resursi, nepabeigtie ražojumi un gatavā produkcija, kas atrodas kustībā. Ar šīm plūsmām tiek veiktas daudzveidīgas operācijas – fiziskā pārvietošana telpā, kravu iekraušana, izkraušana un apstrādes operācijas, preču iesaiņošana, transportēšana, konsolidēšana, sadalīšana un citas [96]. Materiālie resursi – darba priekšmeti: izejvielas, pamata un palīgmateriāli, pusfabrikāti, komplektējošie izstrādājumi, montāžas vienības, kurināmais, rezerves daļas, atkritumi; nepabeigtie ražojumi – uzņēmuma ietvaros nepabeigtā produkcija. Gatavā produkcija – produkcija, kas pēc pilna ražošanas cikla uzņēmumā ir nodota noliktavā vai nosūtīta patērētājam [104].

Makroekonomikā MP (naudas vai preču) interpretē kā naudas vai preču masas, kas cirkulē noteiktā telpā noteiktā laika posmā [103].

Autori, kas analizē MP ražošanā, bieži atklāj to būtību kā materiālu, nepabeigto ražojumu, izejvielu un atkritumu sakārtotas plūsmas [51]. Jāpiezīmē, ka vispārīgā gadījumā materiālā plūsma un materiālu plūsma ir dažādi jēdzieni: materiālu plūsma ir materiālās plūsmas īpašs gadījums.

Materiālās plūsmas jēdziens ir viens no vadošajiem jēdzieniem loģistikā. Loģistikas pētījuma objekti ir materiālās plūsmas un ar tām saistītas informācijas, naudas un citu veidu plūsmas. Loģistikas pieejas principiālā atšķirība no citām pieejām (piemēram, materiālo resursu kustības vadības pieejas) ir vadības objekta koncepcija: vadības objekts ir plūsma – objekti, kas tiek interpretēti kā kopums [97]. Loģistikā plūsmas jēdziens ir cieši saistīts ar krājuma jēdzienu: plūsmas ir vienīgais krājumu izmaiņu iemesls, un krājumu izmaiņas ir summārais atbilstošā uzkrājēja visu ienākošo un izejošo plūsmu efekts. Starp plūsmu

dinamiskiem raksturojumiem un krājumu statistiskiem apjomiem eksistē likumsakarības. Ilgtermiņa skatījumā jebkurš resursu kopums var tikt interpretēts kā plūsma un/vai krājums, kā plūsmas īpašs gadījums; taču īstermiņa skatījumā praktisku uzdevumu risināšanai ir lietderīgi izmantot gan plūsmu, gan krājumu objektus. Plūsmas un krājumi loģistikā var tikt interpretēti kā vispārīgu ekonomikas kategoriju īpaši gadījumi. Makroekonomikas modeļi bieži izmanto plūsmu un krājumu kategorijas bez loģistikas pieejai raksturīgās smalkās detalizācijas. Turklāt, dažos ekonomikas pētījumos atšķirība starp plūsmām un krājumiem nav obligāti acīmredzama [101].

Loģistikas materiālā plūsma – jēdziens, kas attiecas uz darba produkta nepārtrauktām izmaiņām un kustību ražošanas procesa stadijās, preču apgrozības sfērā, iekļaujot atkritumu pārstrādi [96].

Transportēšanas jomā eksistē divas galvenās pieejas transporta līdzekļu plūsmu aprakstīšanai, kas atkarīgas no izpētes mērķiem. Transporta līdzekļi tiek pētīti kā transporta plūsmas atsevišķie objekti [107], kad runa iet par ceļu satiksmes sistēmām, vai kā kravu un pasažieru pārvietošanas līdzekļi transportēšanas vai loģistikas sistēmās [36].

Literatūrā var atrast ne tikai iepriekšminētās MP definīcijas un jēdziena interpretācijas. Tomēr 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.

Kā redzams, materiālo plūsmu, kas ir MP teoriju objekti, 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**. Par plūsmām sauc gan kustīgu ūdens daudzumu, kas veido upi tās gultnē, gan transporta līdzekļu daudzumu, kas pārvietojas ceļa posmā starp divām apdzīvotām vietām vai ceļu krustojumiem. Plūsmu attēlošana var tikt realizēta, piemēram, izmantojot procesu plūsmu diagrammas (*process flow diagram*). Šai definīcijai ir ļoti vispārīgs raksturs un imitācijas modelēšanas pētījumu kontekstā materiālās plūsmas jēdzienu ir vēlams sašaurināt.

Mākslīgās materiālās sistēmās plūsmas jēdziens ir saistīts ar plūsmas vielas parādīšanos kādā konkrētā telpas punktā, kas var tikt nosaukts par plūsmas mērījuma (reģistrēšanas) punktu. Tādās sistēmās materiālās plūsmas var tikt interpretētas kā objekti bez garuma vai procesi, kas risinās dažādos sistēmas punktos. Šajos punktos notiek sistēmas fragmentu

(elementu vai apakšsistēmu) nonākšana saskarē. Punktu izvēle ir pētnieka kompetencē. Mērījuma punktos plūsmas var uzkrāties. Katrs no plūsmu mērījuma punktiem ir kādas sistēmas fragmenta plūsmas sākuma punkts, bet citai sistēmas sastāvdaļai – plūsmas beigu punkts. Tātad jebkuru plūsmu ir iespējams apskatīt kā kādas sistēmas fragmenta ienākošās vai izejošās plūsmas sastāvdaļu.

**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.

Materiālo objektu (izejvielu, sagatavju, izstrādājumu, preču, preču grupu, kravu, kravu nesēju, kravu transportēšanas līdzekļu, transporta līdzekļu, pasažieru, klientu, apmeklētāju un citu kustīgu *entītij*<sup>1</sup>) pārvietošanas un uzkrāšanas procesi, kas realizējas kā plūsmas, tiek uzskatīti par materiālo mākslīgo sistēmu bāzes procesiem [105].

Materiālās plūsmas veidojas no izejvielām, pusfabrikātiem un gatavajiem izstrādājumiem transportēšanas, glabāšanas un citu materiāla rakstura operāciju izpildes gaitā, plūsmas sākums ir izejvielu avots, tās nobeigums ir gala patērētājs. Materiālās plūsmas var „tecēt” starp atsevišķām valstīm, valsts reģioniem, uzņēmumiem, var būt arī uzņēmuma vai uzņēmuma struktūrvienības ietvaros. Uzņēmumā par materiālo plūsmu sauc ražošanai nepieciešamās kravas, detaļas, detaļu blokus un gatavo produkciju. Visi minētie elementi tiek aplūkoti dažādu darbību izpildes procesā noteiktos laika intervālos. Materiālā plūsma, kas tiek apskatīta noteiktā laika momentā, var raksturot materiālo resursu krājumus [104]. Citiem vārdiem sakot, plūsma ir materiālu un informācijas kustība to pārveidošanas procesā (par patērētāja produktu vai pakalpojumu). Tas nozīmē, ka jebkurā produkta dzīves ciklā vai pakalpojuma sniegšanas procesā var izcelt plūsmas, un jebkura darbība var tikt interpretēta kā plūsmas pārveidošana.

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. Mākslīgās materiālās sistēmās eksistē dažādi materiālo plūsmu tipi:

- pēc attiecības pret pašu sistēmu – iekšējās un ārējās plūsmas; ieejas un izejas plūsmas;

---

<sup>1</sup> *Entīcija* – konkrētam lietojumam (sistēmai) nozīmīgs reāls vai abstrakts objekts vai šo objektu kopums. - Virtuālā enciklopēdija "Latvijas Enciklopēdiskā vārdnīca", <http://www.letonika.lv>.

- pēc galvenajām funkcijām – ražošanas, transportēšanas, izejvielu, produktu, preču, u.c.;
- pēc plūsmu objektu specifiskajām īpašībām – dzīvo un nedzīvo objektu plūsmas.

Vēl sīkāka detalizācija var būt pēc sekojošām pazīmēm:

- pēc nomenklatūras (viens vai vairāki objektu veidi);
- pēc sortimenta (viens vai vairāki objektu veida tipi);
- pēc attiecības pret nejaušībām (determinētas vai stohastiskas);
- pēc parametru mainīguma laikā (stacionāras vai nestacionāras);
- pēc laika principa (nepārtrauktas vai diskrētas) un citām pazīmēm.

Plūsmas definē to parametri:

- plūsmas sākuma un beigu punkti,
- trajektorija, ceļa garums,
- plūsmas ātrums,
- trajektorijas starppunkti,
- plūsmas intensitāte un citi parametri.

Šāda parametru kopa ir saskaņota ar plūsmas *MFORT* atribūtiem, kurus apskata MP dabas teorija.

Sistēmas, kas tiek analizētas kā diskrētu 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 diskrētu 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** [39]. Jāpiezīmē, ka *diskrētās plūsmas* jēdziens nevar tikt viennozīmīgi interpretēts. Tradicionāli imitācijas modelēšanas jomā izmanto diskrētā laika vai diskrētā stāvokļa (amplitūdas, intensitātes) plūsmas, taču šādu interpretāciju pielietošana ir ierobežota ar atsevišķiem konkrētiem gadījumiem. Diskrētā laika plūsma ir impulsu plūsma. Katra plūsmas porcija tiek novērota laika momentos, kas ir noteikti ar soli  $\Delta t$ . Diskrētā stāvokļa plūsmas jēdziens sakrīt ar *diskrētu notikumu* plūsmas jēdzienu, kas tiek izmantots diskrētu notikumu sistēmu modelēšanā un arī ir impulsu plūsma. Katra plūsmas porcija tiek novērota gadījuma rakstura laika momentos, kas ir īpašie vai notikumu laika momenti.

Īpašas vajadzības materiālo plūsmu aprakstīšanā var būt saistītas ar objektiem, kas ietilpst konkrētā plūsmā. Piemēram, pie materiālās plūsmas objektiem pieskaitāmi kā transportlīdzekļi, tā arī transportlīdzeklī pārvadājamās kravas, preces, pasažieri.

## 1.2. Materiālo plūsmu objekti

Lai varētu nodrošināt savu eksistenci un komfortu, cilvēks izmanto dažādas vielas un materiālus, ko var iegūt pasaulē - pārtikai, mājoklim, transporta līdzekļiem un visām citām ikdienas vajadzībām. Viela, matērija vai materiāls veido materiālās plūsmas un nosaka plūsmas funkcijas. Plūsmā viela kustas un „plūst”, t.i., neatkarīgi no ražošanas, pārdošanas, apgrozības un patēriņa notiek plūsmas vielas pārkārtošanās. Bez plūsmām patēriņa priekšmetu izmantošana ir neiespējama, var teikt, ka pasaulē nav vielu vai patēriņa priekšmetu, kas nav iesaistīti plūsmās [104]. Uz materiālo plūsmu teorijas bāzētā materiālo plūsmu vielas teorija (*the theory of material flow substance*) ir zinātnes nozare, kuras ietvaros tiek veikti materiālās plūsmas veidojošo vielu pētījumi [77]. Tomēr šīs teorijas pielietošana bieži ir ierobežota ar ekonomikas pētījumiem. Materiālo plūsmu pētījumi citās cilvēku darbības sfērās izmanto dažādas gan analītiskās, gan heuristiskās pieejas atbilstoši konkrētās nozares vajadzībām.

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).

Par pētāmo sistēmu pamatobjektiem dažādos sistēmu specififikācijas formālismos uzskata entītijas [89]. Parasti entītijas interpretē kā atsevišķus modelējamus sistēmas elementus, kuru uzvedība tiek skaidri izsekota [4]. Par entītiju piemēriem var uzskatīt transporta līdzekļus transporta sistēmā, darbgaldus ražošanas sistēmā, pacientus veselības aprūpes iestādē, lidmašīnas lidostā. Daži autori interpretē entītijas kā pieprasījumus, t.i., individuālus objektus, kas tiek apstrādāti sistēmā [22]. Ņemot vērā atšķirības terminu pielietošanā, varam konstatēt, ka autoru vairākums, definējot modelējamo sistēmu elementus, kas jāformalizē modelēšanas procesā, izceļ sistēmu „statiskas” un „dinamiskas” (plūsmu veidojošas) entītijas [4, 22, 30, 32, 39, 60, 72, 105 u.c.]. Turpmāk darbā, ja netiek minēts atsevišķi, termini *entītija*, *dinamiskais objekts*, *kustīgais objekts* un *plūsmas objekts* apzīmē sistēmas objektus, kas veido plūsmas un tiek „apstrādāti” sistēmā līdzīgi pieprasījumiem masu apkalpošanas sistēmās [21].

Sistēmu modelēšana ir iespējama, ja vien ir iespējama sistēmas aprakstīšana terminos, kas ir pieņemami datorsistēmā. Šis apgalvojums attiecas arī uz sistēmas elementiem. Galveno sistēmu specififikāciju formālismu – diferenciālo vienādojumu, diferenču vienādojumu un diskreto notikumu sistēmu – ietvaros sistēmu raksturo stāvokļa mainīgo kopa. Katra mainīgo

kopas vērtību kombinācija nosaka vienīgo unikālo sistēmas stāvokli telpā vai laikā. Stāvokļa mainīgo kopas izmaiņas, kas tiek novērotas laikā, veido sistēmas stāvokļa laika trajektorijas (vai vienkārši sistēmas trajektorijas). Sistēmu imitācijas modelēšana iekļauj sevī sistēmas stāvokļa dinamikas imitāciju atbilstoši modelī iekļautiem noteikumiem vai operāciju likumiem. Plūsmas objektus sistēmas specifiskācijas ietvaros var interpretēt, izmantojot dažādas pieejas – diskrēto, nepārtraukto vai kombinēto – un attēlot kā stāvokļa trajektorijas mainīgos. Kopumā var izcelt četrus plūsmu tipus [69]:

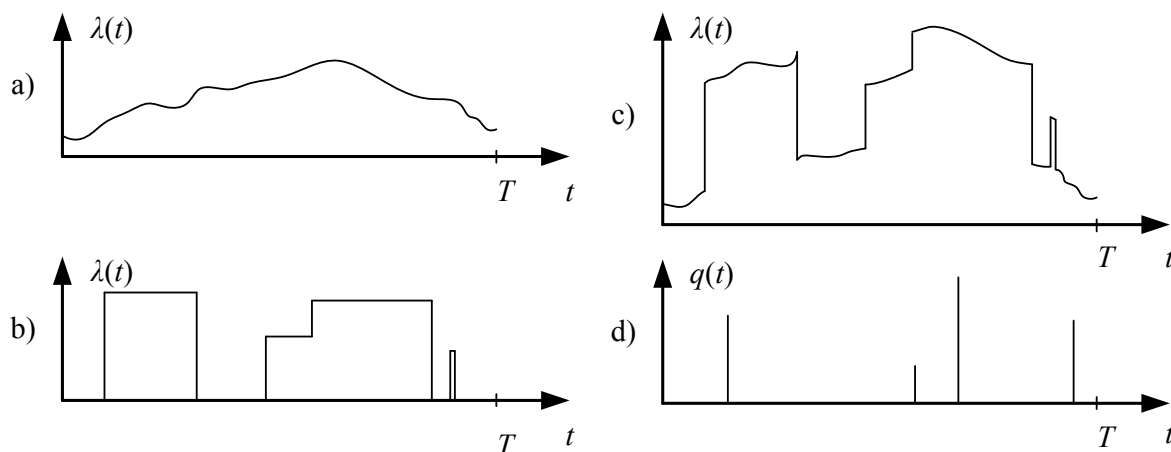
- nepārtraukta laika plūsma ar nepārtrauktām intensitātes izmaiņām;
- nepārtraukta laika plūsma ar diskrētām intensitātes izmaiņām;
- nepārtraukta laika plūsma ar diskrēti-nepārtrauktām intensitātes izmaiņām;
- diskrēta plūsma.

Plūsmas trajektoriju piemēri ir attēloti 1.3. att., 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.

Impulsa plūsmai var izrēķināt intensitāti kā vidējo substrāta daudzumu noteiktā laika posmā, taču šim lielumam ir ļoti abstrakts raksturs, kas neļauj attēlot diskrētas plūsmas reālo dinamiku.

Kā nepārtrauktas materiālās plūsmas var tikt apskatītas „īstās” nepārtrauktās plūsmas, kuru objekts ir viela. Diskrētu objektu gadījumā „masu plūsmas” var tikt apskatītas kā nepārtrauktās plūsmas, kad atsevišķa diskrēta objekta individuālās īpašības nav svarīgas vai nav iespējama individuāla diskrēta objekta identifikācija. Kā „pārejas” plūsmu var apskatīt plūsmu, kuru veido pulverveida viela: plūsmas uzvedība ir līdzīga šķidrās vielas „viendabīgas”, nepārtrauktas plūsmas uzvedībai, tomēr plūsmas objekti ir pulvera diskrētas daļiņas.

Nepārtrauktu vielu plūsmu pētīšanu ražošanas vajadzībām veic procesu sistēmu tehnoloģija (vai ražošanas tehnoloģija, *process engineering* vai *process systems engineering*). Pētījumos izmanto procesu analītiskus modeļus – diferenciālvienādojumus [22]. Bieži procesu sistēmu tehnoloģija pēta arī nepārtrauktās plūsmas ar diskrētām izmaiņām, kuras izraisa, piemēram, sūkņa ieslēgšana vai vārsta aizvēršana sistēmā ar nepārtrauktām plūsmām. Diskrētu objektu plūsmas sastopamas gan dabā, gan mākslīgās materiālās sistēmās, piemēram, dzīvnieku migrācijas plūsma starp reģioniem vai kontinentiem vai mājlopu plūsma



**1.3. att. Plūsmas trajektoriju piemēri**

starp kultivētām ganībām. Visbiežāk tieši mākslīgo materiālo – ražošanas, transportēšanas, loģistikas, apkalpošanas un citu – sistēmu pētījumos tiek apskatītas diskreto objektu plūsmas. Turpmāk šajā darbā, ja nav minēts atsevišķi, interpretēsim materiālo plūsmu objektus kā mākslīgus diskretus objektus, kurus var papildus identificēt, piemēram, izmantojot *MFORT* vai citus atribūtus.

### 1.3. Materiālo plūsmu apstrādes sistēmas

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 vai materiālo plūsmu apstrādes sistēma” (*flow system, material flow system, material handling* vai *material flow handling system*) [7, 13, 22, 25, 28, 29, 63, 64 u.c.]. Šie termini ir intuitīvi saprotami, tomēr precīzas definīcijas rakstos vai grāmatās netiek noformulētas. 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 [37]. Vienā no pirmajiem mēģinājumiem precizēt terminoloģiju tika konstatēts [69]: plūsmu sistēmas ir mākslīgas, tehniskas vadāmās sistēmas, kas tika izveidotas materiālu un nemateriālu objektu apstrādei (t.i., izveidošanai, transportēšanai, pārveidošanai, uzkrāšanai un izbeigšanai). Plūsmu sistēmas jēdziens ir plašāks nekā materiālo plūsmu vai materiālo plūsmu apstrādes sistēmas jēdziens un ir pielietojams dažādu tipu sistēmu aprakstīšanai, kas iekļauj sevī finansiālās plūsmas, uzdevumu vai citas plūsmas. Pieņemot iepriekšminēto plūsmu sistēmas definīciju, konstatējams, ka pie plūsmu sistēmām pieder plašs sistēmu klāsts.

Raksts [63] piedāvā plūsmu sistēmu pētīšanas un analīzes metožu apskatu un piedāvā termina „plūsmu sistēma” interpretāciju imitācijas modelēšanas kontekstā. Ņemot vērā iepriekš minēto, var tikt noformulēta materiālo plūsmu apstrādes sistēmu definīcija: **materiālo plūsmu apstrādes sistēmas ir tehniskas vadāmās sistēmas, kas izveidotas materiālu objektu plūsmu apstrādei** [69]. „Apstrāde” apvieno sevī visa veida operācijas, kas tiek izpildītas ar MP objektiem, t.i., ne tikai „apstrāde” tiešā nozīmē, bet arī glabāšana, pārvietošana, pārkraušana, transportēšana un citas operācijas.

Modelējamās materiālo plūsmu apstrādes sistēmas kā imitācijas modelēšanas projektu pētījumu objekti vislabāk iekļaujas „transakciju plūsmas pasaules uztverē” (*the transaction-flow world view*), kuru noformulēja viens no imitācijas modelēšanas „tēviem” Tomass Šraibers (*Thomas J. Schriber*) [72]. Šī pasaules uztvere spēj nodrošināt diskreto notikumu imitācijas modelēšanas pielietošanas bāzi sistēmu pētīšanai. Šajā pasaules uztverē sistēma tiek attēlota kā tīkla struktūra, kur notiek diskreto kustīgo objektu satiksme. Pārvietojoties sistēmā, diskrētie objekti veido plūsmas un konkurē savā starpā par sistēmas resursu izmantošanu, t.i., diskreto notikumu sistēmu formalizācijas pieeja iekļauj sevī gan plūsmu, gan operāciju ar plūsmām koncepcijas un tādējādi precīzi atbilst materiālo plūsmu apstrādes sistēmu formalizācijas nolūkiem [39].

#### 1.4. Materiālo plūsmu tīkli

Vairākums sarežģītu sistēmu funkcionēšanas procesu var tikt attēloti kā apstrādes/apkalpošanas fāžu secība. Jebkurš reāls ražošanas, apkalpošanas vai loģistikas process var tikt uzskatīts par daudzfāzu procesa piemēru. Daudzfāzu sistēmas var būt sarežģītas pēc struktūras un var tikt interpretētas kā masu apkalpošanas sistēmas vai kā stohastiskie tīkli. Ja sistēma tiek apskatīta kā materiālo plūsmu apstrādes sistēma, tad to var interpretēt arī kā materiālo plūsmu tīkla sastāvdaļu, kurā tiek apskatīta katras atsevišķas plūsmas dinamika un plūsmu mijiedarbība [94]. Ar modeļu palīdzību ir iespējams pētīt šo mijiedarbību, iekļaujot modeļos nepieciešamās struktūras un plūsmas. Materiālo plūsmu apstrādes tīkli (MPA tīkli, *material flow processing networks*) ir visuresoši mūsdienu apstākļos. Tādi tīkli iekļauj sevī nenoteiktības, sarežģītu lēmumu pieņemšanas loģiku un augstas prasības darbības izpildes kritērijiem. Ņemot vērā šādas īpašības, analīzes metožu klāsts tādām sistēmām ir ļoti plašs un iekļauj sevī arī imitācijas modelēšanas metodi [7].

Materiālo plūsmu sistēmas raksturo materiāli, kas veido plūsmas, mezgli, kuros notiek materiālu uzkrāšana, lēmumu pieņemšanas mezgli (vadāmierīces, slēdži, maršrutizācijas iekārtas vai citi plūsmas kustību modificējošie elementi), informācija un operatori. Pats

plūsmas „materiāls” dažos gadījumos ir pasīvs, t.i., to pārvieto un apstrādā citi sistēmas elementi, bet, interpretējot, piemēram, pacientu plūsmu kā materiālo plūsmu ārstniecības iestādes apkalpošanas sistēmā, šo „materiālu” nevar interpretēt kā pasīvu. Plūsmas materiāla aktīvais raksturs norāda uz tam piemītošām iespējamām lēmumu pieņemšanas spējām. Aktīvu un pasīvu materiālu uzturēšanas punkti (materiālu apstrādes un/vai apkalpošanas vietas) un plūsmas starp punktiem sastāda materiālo plūsmu apstrādes tīklu pamatni – mezglus un to savienošos lokus. MPA tīkls var ietvert sevī transporta līdzekļus, kas pārvietojas gar tīkla lokiem (un kam ir savas uzturēšanās vietas tīkla mezglos), konveijerus un materiālu glabāšanas vietas. MPA tīkla dekompozīcijas rezultātā iegūstami tā sastādošie tīkli. Katram tīklam var būt sava materiālu pārvietošanas starp mezgliem metode [7].

Lēmumu pieņemšanas mezgli funkcionē, pamatojoties uz informāciju par fizisku sistēmu un materiālo plūsmu sistēmas funkcionēšanas mērķiem. Operatori apvieno dažādas funkcijas, kas piemīt citiem sistēmas elementiem. Kaut gan tāda pieeja sistēmas aprakstīšanai pārsvarā ir orientēta uz ražošanas sistēmām, tomēr ir skaidri redzams, ka, izmantojot MP un MPA tīklu koncepciju, iespējams aprakstīt plašu materiālo plūsmu apstrādes sistēmu klāstu.

Terminu „materiālo plūsmu tīkls” daži autori izmanto kā noteiktas modeļu klases apzīmējumu, un šis aspekts tiek apskatīts darba 2. nodaļā.

## 1.5. Materiālo plūsmu aprakstīšanas veidi

Materiālo plūsmu apstrādes sistēmu vai to tīklu analīzei ar imitācijas modelēšanas metodi jāizveido tādi sistēmu apraksti, kas iekļauj sevī materiālo plūsmu aprakstus.

Materiālo plūsmu aprakstu ir iespējams izveidot kā:

- saturīgu aprakstu, brīvā formā (parasti teksta aprakstiem tehniskās disciplīnās ir ierobežota vērtība);
- tabulu, kas iekļauj sevī notikumu protokolu un informāciju par plūsmas īpašībām un/vai to objektiem [69];
- formalizētu shēmu;
- grafisku modeli – materiālo plūsmu diagrammas (*material flow chart*), laika funkcijas, „daudzuma-laika” procesu grafikus, *Sankey* diagrammas, u.c.;
- uzņēmuma, nozares, valsts vai citu pieņemtus standarta aprakstus;
- kombinētos aprakstus.

MP aprakstu piemērus var atrast dažādos projektos, piemēram [60, 21, 37].

MP apraksta fragments no imitācijas modelēšanas projekta, kas ir formulēts kā saturīgais apraksts [47]:

„Pieostas stacijas pienākšanas parkā pienāk divu tipu sastāvi: ar kravu un tukši. Vagonu skaits standarta sastāvā – 57 vagoni. Vienā sastāvā var būt iekļauti dažādi vagonu tipi: pusvagoni, fitingu platformas, fitingu platformas refkonteineriem, segtie vagoni, graudu vedēji. Vagonu tipu sadalījums atbilst kravu nomenklatūrai. Pēc ierašanās sastāvs tiek ievietots pienākšanas parkā. Vienlaikus pienākšanas parkā var atrasties trīs sastāvi. Pienākšanas parkā notiek sastāvu komerciālā un tehniskā apskate. Sastāvs atrodas parkā, līdz parādīsies iespēja aizbraukt uz vagonu izformēšanas punktu vai uz nostāves parku. Pēc sastāva izformēšanas notiek vagonu pārvietošana uz ostas rajoniem un stacijas pievedceļiem.”

Procesa apraksts tiek sastādīts projekta sākuma posmā un ir nepieciešams modeļa izveidošanai. Procesi risinās materiālo plūsmu apstrādes sistēmā – pieostas dzelzceļa stacijā, kur materiālo plūsmu veido vagoni to pārvietošanas un iekraušanas/izkraušanas procesā. Saturīgais apraksts ir diezgan vispārīgs un ir nepieciešama turpmāka detalizācija, kas arī tika veikta izpētes turpinājumā. Neskatoties uz to, ka apraksta detalizācijas līmenis ir zems, var skaidri izdalīt galveno procesu secību, kam cauri „tek” materiālo objektu, proti, vagonu, plūsma. Gadījumā, ja pētījuma mērķi ir saistīti ar kravu plūsmas pētījumiem, vagonu plūsmas aprakstīšanas detalizācija var būt sīkāka un var ietvert vagonu kravas aprakstus.

MP apraksti tabulu veidā ir elementāri plūsmu modeļi. MP apraksta piemērs, kas atbilst iepriekšējos paragrāfos aplūkotajam teksta aprakstam, attēlots 1.1. tabula

Šo tabulas modeli sauc arī par materiālās plūsmas notikumu protokolu [69]. 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 dotajā 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).

1.1. 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 plūsmu formālie apraksti var būt atkarīgi no plūsmas veida, sistēmas īpašībām un pētījuma mērķiem. Iepriekš apskatīto dzelzceļa sastāvu plūsmas piemēru var izteikt ar gadījuma lieluma empīriskā sadalījuma funkciju palīdzību.

Materiālo objektu (sastāvu) plūsma, kas ir aprakstīta 1.1. tabulā, ir matemātiskā struktūra

$$P = \langle T, V, Ob \rangle, \quad (1.1)$$

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.

Iespējamo grafisko aprakstu daudzveidība ļauj izvēlēties konkrētajam gadījumam piemērotāko variantu. Šinī gadījumā grafiskais apraksts veidots kā sistēmas procesa diagramma; iegūtā vagonu plūsmas diagramma redzama 1.4. att.

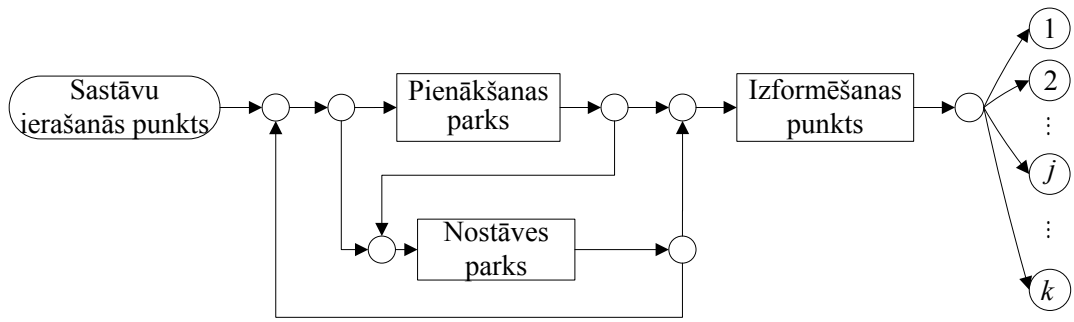
Materiālo plūsmu attēlošanas piemēri ar atbilstošām laika funkcijām ir attēloti 1.5. att. un 1.6. att. Vagonu plūsmas laika diagramma vai „daudzuma-laika” procesa grafiks diferenciālajā formā redzami 1.5. att., kur  $t_i$  ir ierašanās notikumu iestāšanās laika momenti,  $\tau_i$  – laika intervāli starp ierašanās notikumiem,  $n_{ij}$  –  $j$ -tā tipa vagonu skaits  $i$ -tā sastāvā,  $v_i$  –  $i$ -tā sastāva tips [39]. To pašu plūsmu attēlo 1.6. 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.

Vēl viens uzskatāms materiālo plūsmu attēlošanas veids ir *Sankey* diagrammas. Tās parasti lieto enerģijas un materiālo plūsmu bilanču analīzei sarežģītās sistēmās [70]. Vagonu plūsmas *Sankey* diagrammas ir aplūkojamas 1.7. att.: a) vagonu plūsmu diagramma pēc sastāva izformēšanas, b) kopējā vagonu plūsmu diagramma ostas dzelzceļa mezglam.

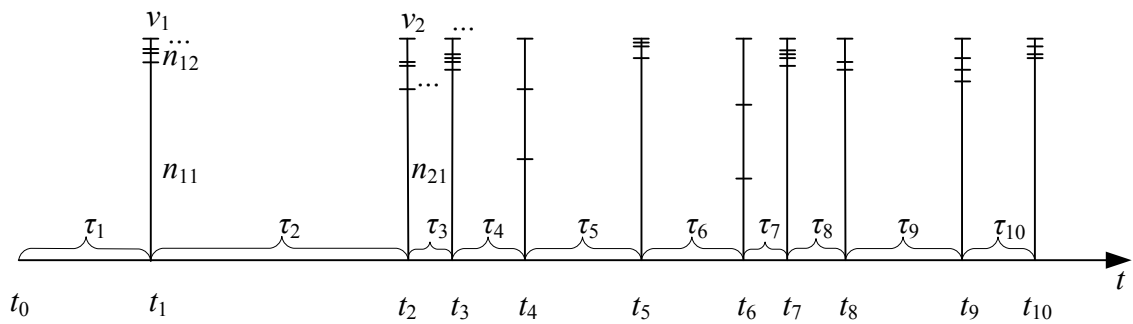
Veidojot MP aprakstus, vislabākos rezultātus var sasniegt, kombinējot dažādus aprakstīšanas veidus. Dažādu aprakstu tipu pielietojuma sfēras, to labās īpašības un trūkumi ir apkopoti 1.2. tabulā.

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

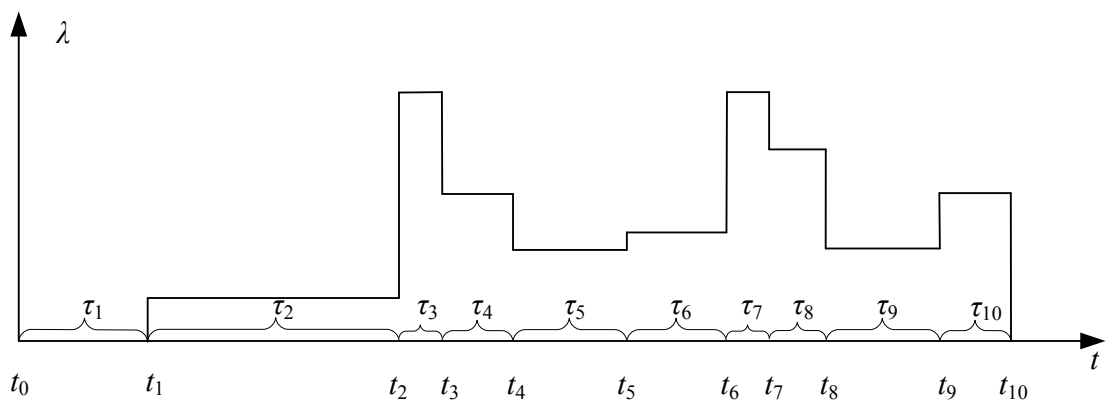
Universālu materiālo plūsmu aprakstīšanas metodi vai veidu nav iespējams definēt;



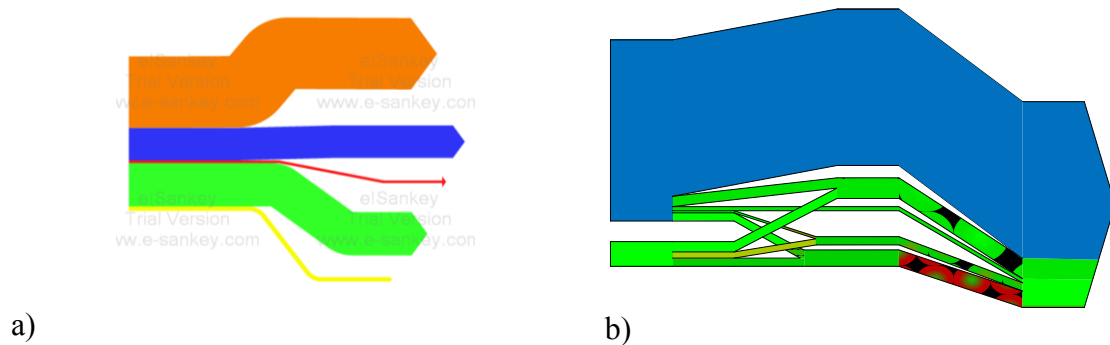
1.4. att. Sastāvu apstrādes procesa diagrammas piemērs



1.5. att. Vagonu plūsmas laika diagrammas piemērs



1.6. att. Vagonu plūsmas intensitātes laika funkcijas piemērs



1.7. att. Vagonu plūsmas Sankey diagrammu piemēri

### Materiālo plūsmu aprakstīšanas veidi un to īpašības

Apraksta veids	Pielietojanas sfēra	Labās īpašības	Trūkumi vai īpašības, kas var apgrūtināt pielietojanu
Saturīgais apraksts	Materiālo plūsmu sistēmas procesu vai atsevišķa procesa aprakstīšana	Universālā pieeja	Informācijas uztveršanas grūtības, sarežģītu procesu strukturētas aprakstīšanas sarežģītība
Tabulārais apraksts	Stohastisku plūsmu aprakstīšana gadījumā, kad ir noteikti iespējamie notikumi	Materiālās plūsmas objektu jebkuru kvantitatīvo raksturojumu attēlošana	Liels informācijas apjoms
Formālais apraksts	Konceptuālo plūsmu modeļu izveidošana, datormodelēšana	Piemērots pielietojanai datormodeļos	Nepieciešamas speciālās zināšanas diskretajā matemātikā, varbūtību teorijā, sistēmu analīzē utt.
Materiālo plūsmu diagramma	Materiālo plūsmu sistēmas procesu vai atsevišķa procesa aprakstīšana	Universāla, viegli izveidojama, labi uztverama attēlošanas forma	Procesa vispārīgs izskats, iespējami dažādi uztveršanas varianti un neprecizitātes
Laika funkcija	Atsevišķo materiālo plūsmu aprakstīšana	Materiālās plūsmas objektu kvalitatīvo raksturojumu attēlošana	Nepieciešamas speciālās zināšanas diskretajā matemātikā, varbūtību teorijā, sistēmu analīzē utt.
„Daudzuma-laika” procesu grafiks	Atsevišķo materiālo plūsmu aprakstīšana	Uzskatāma jebkura tipa plūsmu attēlošana	Nav piemērots plūsmu objektu individuālo īpašību attēlošanai
Sankey diagramma	Materiālo plūsmu sistēmas procesu vai atsevišķa procesa aprakstīšana, konceptuālo modeļu izveidošana	Uzskatāma jebkura tipa plūsmu attēlošana	Statisks determinēts raksturs
Standartos bāzēts apraksts	Atsevišķos projektos vai organizācijās	Augsta standartizācijas pakāpe un komunikācijas starp projekta dalībniekiem iespējamība	Ierobežotas pielietojanas iespējas ārpus projekta vai organizācijas, jāpastāv standartiem
Kombinētais apraksts	Apvieno dažādu aprakstu īpašības	Nav noteiktas	Nav noteikti

taču dažiem aprakstu veidiem, piemēram, formāliem un grafiskiem, ir lielāka pielietojamība imitācijas modelēšanas jomā.

## 1.6. Kopsavilkums un secinājumi

Šajā promocijas darba nodaļā ir veikts materiālo plūsmu jēdziena izcelsmes un pielietojanas sfēras pētījums. Pētījuma mērķis – identificēt materiālo plūsmu kā imitācijas pētījumu objektu specifiskās īpašības, plūsmu aprakstos neatrisinātās problēmas un uzdevumus, kā arī vispārīgā līmenī definēt prasības materiālo plūsmu formalizēšanai MPAS imitācijas modelēšanas pētījumam.

Šīs nodaļas ietvaros paveiktais:

- apskatītas materiālo plūsmu teorijas pieejas to analīzei;
- noformulēta materiālo plūsmu vispārīga klasifikācija un klasifikācija pēc *MFORT* atribūtiem, kas orientēta uz plūsmu īpašību raksturojumu pielietošanu konceptuālo modeļu izstrādes posmā un imitācijas modeļu izveidošanas posmā;
- apskatīti materiālo plūsmu objektu veidi, to īpašības, MP veidi, MPAS un materiālo plūsmu tīkla jēdzieni;
- izanalizēti materiālo plūsmu aprakstīšanas veidi;
- identificētas priekšrocības, ko sniedz formālie un grafiskie plūsmu apraksti modeļa izstrādes procesā;
- vispārīgā līmenī formulētas prasības materiālo plūsmu apraksta veidošanai.

Galvenie secinājumi:

- materiālās plūsmas jēdzienam ir vispārīgs raksturs un universāla, praktiski neierobežota pielietošanas 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.

## 2. MATERIĀLO PLŪSMU MODELĒŠANAS PARADIGMAS

Objektu plūsmu modelēšana nevar tikt definēta kā atsevišķa modelēšanas pieeja, tomēr objektu plūsmu apakšmodeļi vai atbilstošie modeļa elementi tiek definēti dažādu paradigmu dinamiskajos modeļos, jo dinamiskie modeļi diezgan bieži ir plūsmās bāzētie modeļi. Modelēšanas pieejas vai metodoloģijas izvēli nosaka sistēmas specifiskācijas formālisms: dinamiskā modeļa izveidošana netiek veikta ar tiešo dinamiskas sistēmas struktūras definēšanu, tas notiek netieši, izmantojot sistēmu specifiskācijas formālistus. Par pamata formālistiem mūsdienu sistēmu teorijā uzskata *DEVS*, *DTSS* un *DESS* (*DEVS* – *Discrete Event System Specification* – diskreto notikumu sistēmu specifiskācija, *DTSS* – *Discrete Time System Specification* – diskretā laika sistēmu specifiskācija un *DESS* – *Differential Equation System Specification* – diferenciālvienādojumu sistēmu specifiskācija) formālistus [87]. Eksistē un tiek plaši pielietoti arī citi formālisti, piemēram, galīgo automātu, grafu vai Petri tīklu teorijas, kas var būt noderīgi atsevišķos gadījumos, taču šiem formālistiem nepiemīt pietiekoša vispārība un tos nevar uzskatīt par universāli lietojamiem [5]. Turklāt pēdējos gados starp modelēšanas profesionāļiem ir izteikta tendence piedāvāt pamata formālistu modifikācijas un „paplašinājumus”, kuru skaits regulāri pieaug un kas ietver sevī specifiskas funkcijas vai struktūras [18].

Pamata formālisti pieļauj sistēmas dinamiskās uzvedības „lokālo” aprakstu, t.i., jāapraksta sistēmas stāvokļa izmaiņas jebkurā atsevišķā laika momentā. No tāda lokālā apraksta ir iespējams vispārināt globālu dinamisku sistēmas uzvedības aprakstu vai sistēmas specifiskācijas formālista dinamisku interpretāciju [87]. Pamata formālistiem atbilst dažādas modelēšanas pieejas, kuru ietvaros tiek modelētas arī plūsmas: plūsmu modelēšana var tikt realizēta analītiski, imitācijas modelēšanas pieejā vai alternatīvās modelēšanas pieejās.

Pieeju pielietošanas sfēras var būt dažādas un dažādu sistēmu modelēšanā var tikt apvienotas, piemēram, modelējot tehnoloģisko procesu ķīmiskajā ražošanā, ķīmiskās reakcijas modelē kā nepārtrauktus procesus, ražošanas procesa vadības loģiku modelē, lietojot diskreto notikumu sistēmu modelēšanas pieeju, bet rezervuārus, vārstus un produktu plūsmas modelē, lietojot gabaliem lineārus agregātus [22]. Var piezīmēt, ka viena sistēma var tikt modelēta dažādu pieeju ietvaros atkarībā no pētījuma mērķiem un uzdevumiem: kāda veida, līmeņa un precizitātes informācija tiek gaidīta, cik detalizētu, kādā abstrakcijas līmenī vai granularitātes pakāpē modeli ir plānots izveidot. Pēc prasību formulēšanas var pamatot modelēšanas pieejas izvēli.

Vairākums modelējamo sistēmu ir dinamiskās sistēmas. Imitācijas modelēšanas

kontekstā dinamiskā sistēma (DS) tiek interpretēta kā entītiņu kopa, kas evolucionē laikā saskaņā ar noteiktiem likumiem. Mainīgie, kas apraksta sistēmu jebkurā laika momentā, veido sistēmas stāvokli un tiek saukti par stāvokļa mainīgajiem. Sistēmas dinamika var tikt interpretēta kā stāvokļu secība, kas tiek novērota noteiktajā laika posmā. Stāvokļu secība ir dinamiskās sistēmas trajektorija stāvokļu telpā. Turpmāk darbā tiek apskatītas dinamiskās sistēmas.

Dinamiskās sistēmas modelis ir likumu kopa, kas atspoguļo sistēmas attīstības likumus un saista sistēmas pašreizējo un nākamo stāvokli ar iepriekšējiem stāvokļiem. Atkarībā no dinamiskā modeļa veida modelis var tikt realizēts kā analītiskais vai imitācijas modelis.

Dažādu pieeju ietvaros informācija par sistēmas nenoteiktībām tiek interpretēta un atspoguļota dažādos veidos, piemēram, izmantojot varbūtību, izplūdušo kopu un matemātisko pierādījumu un citu teoriju līdzekļus. Turpmāk, ja nav atsevišķi norādīts, tiks izmantota varbūtību teorijā bāzēta nenoteiktību interpretācija, t.i., nenoteiktības izriet no nepilnām vai nepietiekošām zināšanām par sistēmu. Dinamiskie modeļi tiek klasificēti kā determinētie vai stohastiskie atkarībā no parametru raksturojumiem: parametru vērtības var būt pilnīgi vai daļēji neprecīzi noteiktas. Modeļi ar nenoteiktībām tiek interpretēti kā stohastiskie modeļi un to parametri tiek izteikti ar gadījuma lielumu sadalījuma funkcijām.

## 2.1. Analītiskā modelēšana

Analītiskais modelis parasti ir noformulēts analītisko izteiksmju, formulu veidā, kas atspoguļo matemātisko sakarību starp ieejas datiem un sistēmas darbības rezultātiem (izejām). Analītiskā izteiksme nosaka darbību kopu, kas jāizpilda noteiktā secībā, izmantojot argumenta vērtību un konstantes, ar mērķi iegūt funkcijas vērtību [96].

Sarežģītu sistēmu pētīšanas analītiskās metodes izpaužas matemātiskos modeļos, kas apraksta sistēmas elementu īpašības ar matemātiskiem objektiem, vienādojumiem un to attiecībām. Modeļa realizācija analītiskajā formā visbiežāk izmanto vienādojumus kā modeļa aprakstīšanas veidu un pieder pie modeļu zīmju formām. Vienādojumu tipi var būt dažādi – tiešās izteiksmes, kas atrisinātas attiecībā pret meklētajiem mainīgajiem, vai netiešās izteiksmes, kas sasaista raksturojumus un parametrus: piemēram, funkcionālā formā  $y = f(x)$ ; diferencu vienādojums  $y_{n+1} = ay_n + bx_n$ ; diferenciālais vienādojums  $dy/dt = f(x)$  [21].

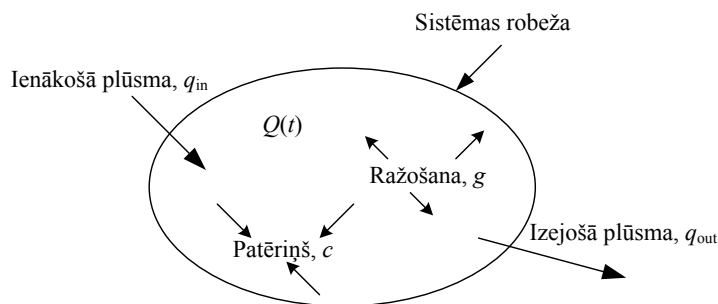
Analītiskie modeļi tiek realizēti kā vienādojumi, lineārās programmēšanas modeļi, rindu sistēmas, regresijas modeļi, bilanču ekonomiski matemātiskie modeļi, nosvērtu grafu modeļi un citas matemātiskās shēmas [6, 92]. Tādi modeļi ir atsevišķu matemātikas nozaru objekti. Modeļa tipu var izvēlēties saskaņā ar pētāmās sistēmas procesa tipu. Piemēram, ja sistēmas

funkcionēšanas procesu var raksturot kā nepārtrauktu determinētu, tipveida modelēšanas pieeja var būt standarta diferenciālvienādojumu risināšana, diskrēto determinēto funkcionēšanas procesu var modelēt kā galīgo automātu [81], diskrēto stohastisko – kā varbūtisko automātu [97], nepārtraukto stohastisko – kā rindu sistēmu [8], universālo pieeju var nodrošināt agregāts [93]. Tradicionāli objektu plūsmu analītiskās modelēšanas galvenās metodes ir diferenciālvienādojumi [16], rindu teorija [74] un grafu teorija [15].

Uzskatāms dinamiskās sistēmas analītiskās modelēšanas piemērs vispārīgā veidā tiek piedāvāts [16]. Sistēmas procesa vienkāršotais attēls ir aplūkojams 2.1. att. Attēlā ir redzama pētāmās sistēmas robeža, sistēmas pētāmā īpašība tiek apzīmētā ar  $Q(t)$ . Sistēmas mijiedarbība ar apkārtējo vidi tiek realizēta ar ienākošo  $q_{in}$  un izejošo  $q_{out}$  plūsmu, sistēmas iekšējie procesi ir patēriņš un ražošana, kas ietekmē pētāmo īpašību.  $t$  – laiks – ir neatkarīgais mainīgais. Vispārīgais  $Q$  īpašības vienādojums, ņemot vērā saglabāšanas un līdzsvara likumus, var tikt pierakstīts šādi:

$$\frac{\partial Q(t)}{\partial t} = q_{in}(t) + g(t) - q_{out}(t) - c(t), \quad (2.1)$$

Vienādojums (2.1) ir tempu vienādojums, jo visiem vienādojuma locekļiem ir tempu nozīme un mērvienības. Modeļa vienādojums nav „plūsmas vienādojums” tiešā nozīmē, taču īpašības  $Q(t)$  izmaiņas laikā vienādojumu var interpretēt kā plūsmu un krājumu vienādojumu. Materiālo plūsmu apstrādes sistēmas attēlošana tīkla struktūras veidā ļauj formalizēt plūsmas ar grafu teorijas metodēm. Grafa šķautnes „nes” kādu plūsmas vielu vai objektus – ūdeni, elektrību vai datus. Katrai grafa šķautnei detalizēti tiek aprakstītas šķautnes plūsmas intensitāte un virziens. Parasti grafam ir tikai daži mezgli, kas ir plūsmas ieejas un izejas punkti tīklā. Katram grafa mezglam, kas nav ieejas vai izejas punkts, tiek noteiktas saites ar citiem grafa mezgliem un var tikt pierakstīti vienādojumi, kas atbilst nezūdamības likumiem: kopējais ienākošo plūsmu vielas daudzums ir vienāds ar kopējo izejošo plūsmu vielas daudzumu. „Plūsmu grafu teorija” ir ne tikai lietderīga reālo plūsmu pētījumiem bet arī



2.1. att. Modelējamās dinamiskās sistēmas attēls, adaptēts no [16]

nodrošina „saplūšanu” ar citām grafu teorijas daļām [12].

Materiālo plūsmu apstrādes sistēmas modeļa piemērs orientētā grafa veidā ir aplūkojams 2.2. att. Šajā attēlā ir piedāvāts ostas ogļu termināla tīkla modelis. Orientēta grafa  $G(V,E)$ , kas attēlots šajā attēlā, virsotnes  $V=\{v_1, v_2, \dots, v_{11}\}$  ir savienotas ar lokiem ( $|E|=17$ )  $E=\{(v_1, v_2), (v_2, v_3), \dots, (v_{10}, v_{11})\}$ , katram lokam  $e \in E$  piemīt tā caurlaides spēja  $c(e)$ , eksistē viena virsotne  $v_1$  – avots un viena virsotne  $v_{11}$  – noplūde. Virsotnei  $v_1$  izejošo loku kopa ir tukša kopa, bet virsotnei  $v_{11}$  ieejošo loku kopa ir tukša kopa. Grafa virsotnes attēlo ogļu vagonu apstrādes un gaidīšanas pozīcijas ostā, grafa loki – viensliežu ceļus, kuru caurlaidspēju nosaka to garums un lokomotīves jauda. Ar grafa modeli iespējams risināt maksimālās plūsmas novērtēšanas uzdevumu, veikt šķēlumu caurlaides spējas un plūsmas lieluma šķēlumos aprēķinus. Modelis var tikt izmantots arī kā transporta tīkla konceptuālais modelis imitācijas modeļa veidošanai [55].

Materiālo plūsmu apstrādes sistēmas modeļa piemērs rindu sistēmas tīkla modeļa veidā ir aplūkojams 2.3. att. Pētāmās sistēmas process ir shematiski attēlots kā rindu sistēmu vienkāršu elementu tīkls. Rindu sistēmas elementi attēlā ir: avots, noplūdes punkti, apkalpojošie kanāli, zarošanas punkti, rindas un pieprasījumu plūsmas, kas atspoguļo reālā transporta mezgla vagonu iebraukšanas un aizbraukšanas punktus, iekraušanas un izkraušanas pozīcijas, maršruta izvēles punktus, vagonu gaidīšanas vietas un vagonu kustības maršrutus. Analizējot procesu transporta mezglā ar rindu teorijas metodēm, ir iespējams novērtēt iekraušanas un izkraušanas pozīciju noslodzi, rindu garumus un gaidīšanas laikus, vagonu iekraušanas un izkraušanas laikus, vagona atrašanās laiku transporta mezglā. Novērtējumi analītiskā veidā ir iegūstami tikai pie noteiktiem nosacījumiem par plūsmas un apkalpojošo kanālu īpašībām. Gadījumā, ja nosacījumus nevar uzskatīt par reāliem, ir jāizvēlas cita modelēšanas pieeja.

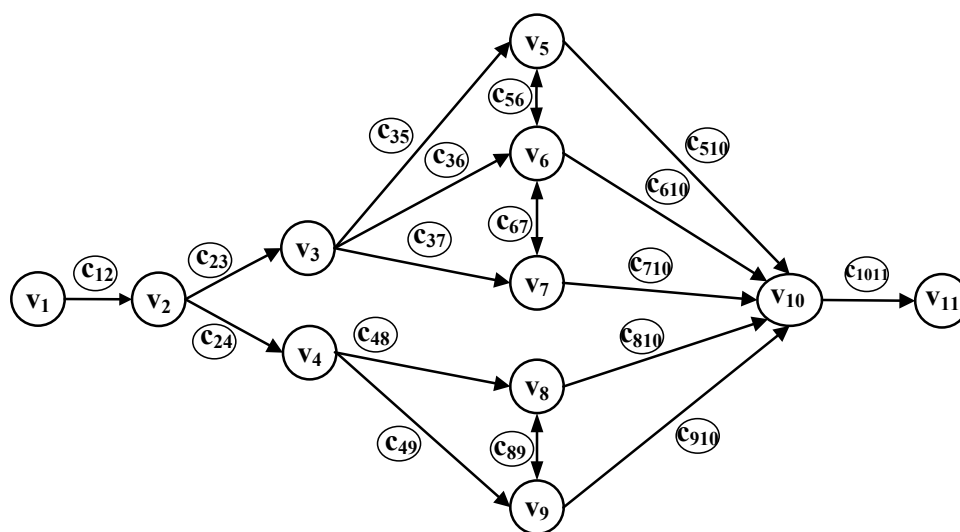
Analītiskajām metodēm un modeļiem piemīt vairākas vērtīgas pozitīvās īpašības:

1. Likumsakarības, kas noformulētas analītiski, ir precīzas, ņemot vērā pieņēmumus, un likumsakarību vienādojumus var izmantot ar citām metodēm iegūtu rezultātu pārbaudei.
2. Analītiskiem modeļiem ir izzināšanas raksturs. Analītiskas likumsakarības nosaka raksturojumus visai parametru telpai un ļauj noteikt sistēmu atbilstošu uzvedību pie jebkura parametru sakombinējuma. Analītiskie modeļi ļauj noteikt raksturojumu ekstremālās un galīgās vērtības un novērtēt parametru izmaiņu ietekmes rezultātus.

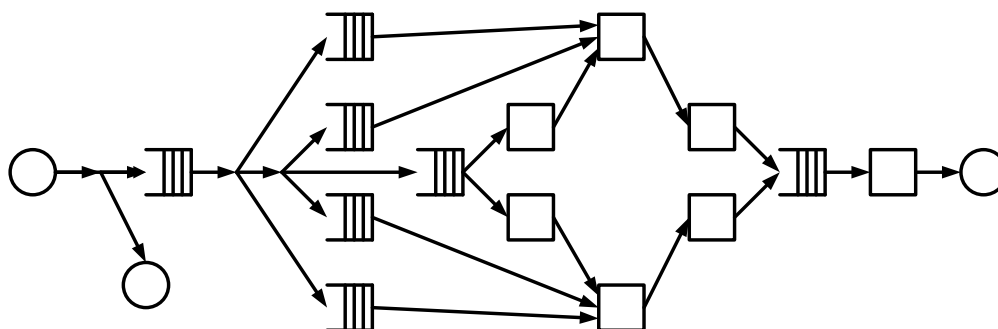
Analītiskiem modeļiem piemīt mazs aprēķinu apjoms, salīdzinot ar skaitliskām metodēm, kas ir svarīga īpašība sintēzes uzdevumu risināšanai, jo optimizācijas procesā aprēķini tiek

vairakkārt atkārtoti.

Parasti elementu un sistēmu īpašības var izteikt analītiskā formā pie noteiktiem pieņēmumiem par aprakstīto objektu īpašībām un uzvedību, piemēram, dažiem faktoriem jābūt neatkarīgiem savā starpā, dažos gadījumos atkarīgumam jābūt lineāram, stāvokļa izmaiņām jānotiek momentāni utt. Ja šādi pieņēmumi atbilst realitātei, tad modelis atspoguļo būtiskas likumsakarības starp raksturojumiem un parametriem. Tomēr pieņēmumi bieži izraisa modelējamās likumsakarības būtiskas atšķirības no īstā objekta likumsakarībām un raksturojumi tiek attēloti ar neprecizitātēm. Piemēram, pieņēmums par to, ka process var tikt interpretēts kā Markova process, var būt kļūdainis un izraisa modeļa neprecizitātes un nepareizus novērtējumus. Masu apkalpošanas teorijas analītisko metožu pielietojamības pamatā ir pieņēmums par pieprasījumu ierašanās laika intervālu un apkalpošanas laiku sadalījumiem kā par eksponenciāliem. Gadījumā, kad pieņēmums izpildās, analītiskā metode ļauj precīzi novērtēt sistēmas raksturojumus, citos gadījumos modelēšanas rezultāti var būtiski atšķirties no reāliem raksturojumiem [76]. Alternatīva pieeja gadījumā, kad nav iespējams veikt



2.2. att. Transporta mezgla grafa modelis



2.3. att. Transporta mezgla rindu sistēmas tīkla modeļa fragments

analītisku sistēmas vai procesa modelēšanu, var būt imitācijas modelēšana.

## 2.2. Imitācijas modelēšana

Galvenās imitācijas modelēšanas pieejas ir: sistēmu dinamika (*discrete time* – diskrēta laika), diskrētu notikumu sistēmu (*discrete event*) un kombinētu sistēmu (*discrete rate*, nosaukums modelēšanas teorijā vēl nav stingri noteikts) modelēšanas pieejas. Pieejas atšķiras savā starpā ne tikai ar laika skaitīšanu modeļos un modeļa stāvokļu raksturojumu veidiem, bet arī ar procesu detalizācijas līmeņiem. Tās bieži papildus raksturo kā makroskopisku, mikroskopisku un mezoskopisku pieeju [35]. Nepārtrauktu sistēmu imitācijas modelēšanas pētījumus visbiežāk veic ar sistēmu dinamiku, modelējot globāla mēroga sistēmu procesus. Diskrētu notikumu sistēmas pētījumus realizē ar DNS modelēšanas pieeju un veido detalizētus procesa modeļus. Modeļiem ir raksturīga atsevišķu kustīgu objektu iekļaušana. Citos gadījumos imitācijas modelis var iekļaut sevī gan detalizētus procesa posmu apakšmodeļus, gan apkopotus objektu plūsmu apakšmodeļus, kur atsevišķi objekti netiek izdalīti. Tādas pieejas var tikt raksturotas kā mezoskopiskās pieejas pēc detalizācijas līmeņa un kombinētās vai hibrīdās pēc pieejām, kas tiek izmantotas modeļa veidošanai. Nepietiekošā problēmas izstrādājuma dēļ neeksistē stabila kombinētās pieejas teorija, turklāt nav pieņemts arī stabils nosaukums, jo dažādi autori izmanto dažādus nosaukumus un dažādi interpretē vienādus nosaukumus [9].

### 2.2.1. Sistēmu dinamika

Sistēmu dinamikas (SD) imitācijas modeļi pieder pie diskrēta laika modeļiem un praktiski realizē *DTSS* modelēšanu. Diskrēta laika modeļi pieder pie visvairāk „intuitīvajiem” dinamisku sistēmu modeļiem [89].

Diskrētā laika formālisms nosaka modeļa pakāpenisku izpildi. Jebkurā atsevišķā laika momentā modelis atrodas noteiktā stāvoklī, un šis stāvoklis nosaka modeļa stāvokli nākamajā laika momentā.

Sistēmu dinamikas modeļu veidošanā lieto diezgan nelielu elementu skaitu, galvenie SD modeļu elementi ir:

- *krājumi* (līmeņi, resursi);
- *plūsmas* (intensitātes);
- *lēmuma funkcijas*;
- *informatīvās saites*.

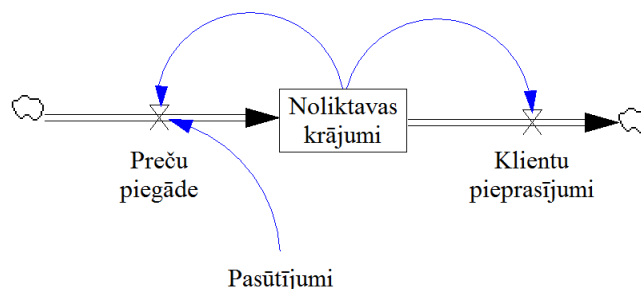
Starp modeļu elementiem ir „plūsmas” elements, kas realizē dažādas dabas plūsmu

modelēšanu sistēmu dinamikas modeļos. Sistēmu dinamikas paradigmā jebkura veida uzkrājumi sistēmā tiek modelēti kā krājumi, piemēram, prece noliktavā, prece ceļā, skaidra nauda bankā, personāls uzņēmumā, pieprasījumi apkalpošanas sistēmā, transporta līdzekļi ceļa posmā utt. Krājumi tiek noteikti ar mainīgo vērtību palīdzību. Jebkurā laika momentā  $t$  krājums var tikt noteikts, izmantojot tā lielumu  $t-h$  laika momentā un ienākošo un izejošo plūsmu starpību. Šeit  $h$  ir izvēlētais modelēšanas laika diskretizācijas solis. Krājumi var tikt novēroti sistēmā miera stāvoklī, un tie raksturo sistēmas sasniegto stāvokli. Plūsmas nosaka krājumu izmaiņas sistēmā un raksturo sistēmas aktivitāti, plūsmas neeksistē miera stāvoklī. Vispārīgā gadījumā lēmuma funkciju vienādojumi nosaka sistēmas uzvedību. Lēmumi tiek pieņemti, izmantojot informāciju par krājumiem un plūsmu intensitāti. Informatīvās saites nodrošina informācijas apmaiņu starp modeļa elementiem.

Vienkāršs sistēmu dinamikas modelis, kas iekļauj sevī visu elementu tipus, ir redzams 2.4. att. Šajā piemērā elements *krājums* imitē noliktavas krājumu izmaiņas, ienākošā *plūsma* – preču piegādi, un izejošā *plūsma* – klientu pieprasījumu apmierināšanu. *Lēmuma funkcija* nodrošina pasūtījumu veikšanas imitāciju un *informatīvās saites* – informācijas apmaiņu.

Modeļa uzvedība un modelēšanas rezultāti ir atkarīgi no diskretizācijas soļa  $h$  izvēles. Praktiski tas nozīmē, ka tiek izstrādāts diskrētais modelis un modeļa stāvoklis mainās ik pēc laika posma  $h$ . Gadījumā, kad diskretizācijas solis ir pārāk liels, modelis var sniegt neprecīzus rezultātus. Savukārt, pie smalkiem diskretizācijas soļiem modelēšanas rezultāti var būt pietiekoši precīzi, bet modeļa datu un aprēķinu apjomi - pārāk lieli. Pareiza  $h$  izvēle ir atkarīga no modelēšanas projekta mērķiem un modeļa autora pieredzes.

Sistēmu dinamikas programmatūra dod iespēju aprakstīt sistēmas uzvedību ar pirmās kārtas diferencu vienādojumu palīdzību. “Tekošais” modeļa stāvoklis tiek aprēķināts pēc formulām, izmantojot iepriekšējo stāvokli. Sistēmu dinamikas teorētiskie pamati tika noformulēti XX. gadsimta 60. gados un tiek plaši pielietoti pasaules mēroga problēmu teorētiskajos pētījumos [38]. Sistēmu dinamikas pamatlicējs Džejs Foresters (*Jay Forrester*) papildus izceļ tādu sistēmu dinamikas modeļu raksturīgu īpašību kā atgriezeniskās saites,



**2.4. att. Sistēmu dinamikas modeļa piemērs**

definējot sistēmu dinamiku šādi: sistēmu dinamika ir nepārtrauktu sistēmu, kā informatīvu sistēmu ar atgriezeniskām saitēm, pētīšana [19]. Atgriezeniskās saites, kā pētāmo sistēmu raksturīgie elementi, vairāk ir saistīti ar sistēmu dinamikas filozofiju, bet modeļu realizācija balstās diskrēta laika sistēmu specifiskācijas formālismā. Modeļi tiek realizēti kā pirmās kārtas diferencu vienādojumu sistēmas, kuru secīgi risinājumi nosaka sistēmas dinamikas modelēšanu. Pie diskrētā laika modeļiem var attiecināt arī tādus diskrēta stāvokļa modeļus kā šūnu automāti [87].

### 2.2.2. *Sistēmu dinamikas vienādojumu sistēma*

Diskrētā laika modeļos laika skaitīšana jeb secīga laika mainīgā  $t$  vērtības palielināšana notiek fiksētos soļos. Sistēmas stāvoklis  $s(t)$  mainās tikai regulāros laika momentos, t.i., ik pēc noteikta, vesela  $\Delta t$  laika vienību skaita. Lielums  $h = \Delta t$  var būt jebkura konstante, kam var būt noteikts mērogs, piemēram 1. Vienādojumu sistēma nav atkarīga no  $\Delta t$  izvēles. Tad laika mainīgais vienmēr pieaug par vienu vienību un stāvoklis mainās šādi:

$$s(t + 1) - s(t) = f(s(t), t), \quad (2.2)$$

kas ir diferencu vienādojums un ir diferenciālvienādojuma diskrētais analogs [18].

Vienādojumu sistēma nodrošina sistēmas stāvokļa noteikšanu jebkurā laika momentā. Tas ir iespējams tad, kad ir zināms iepriekšējā laika momenta stāvoklis. Aprēķinu rezultātā tiek iegūta secīgu risinājumu, kas vienmērīgi sadalīti laikā, sistēma, jo laika intervāls ir konstante –  $\Delta t$ . Krājumu (līmeņu) un plūsmu (intensitāšu) vienādojumi nosaka to vērtības modelī. Turklāt tiek izmantoti papildu un palīgvienādojumi un sākuma nosacījumi. Krājumu noteikšanai pietiekoša ir 1. kārtas vienādojumu integrēšana. Laika intervālam starp risinājumiem jābūt pietiekoši īsam, atbilstošam modelējamās sistēmas dinamisku raksturojumu īpašībām.

Modeļa pamatstruktūra tiek veidota no krājumiem un plūsmām. Lai vienādojumu sistēma atbilstu struktūrai, tai jāatspoguļo cēloņu-seku sakarība pietiekoši vienkāršā matemātiskā formā un jānodrošina nepārtraukta elementu mijiedarbības atspoguļošana. Vienādojumu sistēmai jāatbilst situācijai, elementu mijiedarbības nosacījumiem un lēmumu pieņemšanas procesam.

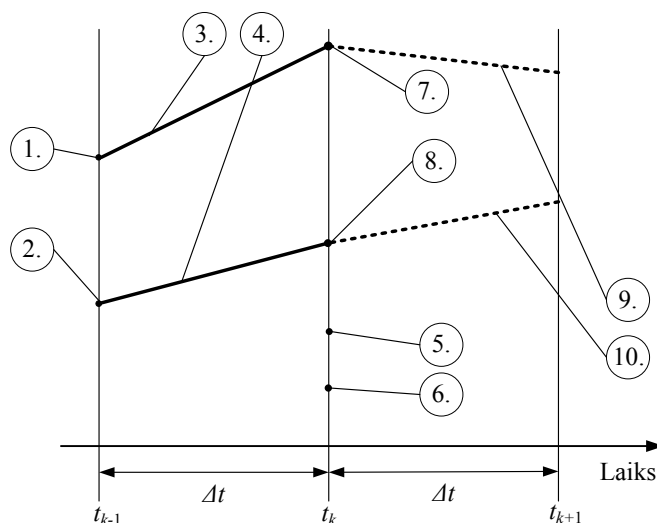
Vienādojumu sistēmas pamatā ir divi vienādojumu pamattipi, kas atbilst krājumiem un plūsmām. Vienādojumu sistēma parasti tiek pierakstīta kopā ar noteiktiem nosacījumiem, kas nosaka vienādojumu risināšanas secību. Vienādojumu sistēma periodiski tiek atrisināta ar mērķi atrast jaunu sistēmas stāvokli. Katrā laika momentā var būt noteikta specifiska aprēķinu

secība, kas ir saistīta ar vienādojumu sistēmas īpašībām. Sistēmu dinamikā ir pieņemta aprēķinu secība, kas aplūkojama 2.5. att., šeit  $\Delta t = const$ .

Laika intervāliem jābūt pietiekoši īsiem, lai varētu pieļaut pieņēmumu par plūsmas intensitātes nemainīgumu šajā intervālā. Pie tam jāiegūst apmierinošs tuvinājums reālās sistēmas mainīgajām plūsmām. Skaidrs, ka ir iespējams izvēlēties tik nelielus laika intervālus, ka taisnes nogriežņi, kas aproksimē nepārtrauktā mainīgā līkni katrā intervālā, būs tuvu stāvokļa mainīgā līknei (2.6. att.). Jaunie krājumu līmeņi tiek aprēķināti intervāla beigām un nosaka tempus nākamajam intervālam. No tā izriet, ka lēmumus, kas pieņemti laika intervālā sākumā, neietekmēs izmaiņas, kas notiek šajā intervālā.

Jo īsāki ir laika intervāli, jo labāka ir aproksimācija. Praktiski ir iespējams izvēlēties jebkādu laika intervālu, kas ir atkarīgs no sistēmas parametriem, aizkavēšanas laikiem un svārstību periodiem sistēmā. Ir jāņem vērā aprēķinu apjoms, kas saistīts ar šo izvēli. 2.5. att. secīgi laika momenti tiek apzīmēti ar  $t_{k-1}$ ,  $t_k$ ,  $t_{k+1}$ . Moments  $t_k$  – pašreizējais laika moments. Laika intervāls  $\Delta t = t_k - t_{k-1}$ . Informāciju par intervālu  $\Delta t$  var izmantot vienādojumu risināšanai. Informācija par krājumiem un plūsmām nākotnē laika momentā  $t_k$  nav pieejama. 2.5. att. punkti 1. un 2. atbilst zināmiem krājuma līmeņiem laika momentā  $t_{k-1}$ ; taisnes nogriežņi 3. un 4. – zināmām plūsmas intensitātēm intervālā  $[t_{k-1}; t_k]$ ; punkti 7. un 8. – krājuma līmeņiem laika momentā  $t_k$ , kas jāaprēķina laika momentā  $t_{k-1}$ ; punkti 5. un 6. – palīgmainīgo vērtībām, kas jāaprēķina pēc līmeņu aprēķināšanas. Taisnes nogriežņi 9. un 10. atbilst plūsmas intensitātēm intervālā  $[t_k; t_{k+1}]$ , kas jāaprēķina laika momentā  $t_k$ .

Skaitliskiem risinājumiem modeļa vienādojumi tiek sadalīti divās grupās: krājuma vienādojumu grupa un plūsmas vienādojumu grupa. Kad notiek kāda intervāla pētīšana, vispirms tiek risināti krājuma vienādojumi. Palīgvienādojumi, kas tiek ievesti aprēķinu



2.5. att. Mainīgo aprēķini laika momentā  $t_k$ , adaptēts no [19]

ērtībai, jārisina uzreiz pēc krājuma vienādojumiem, pirms plūsmas vienādojumiem. Pēc tam risinājuma rezultāti tiek izmantoti plūsmas vienādojumos.

Krājuma vienādojumi rāda, kā var noteikt krājumus laika momentā  $t_k$ , izmantojot krājumu vērtības laika momentā  $t_{k-1}$  un plūsmu vērtības intervālā  $[t_{k-1}; t_k]$ . Laika momentā  $t_k$ , kad notiek risinājums, visa nepieciešamā informācija var tikt iegūta no iepriekšējā intervāla informācijas. Plūsmas vienādojumi tiek risināti pēc tam, kad ir atrisināti krājuma vienādojumi. Tātad, krājumi laika momentā  $t_k$  var kalpot par plūsmu vienādojumu ievaddatiem. Plūsmu vērtības intervālā  $\Delta t$  nosaka konstantu krājumu izmaiņas ātrumu šajā intervālā. Nogriežņu slīpums 2.6. att. ir proporcionāls plūsmu intensitātēm un saista krājumu vērtības atbilstošos laika momentos.

Pēc krājumu vērtību aprēķināšanas laika momentā  $t_k$  un plūsmu aprēķināšanas laika intervālam  $[t_k; t_{k+1}]$  notiek laika momenta “indeksācija”, t.i., iestājas nākošais laika moments  $t_{k+1}$ . Aprēķinu virkne var tikt atkārtota nākamajiem laika momentiem un intervāliem.

Krājuma (līmeņa) vienādojuma piemēru var pierakstīt šādā formā:

$$Krājums(t) = Krājums(t-\Delta t) + (Papildināšana - Samazināšana) * \Delta t, \quad (2.3)$$

Modelēšanas nobeiguma laika momentā  $T$  krājuma „*Krājums*” vērtība ir:

$$Krājums_T = Krājums_{t=0} + \int_0^T (Papildināšana(t) - Samazināšana(t)) dt, \quad (2.4)$$

Dažādas sistēmu dinamikas modelēšanas programmatūra izmanto dažādas skaitliskās integrēšanas metodes, un ir saprotams, ka integrēšanas precizitāti un modelēšanas rezultātu precizitāti ietekmē diskretizācijas soļa lielums. Vienādojumu sistēmas veids nav atkarīgs no  $\Delta t$  izvēles.

Krājumi var tikt novēroti modelī konkrētos laika momentos. Laika intervālos starp noteiktiem momentiem modeļa mainīgo vērtības netiek pārrēķinātas. 2.7. att. ir aplūkojams stāvokļa mainīgā „*Krājums*” trajektorijas piemērs, kas ilustrē šo faktu. Krājuma mērvienības ir daudzuma mērvienības (gab., kg, cilv., utt.), plūsmas mērvienības – krājuma mērvienības laika intervālā (gadā, mēnesī, dienā).

Krājuma vienādojumi savā starpā ir neatkarīgi un tos var risināt jebkurā secībā. Plūsmas vienādojumi tiek risināti, izmantojot informāciju par pašreizējām krājuma vērtībām. Tikai plūsmas ir krājumu izmaiņu iemesli.

Sistēmu dinamikai, kā diskrētā laika sistēmu pētīšanas imitācijas modelēšanas pieejai, piemīt specifiskas īpašības, kas jāņem vērā, veicot materiālo plūsmu apstrādes sistēmu imitācijas modelēšanu [60]:

- diskrētā laika sistēmu modelēšanas pieeja ir vienīgā iespēja veikt nepārtrauktā laika sistēmu imitācijas modelēšanu;
- nepārtrauktā (analītiskā) modelēšana biežāk tiek lietota mākslīgo, tehnisko, ekonomisko un bioloģisko sistēmu modelēšanai, bet sistēmu dinamika – mākslīgu materiālo sistēmu imitācijas modelēšanai;
- vairākos gadījumos materiālo plūsmu apstrādes sistēmu modelēšanai var izmantot gan sistēmu dinamikas, gan diskrētu notikumu pieejas; šādos pētījumos vairāki autori atzīmē lielāku aprēķinu apjomu, kas ir raksturīgs sistēmu dinamikas pieejai;
- materiālo plūsmu modelēšana sistēmu dinamikā tiek veikta, izmantojot analītisku pieeju, t.i., pirmās kārtas diferencu vienādojumus vai plūsmu attēlošanu uzskatāmā grafiskā formā; atsevišķi plūsmas objekti netiek identificēti.

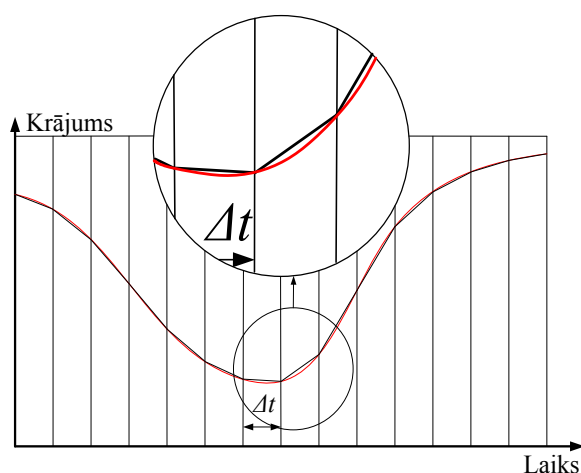
Materiālo plūsmu pētīšana ar sistēmu dinamikas modeļiem visbiežāk tiek izmantota stratēģisko uzdevumu risināšanai.

### 2.2.3. *Sistēmu dinamikas materiālo plūsmu apstrādes sistēmu modeļi*

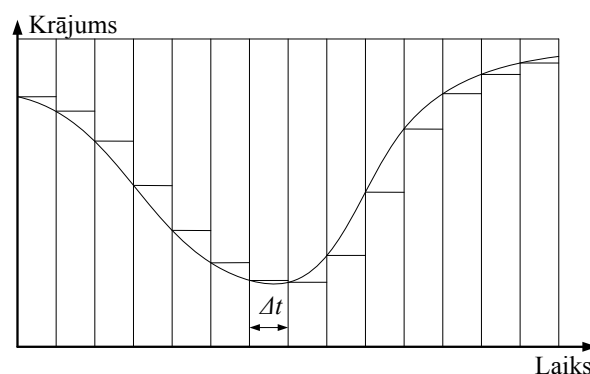
Diezgan liels “abstrakto” makroskopiskā līmeņa sistēmu dinamikas modeļu daudzums tika izveidots 1980. – 1990. gados mākslīgo materiālo sistēmu ar materiālām plūsmām vai materiālo plūsmu apstrādes sistēmu pētīšanai, piemēram, loģistikas piegādes ķēžu pētīšanai.

Makro līmeņa sistēmas tiek modelētas diezgan ilgus laika posmos: mēnešos, pat gados. Tādi modeļi ir diferenciālvienādojumos bāzēti, taču modeļu realizācijai izmanto specifisku pieeju, kas tiek saukta par sistēmu dinamiku vai Forestera sistēmu dinamiku [19].

Praktiskie ieguvumi no sistēmu dinamikas modeļiem procesu raksturojumu novērtēšanā



2.6. att. Krājuma aproksimācija ar taisnes nogriežņiem



2.7. att. Stāvokļa mainīgā „krājums” trajektorijas piemērs

tiek sasniegti diezgan reti. Tas izskaidrojams tādējādi, ka jaunu izstrādāto mākslīgo sistēmu modeļu skaita pieaugums pēdējo gadu laikā, salīdzinot ar citiem imitācijas modeļu tipiem, ir mazāks [60].

Uzskatāmu sistēmu dinamikas modeļa piemēru, kas tieši virzīts uz materiālo plūsmu pētījumiem makroskopiskajā līmenī, iespējams aplūkot 6<sup>th</sup> *World Scientific and Engineering Academy and Society International Conference* materiālos [14]. Autori izstrādāja sistēmu dinamikas modeli reģionam. Modelis tika pielietots situācijas analīzei materiālo plūsmu vadīšanā Eiropas transporta koridoros (*European Corridors V Lisbon-Kiev* un *XXIV Genoa-Rotterdam*). Reģionā ir attīstīta industriālā vide un infrastruktūra: ceļi, dzelzceļi un loģistikas platformas. Pētījuma aktualitāte bāzējas materiālo plūsmu intensitātes pieaugumā reģionā un ar to saistītās prasībās infrastruktūrai (resursiem) un loģistikas pakalpojumiem. Projekta autori piedāvā risināt problēmu ar jaunu iekšējo ostu, kas ļautu efektīvi sadalīt reģiona materiālās plūsmas ar nosacījumu, ka to izvietošana vieta tiks noteikta pēc alternatīvu salīdzināšanas (*Novara* un *Alessandria*). Izstrādātais modelis ļauj veikt materiālo plūsmu apstrādes sistēmas attīstības prognozēšanu reģionam.

Materiālu plūsmu apstrādes sistēmas imitācijas modelis problēmas risināšanai ir izstrādāts krājumu un plūsmu diagrammas veidā, kas ir raksturīgs sistēmu dinamikai. Modeļa veidošanai tika izmantota *Vensim* imitācijas modelēšanas programmatūra. Modelis iekļauj sevī materiālo plūsmu struktūras modeli, ieejas materiālās plūsmas laika modeli, plūsmu maršrutu noteikšanas modeli un citus apakšmodeļus.

Modeļa ieejas dati ietver sevī kravu plūsmu aprakstus, esošo ostu pievilcīguma raksturojumus, transporta plūsmu sadalīšanas starp ostām raksturojumus, kravu apstrādes laikus un citus nepieciešamos datus. Eksperimentālie faktori ir investīciju apjomi un to sadalījums laikā. Ir izpildīta modeļa verifikācija un validācija, vairāki modelēšanas eksperimenti ar dažādiem scenārijiem 20 gadu laikā. Izmantojot galvenos modelēšanas rezultātus (reģiona kopējā caurlaidspēja par visu periodu), ir iegūtas prognozes un ierosināti investīciju risinājumi reģionā.

Ar sistēmu dinamikas modeļiem analizēto sistēmu loks nav ierobežots ar “pasaules mēroga” objektiem. Dažādi projekti tiek realizēti arī atsevišķiem uzņēmumiem, piemēram, uzņēmuma iekšējās loģistikas sistēmas modelis tiek izstrādāts [71], modeļa struktūra un modelēšanas rezultātu fragmenti ir attēloti 2.8. att., kur ir redzamas dažas uzņēmumā eksistējošas materiālās plūsmas, piemēram, piegādāto izejvielu un saražotās produkcijas plūsmas.

Sistēmu dinamikas modelēšanas pieeja tiek pielietota arī dažos projektos Latvijā, taču



nodaļās piedāvā plašu DNS piemēru sarakstus no dažādām sfērām [30, 32, 39, 89 u.c.]. DNS modelē, izmantojot dažādas modelēšanas pieejas, tomēr visbiežāk pētījumus veic ar diskreto notikumu sistēmu modeļiem, kurus bieži sauc arī vienkārši par imitācijas modeļiem.

DNS imitācijas modelēšanas jomā tiek lietota specifiska terminoloģija, kas izveidota saskaņā ar modelēšanas pieejas specifiku. Par *entītij* (*entity*) sauc jebkuru sistēmas objektu, kas tiek apskatīts, veidojot tās imitācijas modeli. Entītijas īpašības apraksta ar *atribūtiem*. Sistēmas *stāvokli* vai statusu definē kā mainīgo lielumu kopu, kas apraksta sistēmas stāvokli dotajā brīdī. Šos mainīgos sauc arī par „stāvokļa mainīgajiem lielumiem” vai vienkārši „stāvokļa mainīgajiem”. Ar *notikumu* saprot parādību, kas notiek momentāni, un tā rezultātā mainās sistēmas stāvoklis. *Aktivitāte* ir tāda darbība sistēmā, kas tiek izsaukta ar noteiktu notikumu, realizējas kādā laika intervālā un tās rezultātā rodas kāds cits notikums. Piemēram, loģistikas sistēmas darbības analīzes gadījumā kārtējo kravas automašīnu var apskatīt kā entītij, piegādātās kravas apjomu un svaru – kā atribūtus, kravas automašīnas ierašanos pie izkraušanas rampas – kā notikumu un kravas izkraušanu – kā aktivitāti, kā rezultātā mainās kravas automašīnas kravas apjoms, t.i., mainās atribūta vērtība un līdz ar to mainās sistēmas stāvoklis. Savukārt, pašreiz aizņemto rampu skaits un to kravas automašīnu skaits, kas gaida rindā izkraušanu, ir stāvokļa mainīgo piemēri.

Tos notikumus un aktivitātes (kā arī atbilstošos mainīgos), kas īstenojas sistēmas ietvaros, sauc par *endogeniem*, bet tos, kas notiek sistēmas apkārtējā vidē (ietekmējot sistēmas stāvokli) – par *eksogēniem* [39].

Sistēmās, kas tiek analizētas kā DNS, procesus raksturo to stāvokļa izmaiņu laika momenti, tai skaitā sistēmās eksistējošo materiālo plūsmu notikumu momenti (sākums, beigas, intensitātes maiņa un citu notikumu momenti). Šajā jomā materiālo plūsmu interpretācijā dabiskā veidā iekļaujas diskreto notikumu sistēmu koncepcija [39].

Iespējams piezīmēt, ka termina „diskrētais” pielietošana dažādās tehniskajās disciplīnās bieži ir saistīta ar sistēmu aprakstu, kuru stāvoklis tiek fiksēts ik pēc noteikta laika intervāla. Tādos gadījumos termina nozīme nesakrīt ar tā interpretāciju diskreto notikumu modelēšanas pieejas ietvaros un termins „diskrētais”, kas attiecas uz laika intervāliem, norāda uz nepārtrauktu modeli.

#### **2.2.6. Diskreto notikumu sistēmu specifiskācijas formālisms**

Diskreto notikumu sistēmu specifiskācijas formālisms, *DEVS*, tika noformulēts Zīglera (*Zeigler*) darbos [88, 89] kā vispārīgs precīzs pamats diskreto notikumu sistēmu imitācijas modelēšanai. Sistēmu modeļi diskreto notikumu formālismu ietvaros tiek aprakstīti

abstrakcijas līmenī, kur laiks ir nepārtraukts, bet ierobežotā laika sprīdī ir iespējams tikai ierobežots jēdzieniski atbilstošu notikumu skaits. Tie ir notikumi, kas var izraisīt sistēmas stāvokļa izmaiņas. Laikā starp notikumiem sistēmas stāvoklis nemainās. Tāda pieeja atšķiras no nepārtrauktās modelēšanas pieejas, kur sistēmas stāvoklis var mainīties laikā nepārtraukti. Pēc būtības *DEVS* formālisms ir galīgo automātu paplašinājums ar diskreto notikumu modelēšanas jēdzieniem un kā tāds kalpo par lietīšķu pamatu jēgpilnu modeļu aprītei diskreto notikumu jomā.

*DEVS* formālisms atbilst vispārīgai determinētu cēlonisku sistēmu struktūrai klasiskajā sistēmu teorijā. Ar *DEVS* ir iespējams veidot sistēmu uzvedības aprakstus divos līmeņos. Zemākajā līmenī atomārais (*atomic*) *DEVS* apraksta gan diskreto notikumu sistēmu autonomu uzvedību kā determinētu pāreju virkni no viena secīga stāvokļa uz citu, gan sistēmas reakciju uz ieejas iedarbēm (notikumiem) un izejas notikumu ģenerēšanu. Augstākajā līmenī asociētais vai saistītais (*coupled*) *DEVS* apraksta sistēmu kā savstarpēji saistītu komponentu tīklu. Komponenti var būt atomārie *DEVS* modeļi vai komponentu tīkli. Saites norāda, kādā veidā komponenti ietekmē viens otru. Atsevišķi viena komponenta izejas notikumi tīklā var kļūt par cita komponenta ieejas notikumiem. *DEVS* formālisms ir noslēgts (*closed under coupling*) un katram saistītam *DEVS* var izveidot ekvivalentu atomāro *DEVS* [89]. Rezultējoša atomārā *DEVS* konstruēšanas procedūra ir abstraktu modelēšanas līdzekļu, kas ir spējīgi izpildīt jebkuru *DEVS* modeli, realizācijas pamatā. Hierarhiska modelēšana tiek atbalstīta, jo saistītais *DEVS* var ietvert sevī saistītus *DEVS* komponentus. Turpmāk dažādi *DEVS* formālisma aspekti ir apskatīti detalizētāk.

Klasiskais atomārais *DEVS* formālisms ir matemātiska struktūra, kas apraksta dažādus diskreto notikumu sistēmu uzvedības aspektus [89]

$$M = \langle X, S, Y, \delta_{int}, \delta_{ext}, \lambda, ta \rangle \quad (2.5)$$

- |   |  |
|---|--|
| kur $X$   | – ieejas vērtību kopa;   |
| $S$   | – stāvokļu vērtību kopa;   |
| $Y$   | – izejas vērtību kopa;   |
| $\delta_{int}: S \rightarrow S$                 | – iekšējā pārejas funkcija, kas nosaka sistēmas stāvokļa izmaiņas, kas atkarīgas no iekšējiem notikumiem, pēc laika intervāla $ta$ ; |
| $\delta_{ext} : Q \times X \rightarrow S$       | – ārējā pārejas funkcija, kur  |
| $Q = \{(s, e)   s \in S, 0 \leq e \leq ta(s)\}$ | – pilna stāvokļu kopa;   |

- $E$  – laiks pēc pēdējās pārejas;
- $\lambda (\lambda : S \rightarrow Y)$  – izejas funkcija;
- $ta : S$  – pozitīvie reālie skaitļi,  $(0, +\infty)$ .

Šos elementus var interpretēt šādi. Jebkurā laika momentā sistēma ir kādā stāvoklī  $s$ . Sistēma būs šajā stāvoklī laika posmā  $ta(s)$ , ja nenotiks ārējais notikums. Ir skaidrs, ka  $ta(s)$  ir reālais skaitlis, kas var būt arī 0 un  $+\infty$ . Kad  $ta(s) = 0$ , laika posms stāvoklī  $s$  ir tik īss, ka nekāds ārējais notikums nevar atgadīties, tad  $s$  ir pārejošs, īslaicīgs stāvoklis. Kad  $ta(s) = +\infty$ , sistēma atradīsies stāvoklī  $s$  nemitīgi, ja vien nenotiks kāds ārējais notikums. Tāds stāvoklis  $s$  ir pasīvs. Kad atnāks laiks  $e = ta(s)$ , uz sistēmas izejas būs signāls  $\lambda(s)$  un stāvoklis mainīsies uz  $\delta_{int}(s)$ . Atzīmēsim, ka izejas signāls ir iespējams, tieši pirms notiks iekšējā pāreja [84].

Gadījumā, kad ārējais notikums  $x \in X$  notiks pirms izbeigšanās laika, t.i., laikā, kad sistēma ir stāvoklī  $(s, e)$  un  $e \leq ta(s)$ , iestāsies  $\delta_{ext}(s, e, x)$ .

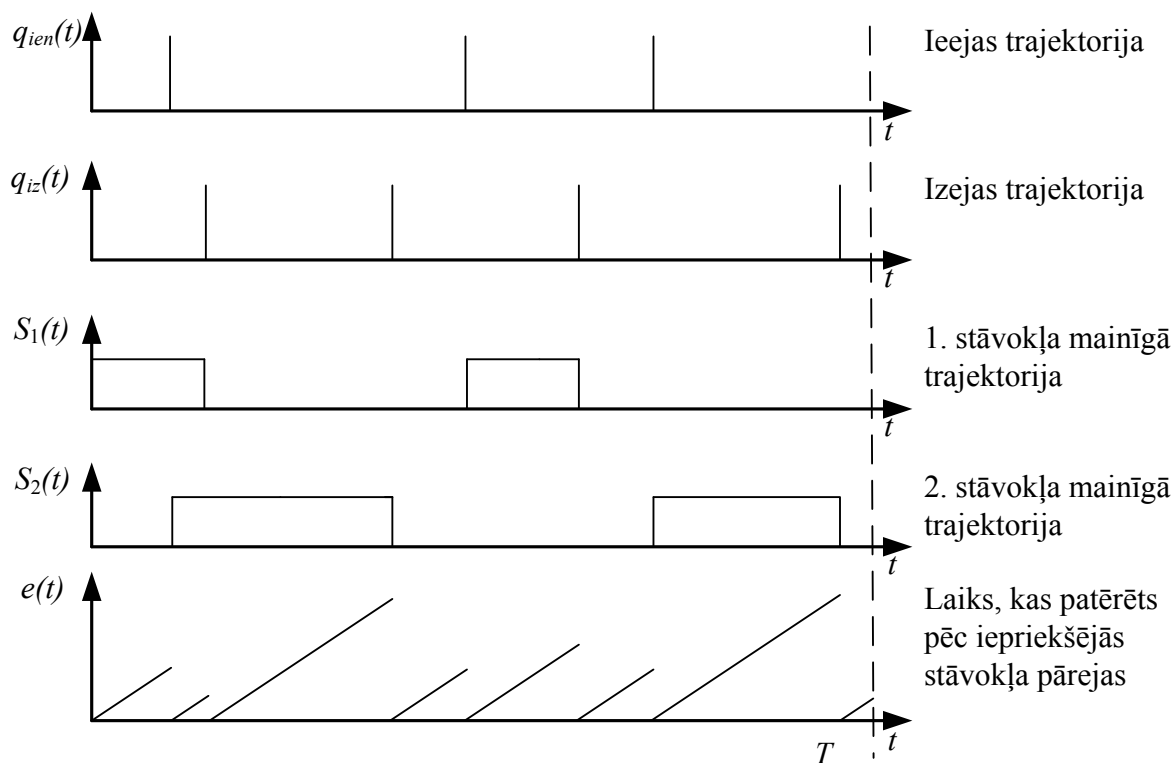
Tātad iekšējā pārejas funkcija nosaka jaunu sistēmas stāvokli laika posmā pēc pēdējās pārejas, ja nav noticis ārējais notikums. Ārējā pārejas funkcija nosaka jaunu sistēmas stāvokli, kad noticis ārējais notikums – šāds stāvoklis ir noteikts ar ieejas iedarbi  $x$ , esošo stāvokli  $s$ , un atrašanās ilgumu  $e$  šajā stāvoklī  $s$ . Abos gadījumos gala rezultātā sistēma ir stāvoklī  $s'$ , atrašanās ilgums šajā stāvoklī ir  $ta(s')$  utt.

Šis *DEVS* modeļa semantikas skaidrojums ierosina, bet neapraksta pilnībā, modelēšanas līdzekli, kas veiks modeļu izpildi to uzvedības ģenerēšanai.

Galvenais *DEVS* ieguldījums ir tradicionālās pārejas funkcijas sadalīšana divās apakšfunkcijās: iekšējā pārejas funkcijā un ārējā pārejas funkcijā. Iekšējās pārejas funkcijas  $\delta_{int} : S \rightarrow S$  izmantošanas ieguvums ir modeļa autonomās attīstīšanas iespēja. Ja modelis laika momentā  $t$  atrodas stāvoklī  $s$ , tad laika momentā  $ta(s) = t + e$  modeļa stāvoklis var mainīties uz  $s'$ , lai gan ārējo notikumu laika intervālā nav bijis.

*DEVS* modeļa uzvedības interpretācija trajektoriju veidā ir aplūkojama 2.9. att. Attēlā redzamās līknes ir ieejas  $q_{ien}(t)$  un izejas  $q_{iz}(t)$  notikumu vērtību secība, stāvokļa trajektorijas  $S_1(t)$  un  $S_2(t)$ , atlikušā laika  $e(t)$  trajektorija. Interpretējot notikumu vērtību secību kā ieejas un izejas plūsmas, ir iespējams konstatēt, ka plūsmas *DEVS* pieejas ietvaros tiek modelētas kā diskrētās plūsmas, kas sastāv no plūsmas vienībām jeb vienības porcijām.

Diskrētu notikumu sistēmu modelis ģenerē tādu modeļa uzvedību, kas atbilst *DEVS* formālismā definētajam aprakstam. Stāvokļa trajektorijas šīs modelēšanas pieejas ietvaros būtiski atšķiras no iepriekšējā nodaļā attēlotajām diskrētā laika modeļa stāvokļa trajektorijām un uzskatāmi demonstrē divu apskatīto modelēšanas pieeju atšķirības.



2.9. att. *DEVS* modeļa trajektoriju piemērs

### 2.2.7. Diskrētu notikumu sistēmu imitācijas modelēšanas koncepcija

DNS modeļu bāzes komponentes ir līdzīgas sistēmu komponentēm. Atšķirību starp tām nosaka gan modeļa specifika, salīdzinot ar reālām sistēmām (piemēram, šeit daudz uzmanības jāvelta informācijas par modelēšanas gaitu un rezultātiem vākšanai, apstrādei un analīzei, kā arī jāparedz speciāli vadības mehānismi, tādi kā laika vadība, kas reālās sistēmās vai nu darbojas automātiski, vai vispār nav vajadzīgi), gan arī konkrētu pielietoto modelēšanas rīku specifika [39].

*Dinamiskie objekti* jeb entītijas imitācijas modeļos bieži attēlo reāli eksistējošus modelējamās sistēmas elementus. Imitācijas modelī dinamiskie objekti tiek ģenerēti, tie kādu laiku pārvietojas pa modeli un tiek iznīcināti, kad pienāk laiks tos izvest no modeļa (var gadīties arī tādi dinamiskie objekti, kas netiek iznīcināti un cirkulē modelī). Piemēram, modelējot transporta sistēmu, dinamiskie objekti bieži reprezentē transporta līdzekļus, savukārt loģistikas uzņēmuma modelī tie varētu attēlot konteinerus vai paletes. Var gadīties arī situācijas, kad entītijas modelē reāli neeksistējošus elementus. Piemēram, dinamisko objektu var lietot kādas loģiskās funkcijas realizēšanai vai ar tā palīdzību modelēt izkraušanas iekārtu pieejamību, kas atkarīga no laika apstākļiem [30].

Dinamisku objektu individualizācijai lieto *atribūtus* - lielumus, kas raksturo visas dotā veida entītijas, bet katrai konkrētajai entītijai pieņem savu specifisku skaitlisko vērtību. Piemēram, modelējot automašīnu ražošanu, var rasties nepieciešamība ieviest atribūtus, kuros pierakstīt katras atsevišķas automašīnas komplektāciju, krāsu un plānoto piegādes laiku [39].

Mainīgie lielumi (vai vienkārši *mainīgie*) satur informāciju, kas raksturo visu modeli kopumā, neatkarīgi no tajā eksistējošo entītiju veidiem un skaita. Atšķirībā no atribūtiem, kas ir pievienoti individuālām entītijām, mainīgie raksturo visu modeli kopumā un veido modeļa stāvokļa mainīgo kopu.

Entītiju apkalpošanu vai apstrādi modelī veic *resursi*, kas attēlo tādus elementus kā apkalpojošais personāls, aparātūra (piemēram, darbagalds), glabāšanas vieta noliktavā utt. Gadījumā, ja entīcija nevar tikt pie apkalpošanas resursa, jo tas ir aizņemts ar citas entītijas apkalpošanu, tai ir jāpavada kāds laiks gaidot, līdz resurss atbrīvosies. Gaidīšanai ir paredzētas *rindas*.

Par *procesu* sauc laikā sakārtotu *notikumu* secību, kas attiecas uz entītiju, kamēr tā pārvietojas pa modeli.

Lai sagatavotu modelēšanas rezultātus, uzkrāj modelēšanas datus, izskaitļo sistēmas funkcionēšanas procesa raksturojumus. Šiem raksturojumiem parasti ir stohastisks raksturs. Aprēķinos lieto atbilstošas matemātiskās statistikas metodes. Datu *uzkrājēji* ir mainīgie lielumi, kuru vērtību, iesākot modelēšanu, pielīdzina sākuma vērtībai un pārrēķina katru reizi, kad modelī realizējas atbilstoši notikumi. Piemēram, modelējot ražošanas sistēmu, uzkrājējā akumulē saražotās produkcijas apjomu. Mūsdienīgās modelēšanas sistēmās statistiskie uzkrājēji pamatā tiek uzturēti automātiski.

Centrālā loma imitācijas modeļa darbībā, kad tiek realizēti tajā paredzētie procesi, pieder notikumiem. Notikums nozīmē izmaiņas modelī, kas īstenojas momentāni kādā (modelētā) laika momentā, kā rezultātā var mainīties atribūtu, mainīgo vai statistisko uzkrājēju vērtības, kā arī modeļu elementu stāvoklis (statuss). Līdz ar šīm izmaiņām mainās arī visa modeļa stāvoklis. Katram modelim ir raksturīga individuāla iespējamo notikumu kopa.

Imitācijas modeļa vienreizēju modelēšanas procesa realizāciju galīgā modelēšanas laika intervālā  $[0, T]$  sauc par modeļa darba gājienu (vai vienkārši *gājienu*) [20]. Tā īstenošanai nepieciešams sekot notikumiem, kas ir paredzēti nākotnē. Informācija par tiem glabājas notikumu kalendārā. Tas ir plānoto *notikumu saraksts*, kurā tie ir sakārtoti pēc plānotā realizācijas laika. Notikums, kas plānots realizācijai visātrāk, atrodas pašā kalendāra sākumā. Kad modelī jārealizē kārtējais notikums, tas tiek ņemts no notikumu kalendāra sākuma [39].

Imitācijas modeļos paredz laika vadīšanas mehānismu. Šim nolūkam lieto speciālu mainīgo lielumu ar nosaukumu *modelēšanas pulkstenis*. Tajā glabā modeļa pašreizējo laika vērtību. Modeļa laiks pieņem tikai tās konkrētās, atsevišķās vērtības, kad modelī tiek realizēti notikumi. Diskrētu notikumu sistēmu imitācijas modeļos izšķir divus laika skaitīšanas mehānismus. Laika skaitīšanas mehānisms var tikt realizēts, izmantojot, piemēram, *īpašo stāvokļu metodi*, ko sauc arī par *nākošā notikuma laika skaitīšanas mehānismu* (*next-event time advance mechanism*), vai alternatīvu *modelēšanu ar fiksētu soļa garumu* [33].

Diskrētu notikumu sistēmu imitācijas modeļi pieder pie diskrēta stāvokļa modeļiem un praktiski realizē *DEVS* modelēšanas formālismu [89]. Eksistē trīs galvenās, labi aprakstītās un plaši pielietojamās diskrētu notikumu sistēmu modelēšanas stratēģijas: notikumu plānošana, uz aktivitātēm bāzētā un uz procesiem vai uz objektiem orientētā [4, 21, 60, 72, 89, u.c.]. Katrai stratēģijai piemīt individuālas raksturīgas īpašības, kas parasti tiek atspoguļotas modeļu aprakstos. Mūsdienu imitācijas modelēšanas programmatūrā (IMP) lieto arī modelēšanas stratēģiju kombinācijas [89], taču visām stratēģijām ir kopēja īpašība: visi diskrētu notikumu modeļi tiek realizēti „dinamisku objektu plūsmas pasaules uzskatā” [72]. Šajā „skatā” sistēma tiek “attēlota” kā diskrētu, dinamisku objektu satiksme, kas pārvietojas vai plūst no vienas atrašanās vietas uz citu vietu modelī, t.i., DNS ir iespējams analizēt kā dinamisku objektu plūsmu sistēmas.

Plūsmas ir svarīgi un obligāti diskrētu notikumu modeļu elementi, un materiālo plūsmu apstrādes sistēmu modelēšana var tikt efektīvi īstenota diskrētu notikumu sistēmu modelēšanas pieejas ietvaros. DNS modeļos materiālo plūsmu modelēšana tiek veikta kā atsevišķu, identificējamu objektu plūsmu modelēšana, t.i., reālā plūsma tiek pakļauta dekompozīcijai un tiek modelēta ar atsevišķiem objektiem, kas tiek *apkalpoti* vai *apstrādāti* modelī. Resursi, kas realizē nepieciešamās darbības modelī, tiek modelēti kā objekti, kas izpilda atsevišķas operācijas. Modelēšanas process tiek realizēts notikumu plūsmas veidā. Apkopojot datus par notikumu plūsmu modelī, tiek uzkrāti dati modelēšanas rezultātu aprēķināšanai.

Diskrētu notikumu modeļiem ir raksturīgs augsts modeļa elementu detalizācijas līmenis, kas ļauj vairākiem autoriem saukt diskrētu notikumu modeļus par mikromodeļiem atšķirībā no iepriekšējā nodaļā apskatītajiem sistēmu dinamikas makromodeļiem [88].

Diskrētu notikumu sistēmu modelēšanas rezultāti ļauj novērtēt pētāmo sistēmu ražīguma un caurlaidspējas, resursa izmantošanas, apkalpošanas līmeņa un citus raksturojumus. Modelēšanas rezultātiem ir apkopjošs raksturs, atsevišķu dinamisku objektu pārvietošanas novērošana modelī tiek izmantota ļoti reti, parasti modeļa verifikācijas posmā

un šis fakts ir pretrunā ar modeļa dinamisko objektu detalizētu aprakstīšanu.

### **2.2.8. Diskrētu notikumu materiālo plūsmu apstrādes sistēmu modeļi**

Mikroskopiskā detalizācijas līmeņa diskrētu notikumu modeļi tiek lietoti dažādu ražošanas un loģistikas uzņēmumu pētījumos, gadījumos, kad analītisko modeļu izveidošana, standarta statistisko metožu vai rindu teorijas metožu pielietošana nav iespējama. Īsumā var konstatēt, ka diskrētu notikumu modeļi realizē objektu plūsmu apstrādes algoritmu statistisku imitāciju notikumu plūsmas veidā un notikumu plūsmas datu uzkrāšanu turpmākai interpretācijai: rezultātu apkopošanai, vizualizācijai vai citiem nolūkiem. Ar diskrētu notikumu modeļiem pētāmo objektu funkcionēšana tiek imitēta ļoti precīzi [40].

Pēc sistēmas pētīšanas, datu vākšanas un konceptuālā modeļa izveidošanas visi objekti, kas ir uzskatāmi par svarīgiem pētījuma kontekstā, tiek iekļauti mikroskopiskajā modelī. Objektiem var būt gan statisks (telpas, aprīkojums, u.c.), gan dinamisks (transporta līdzekļi, gājēji u.c.) raksturs. Viena projekta ietvaros līdzīgas dabas pētāmie objekti var tikt modelēti, izmantojot dažādus modeļa objektus. Šo faktu var vienkārši ilustrēt rindu sistēmas modeļiem, kur cilvēki-klienti tiek modelēti kā pieprasījumi (dinamiskie objekti), bet cilvēki, kas izpilda apkalpošanu, kā resursi („statiskā” rakstura objekti). Parasti kā dinamiskie objekti tiek interpretēti tādi reālās sistēmas objekti, kas izraisa notikumu iestāšanos šajā sistēmā. Diskrētu notikumu sistēmu modelēšanā dinamiskus objektus modelē kā diskrētu objektu plūsmas elementus.

Diskrētu notikumu modelēšanā precīza modeļa izveidošanai ir nepieciešami gan dinamisko, gan statisko objektu detalizēti, mikroskopiski apraksti.

Apskatīsim vienkārša mikroskopiskā modeļa piemēru, kas imitē krājumu vadīšanas procesu noliktavā, izmantojot vienu no pazīstamajām stratēģijām. Detalizēts stratēģijas apraksts ir sniegts R. Balu (*R. Ballou*) grāmatā [3]. Diskrētu notikumu modelī tiek imitēta krājumu vadīšanas *Min-Max* metode, kas ir viena no populārākajām krājumu vadīšanas metodēm, izmantojot vilkšanas (*pull*) pieeju. Modelis tiek realizēts IMP *SIMUL8*. Modelis iekļauj sevī ienākošās dinamisku objektu plūsmas modeli un krājumu papildināšanas procesa modeli. Modeļa ieejas dati ir:

- pieprasījuma pēc produkta apjoms par noteiktu laika periodu; pieprasījums tiek realizēts kā gadījuma lielums ar noteiktu sadalījuma funkciju;
- piegādes laiks;
- modelēšanas laiks.

Eksperimentālie faktori ir stratēģijas parametri – maksimālais un minimālais krājumu

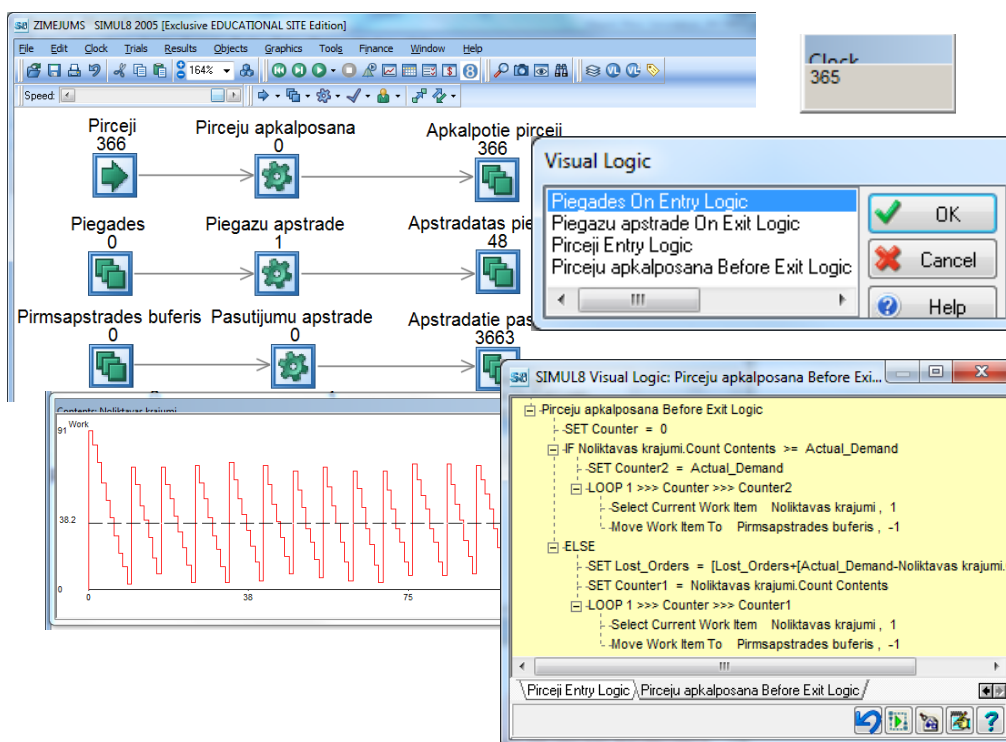
apjoms.

Modelī ir izmantoti SIMUL8 standarta objekti un lietotāja programmas kods, kas realizēts iebūvētā programmēšanas valodā *Visual Logic* [40].

Modelēšanas rezultāti iekļauj apkalpoto pieprasījumu skaitu, saņemto kravu skaitu un apjomu, izpildīto un neizpildīto pieprasījumu skaitu un to apjomu, krājumu izmaiņu statistiku un laika funkcijas. Diskrētu notikumu sistēmas modeļa fragmenti ar modelēšanas rezultātu logiem aplūkojams 2.10. att.

Modelis atspoguļo tikai tās procesa detaļas, kas ir svarīgas *Min-Max* procesa analīzei, pēc nepieciešamības iespējams iekļaut sarežģītāku krājumu vadīšanas algoritmu. Modelis var tikt pielietots dažādu krājumu vadīšanas sistēmu pētījumos vai sarežģītu sistēmu modeļu veidošanā kā to sastāvdaļa. Var atzīmēt, ka diskrētu notikumu modeļi uzskatāmi demonstrē dinamisko objektu plūsmu modelēšanas īpašības. DNS modelēšanas programmatūra piedāvā speciālus rīkus ienākošo plūsmu modelēšanai, to maršrutizācijai un izejošo plūsmu reģistrēšanai.

Tik vienkārši modeļi ir lietderīgi modelēšanas apgūšanas procesā vai arī kā mācību līdzekļi atbilstošās zinātnes nozarēs. Taču mikromodelēšanas pielietošana nav ierobežota ar neliela mēroga objektu pētīšanu. Mikromodeļu raksturīgās īpašības ļauj pētīt arī pasaules mēroga loģistikas sistēmas ar lielu elementu daudzumu, ar sarežģītām saitēm starp elementiem un sarežģītiem vadības algoritmiem. Piemēram, Genujas universitātē ir realizēts



2.10. att. Krājumu sistēmas procesa diskreto notikumu modeļa fragmenti

projekts, kas ietver sevī Genujas (*Genoa*) un La Specijas (*La Spezia*) ostu, kas atrodas Ligurijas apgabalā, Itālijā, diskrētu notikumu modeļa izstrādi un eksperimentēšanu ar to [54].

Pētāmā objekta sastāvā ir vairāki jūras kuģu termināli ar pievedceļiem un atbilstošu infrastruktūru. Pētījuma priekšmets ir intermodālās transportēšanas ķēdes, kas savieno itāļu ostas Ligurijas jūras krastā. Pētāmā problēma ir transporta plūsmu intensitātes pieauguma ietekme uz infrastruktūras izmantošanu. Pētījuma ietvaros ir izveidots diskrētu notikumu sistēmas modelis *Witness* (2000) vidē, kas tika izmantots kā investīciju un iespējamās infrastruktūras rekonstrukcijas lēmumu pieņemšanas atbalsts. Projekta īstenošanas gaitā tika novēroti makromainīgie, tādi kā transporta plūsmu sadalīšanas vērtības, taču pats modelis tika realizēts kā atsevišķu enkurvietu, šķīrotavu u.c. objektu mikromodeļu tīkls.

Modeļa ieejas dati ietver sevī konteineru plūsmu parametrus un resursu telpiskās izvietojuma parametrus, eksperimentālie faktori ir jaunizveidotā sliežu ceļa pieejamība, eksistējošo sliežu ceļu dublēšana un daži aprīkojuma uzlabojumi.

Modelēšanas rezultāti ļauj novērtēt iespējamo „caurlaisto” konteineru skaitu, transportēšanas veida izvēles iespējamību (starp sauszemes transportu un dzelzceļiem) četriem reģiona infrastruktūras attīstības scenārijiem, no kuriem bija izvēlēts viens, kas tika rekomendēts realizācijai.

No piemēriem ir redzams, kā var atšķirties diskrētu notikumu sistēmu modeļu mērogi un ir konstatējams fakts, ka neatkarīgi no pētāmās sistēmas mēroga DNS modeļu pamatā ir dinamisku materiālo objektu plūsmas, kas tiek aprakstītas, izmantojot pieejas plūsmu aprakstīšanas tradicionālās metodes, kas paredz atsevišķu dinamisku objektu detalizētu aprakstīšanu un turpmāku iekļaušanu plūsmā.

Liela mēroga biznesa projektu Latvijā nav daudz. Projekti, kas minēti publikācijās, galvenokārt ir izstrādāti augstskolu pētnieciskajos projektos un ietver sevī transporta vai kravas plūsmu modelēšanu mikrolīmenī [41, 42, 86].

### **2.2.9. Kombinētā modelēšanas pieeja**

Tradicionālās sistēmu imitācijas modelēšanas pieejas (sistēmu dinamika un diskrētu notikumu) var klasificēt kā stāvokļa nepārtrauktu izmaiņu un diskrētu izmaiņu pieejas. Vairumā modeļu galvenais neatkarīgais mainīgais ir laiks. Citi mainīgie (stāvokļa kopas mainīgie), piemēram, iekārtas stāvoklis vai krājuma apjoms ir laika funkcijas, t.i., ir atkarīgie mainīgie, kas mainās nepārtraukti vai diskrēti. Atkarīgo mainīgo vērtības tiek izmantotas raksturojumu vērtību aprēķināšanai. Mākslīgajās materiālu sistēmās tipiski raksturojumi ir caurlaidspējas, resursu izmantošanas, pēdējā izpildes termiņa iestāšanās varbūtību un iekšējo

krājumu (*WIP – Work In Progress*) raksturojumi. Ekonomiskie raksturojumi ir otrās kārtas raksturojumi un var tikt aprēķināti no operāciju raksturojumiem [21].

Nepārtrauktos modeļos atkarīgie stāvokļa mainīgie ir nepārtrauktās laika funkcijas. Piemēram, laiks, kas nepieciešams tankkuģa izkraušanai vai transportlīdzekļa atrašanās vietas koordinātes. Dažos gadījumos ir lietderīgi modelēt diskrēto mainīgo, izmantojot nepārtrauktu interpretāciju, t.i., apkopotā veidā, nevis katru dinamisku objektu atsevišķi. Piemēram, sīki fasēti produkti uz konveijera, tādi kā konfektes, var tikt modelēti diezgan efektīvi, izmantojot nepārtrauktu interpretāciju, kaut gan katra konfekte tiek formēta un ietīta atsevišķi.

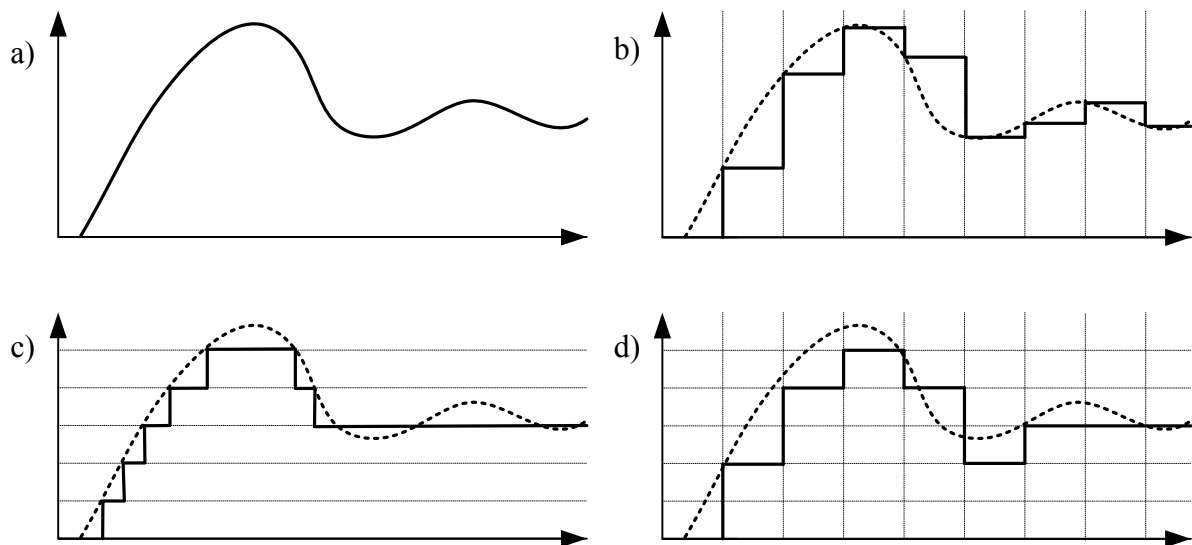
Diskrētu notikumu modeļos atkarīgo stāvokļa mainīgo vērtības mainās tikai atsevišķos laika momentos, kas pieejas ietvaros tiek definēti kā notikuma laika momenti. Piemēram, notikuma laika momenti mākslīgās materiālās sistēmās ir pieprasījumu vai citu dinamisku objektu ierašanās laika momenti vai diskrētu dinamisko objektu plūsmai piederošie īpašie laika momenti, kravu pārvietošanas iekārtu parādīšanās pie kravas apstrādes vietām laika momenti un iekārtu stāvokļa izmaiņu laika momenti – no brīvas uz aizņemtu, no aizņemtas uz salauztu vai bloķētu u.c.

Iespējamās modeļa stāvokļa trajektorijas ir attēlotas 2.11. att. Visos attēlos uz horizontālās ass ir modelēšanas laiks, vertikālās ass – modeļa stāvoklis: a) attēlā redzama nepārtrauktā laika un nepārtrauktā stāvokļa, b) attēlā – diskrētā laika nepārtrauktā stāvokļa, c) – nepārtrauktā laika diskrētā stāvokļa un d) – diskrētā laika un stāvokļa modeļa trajektorijas piemērs.

Nepārtrauktā laika un nepārtrauktā stāvokļa modeļi viennozīmīgi ir analītiskie modeļi, kas nav universāli piemērojami mākslīgo materiālo sistēmu modelēšanai. Pieeju varianti ar diskrētu laiku, t.i., b) un d), neļauj modelī atspoguļot plūsmas dabiskā formā. Kombinējot atkarīgo mainīgo interpretāciju, ir iespējams formulēt specifiskās kombinētās pieejas, kas var būt piemērotas konkrētu uzdevumu tipu risināšanai. Vislabākās iespējas kombinētās pieejas formulēšanai saistās ar c) variantu, proti, ar diskrētu notikumu modelēšanu [21].

Diskrētu notikumu pieejā bāzētās diskrētu objektu plūsmu modelēšanas kombinētās pieejas var būt realizētas, izmantojot nepārtraukto atkarīgo mainīgo ieviešanu. Šajā virzienā ir divas praktiski realizējamas koncepcijas:

1. Modeļa stāvokļa mainīgo izmaiņas modelēšana starp notikumiem, izmantojot analītiskus aprēķinus vai diskrēta laika modelēšanas pieeju laika posmā starp modeļa notikumiem.
2. Iespējamo notikumu saraksta papildināšana ar notikumiem, kas saistīti ar nepārtraukto stāvokļa mainīgo vērtību izmaiņu laika momentiem.



**2.11. att. Modeļu trajektorijas, atkarībā no laika un stāvokļa diskretizācijas variantiem**

Pirmās koncepcijas ietvaros tiek zaudēta diskrētu notikumu laika skaitīšanas priekšrocība – aprēķinu apjoma samazināšana, kad visi stāvokļa mainīgo aprēķini tiek veikti tikai notikumu momentos. Otrās koncepcijas realizācijas variantu var būt diezgan daudz, to nosaka notikumu tipu izvēle. Tomēr abos variantos īpaša uzmanība jāpievērš diskrēto un nepārtraukto modeļa stāvokļa mainīgo mijiedarbībai. Var atzīmēt trīs iespējamās kombinācijas:

1. Nepārtrauktā mainīgā diskrētā, lēcienveida vērtības izmaiņa: piemēram, iekārtas remonta operācijas nobeiguma notikuma momentā kopējais sistēmas ražīgums momentāni pieaug.
2. Nepārtrauktā mainīgā noteiktas vērtības sasniegšana, piemēram, uzkrājēja uzpildīšanas notikums var izsaukt devēja stāvokļa mainīgā vērtības izmaiņu no „pieejams” uz „pilns”.
3. Nepārtrauktā mainīgā funkcionālā apraksta izmaiņas, kas notiek diskrētos laika momentos, piemēram, pasažieru plūsmas intensitātes pieaugums vilciena ierašanās laika momentā.

Kombinētās modelēšanas pieejas formulēšanā var izmantot jebkuru no iepriekšminētajām mijiedarbībām vai to kombinācijas, taču, runājot par diskrētu objektu plūsmu realizāciju, īpaša uzmanība jāpievērš trešajam variantam, jo šis variants ir vislabāk piemērots mezoskopisku plūsmu modelēšanai diskrētu notikumu modeļos.

Tradicionāli kombinētā modelēšanas pieeja, kas apvieno diskrētu notikumu un nepārtraukto mainīgo modelēšanas pieejas, bieži tiek pielietota materiālu pārvietošanas

sistēmu modeļos, kad transporta līdzekļu ātrumu un paātrinājumu modelē kā nepārtrauktos mainīgos, bet iekraušanas vai izkraušanas operācijas modelēšanu veic kā diskreto notikumu modelēšanu [21].

Starp publikācijām, kas saistītas ar imitācijas modelēšanas teorētiskiem aspektiem, ir iespējams atrast daudz tādu, kas piedāvā kārtējo kombinēto pieeju, taču aiz viena nosaukuma slēpj diezgan atšķirīgas modelēšanas koncepcijas.

### **2.2.10. Hibrīdā diskreto notikumu modelēšanas pieeja**

Dažu imitācijas modelēšanas teorijas autoru darbos sastopams termins “hibrīdā modelēšana”, taču ir jāprecizē, kā šī termina galvenā nozīme ir “virtuālo prototipu izveidošana” (*virtual prototyping*), t.i., modelēšanas pieeja, kas apvieno dabiskas un abstraktas komponentes sarežģītu inženiersistēmu modeļos. Tāda veida modeļi sastāv no divām aktīvi mijiedarbošajām sastāvdaļām, t.i. no materiālās sistēmas, kas ir pētāmās sistēmas sastāvdaļa un virtuālas sistēmas, kas ir sistēmas atlikušas daļas datormodelis [62]. Tādu modeļu tipu izveidošana un pielietošana daļēji atrodas ārpus imitācijas modelēšanas pieejām.

Imitācijas modelēšanas jomā nosaukums „hibrīda modelēšana” nevar būt atzīts par vispārēji un konkrētos gadījumos ir jāpārskata tā pielietošanas konteksts: piemēram, *Kouikoglou* un *Phillis* grāmatā runa iet par imitācijas modelēšanas pieeju, kas apvieno diskreto notikumu sistēmu modelēšanas pieeju ar analītiskiem aprēķiniem, modelējot nepārtraukto mainīgo uzvedību starp notikumiem. Šīs pieejas ietvaros laika posmos starp notikumiem tiek pielietota diskretā laika modelēšanas pieeja [31].

Ražošanas plūsmas līniju un tīklu analīzei un optimizācijai ir iespējams pielietot hibrīdu diskreto notikumu modelēšanas pieeju, kas apvieno sevī analītisku un diskreto notikumu modelēšanu [31]. Līdzīgi tradicionālai diskreto notikumu modelēšanai pieejas ietvaros tiek apskatīts ierobežots notikumu skaits. Laika posmā starp notikumiem sistēmas attīstība tiek izsekota analītiski. Pieejas autori apskata dažus modelēšanas piemērus, kas izveidoti, izmantojot šo hibrīdo pieeju ražošanas plūsmu līniju un tīklu analīzei. Hibrīdai pieejai piemīt gan ātrdarbības, gan precizitātes īpašības, kas ir nepieciešamas vairākuma ārkārtēju situāciju analīzei. Autori piedāvā vairāku optimizācijas problēmu risinājumus, izmantojot hibrīdu pieeju, t.sk. buferu projektēšanā, darbaspēka plānošanā un ražošanas vadīšanā.

Pieejas īpašības var būt uzskatāmi identificētas vienkāršas stohastiskas dinamiskas sistēmas ar lūzumiem piemērā.

Sistēma sastāv no divām operācijas vietām *OP1* un *OP2*, starp kurām eksistē buferis *B* ar ietilpību 2. Sistēmā tiek apstrādāti diskretie dinamiskie objekti (pasūtījumi,

izstrādājumi), kas veido plūsmu. Sistēmas stāvoklis jebkurā laika posmā starp stāvokļa secīgām izmaiņām (turpmāk – cikla laiks) var būt aprakstīts kā trijnieks  $\{y_1, z, y_2\}$ , kur  $y_1$  un  $y_2$  –  $OP1$  un  $OP2$  stāvokļi un  $z$  – dinamisku objektu skaits buferī  $B$  šī laika posma sākumā. Šīs sistēmas darbības rezultātus var raksturot sistēmas caurlaidspēja laika vienībā (vidējais dinamisko objektu skaits, kas atstāj sistēmu pēc divām paveiktām operācijām).

Sistēmas darbības likumi:

- dinamisku objektu (DO) avots nodrošina neierobežotu DO plūsmu uz  $OP1$  un  $OP2$ ; tālāk seko DO izejas punkts, kas ļauj tiem bez aizkavējumiem atstāt sistēmu;
- cikla laikā  $OP1$  un  $OP2$  izpilda vienu operāciju ar vienu DO. Jebkurā laika momentā DO skaits buferī  $B$  ir pozitīvā veselā vērtība, kas ir mazāka vai vienāda ar bufera ietilpību;
- jebkurā  $OP_i$  ( $i=1,2$ ) vietā cikla laikā izpilda vienu operāciju ar vienu DO gadījumā, ja  $OP_i$  nav bloķēta vai uz tās ieejas nav pieejamas DO. Cikla laika nobeigumā  $OP_i$  var salūzt ar varbūtību  $p_i$  vai palikt darba spējīga ar varbūtību  $(1 - p_i)$ ;
- jebkura  $OP_i$  ( $i=1,2$ ) vieta, kas salūza cikla sākumā, nevar salūzt atkārtoti tā paša cikla nobeigumā;
- gadījumā, kad  $OP_i$  ( $i=1,2$ ) salūza cikla sākumā, tā tiks salabota cikla beigās ar varbūtību  $r_i$ , vai tiks salabota nākamo ciklu nobeigumā ar noteiktu varbūtību.

Noformulētie darba likumi veido stohastiskās sistēmas modeli, kas var būt raksturots kā hibrīdais diskreto notikumu modelis.

Iepriekš aprakstītā pieeja atšķiras no klasiskās diskreto notikumu sistēmu modelēšanas pieejas un realizē modeļa stāvokļa mainīgo izmaiņas modelēšanu starp notikumiem, izmantojot varbūtību analītiskus aprēķinus. Diskrētie plūsmas objekti tiek modelēti detalizēti kā atsevišķi kustīgie objekti ar atribūtiem.

### **2.2.11. Diskrēto objektu plūsmu detalizācijas līmeni imitācijas modeļos**

Imitācijas modeļi savā starpā atšķiras ar modelējamo objektu aizvietojošo modeļa objektu detalizācijas līmeņiem. Runājot par diskrēto objektu plūsmu detalizācijas līmeņiem, imitācijas modeļi var būt iedalīti trīs galvenās grupās: makroskopiskie modeļi, mikroskopiskie modeļi un mezoskopiskie modeļi. Makroskopiskie modeļi iekļauj sevī plūsmu elementu apakšmodeļus augstā apkopošanas līmenī, bez atsevišķu objektu aprakstīšanas. Plūsmas

intensitāte jebkurā modeļa vietā tiek aprakstīta, nosakot noteiktu objektu daudzumu noteiktā laika periodā (piemēram, automašīnu skaits stundas laikā, kas šķērso krustojumu). Mikroskopiskajā līmenī katrs atsevišķais dinamiskais objekts un tā uzvedība un mijiedarbība ar citiem plūsmas objektiem tiek aprakstīti detalizēti. Mezoskopiskais plūsmas modeļa detalizācijas līmenis atrodas starp makro- un mikro- detalizācijas līmeņiem (no grieķu „*mésos*” – salikteņa daļa, kas apzīmē vidējo vērtību vai objekta atrašanās vietu starp citiem objektiem). Viens no mezoskopiskas pieejas realizācijas variantiem ir atsevišķu dinamisku objektu detalizēta aprakstīšana, kas neiekļauj mijiedarbības aprakstu [26]. Specifisku termina „mezoskopiskā modelēšana” interpretāciju piedāvā *Burghout*, kas uzskata, ka kombinētiem imitācijas modeļiem jāapvieno gan makroskopisko, gan mikroskopisko modeļu īpašības. Šī autora pieeja tiek realizēta, izmantojot dažādu detalizācijas līmeņu modeļu apvienošanu un sinhronu izpildi. Tāds apvienotais modelis ļauj realizēt hibrīdo modelēšanas pieeju transporta sistēmu pētījumos [9].

Plūsmu modelēšana sistēmu dinamikas pieejas ietvaros ir uzskatāma un viegli interpretējama, kas ir svarīga labā īpašība lietišķos pētījumos. Sistēmu dinamikā objektu plūsmu aprakstos atsevišķi objekti netiek detalizēti. Tas ļauj veikt plūsmu vienkāršotu modelēšanu. Plūsmu aprakstīšanas detalizācijas līmenis sistēmu dinamikas modeļos var būt raksturots kā makrolīmenis. Taču plūsmas aprakstīšana ir precīzāka un dabiskāka, ja plūsmas intensitātes izmaiņas notiek nevis pēc vienādiem laika soļiem, bet izmaiņas tiek interpretētas kā notikumi, t.i., apraksts iekļauj sevī atsevišķas mikrolīmeņa detalizācijas pazīmes, bet neiedziļinās objektu individuālo īpašību aprakstīšanā. Tāda pieeja ļauj analizēt sistēmu kā DNS un izmantot diskreto notikumu sistēmu modelēšanas pieejas priekšrocības, kas saistītas ar stāvokļa „mainīgo nemainīgumu” starp notikumiem. Plūsmu detalizācijas līmenis tādās kombinētās pieejas ietvaros var būt uzskatīts par starp- vai mezolīmeni. Pieņemot mezoskopiskas plūsmas koncepciju, pētījumi joprojām paliek DEVS formālisma ietvaros, jo sistēma ar mezoskopiskām plūsmām var būt aprakstīta kā atbilstošā struktūra (2.2).

Ņemot vērā plūsmu aprakstīšanas vienkāršojumus, ir iespējams (bet nav obligāti) vienkāršot arī modeļa operācijas, kas nepieciešamas darbību veikšanai ar „mezoskopiskām” plūsmām.

Daži autori kombinēto pieeju, kas ietver sevī mezoskopisko plūsmu koncepciju, definē kā mezoskopisku modelēšanas pieeju. Sākotnēji mezoskopiskas modelēšanas koncepcija tika noformulēta transporta plūsmu modelēšanas jomā. Tā bieži apzīmē pieejas, kur notiek makro- un mikro- modeļa objektu detalizācijas līmeņu pielietošana viena modelī [9]. Publikācijās minētiem mezomodeliem parasti ir izmēģinājuma raksturs, jo modeļu realizācijai ir

nepieciešama programmatūra, kas vēl nav pieejama IMP tirgū. Tomēr eksistē vairāki IMP, kas iekļauj sevi modelēšanas konstrukcijas, kuras var būt izmantotas mezoskopisku modeļu izveidošanai [63].

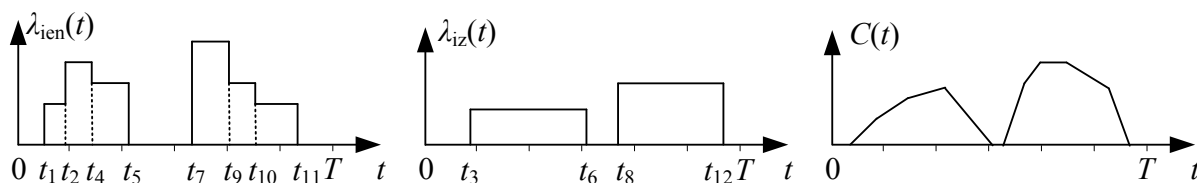
Kombinētās modelēšana pieejas pamati, kas apvieno diskrētu notikumu modelēšanas pieeju ar plūsmu mezoskopisku detalizāciju, tiek piedāvāti pasažieru plūsmu IM pētījumā [81]. Pētījuma ietvaros realizēta skaidri iezīmēta pieejas pielietošana, kas atšķirībā no tradicionālās diskrētu notikumu modelēšanas pieejas ar plūsmas mikroskopisku detalizāciju neprasa individuālu diskrētu objektu modelēšanu. Kustīgie objekti tiek modelēti kā nepārtrauktā plūsma, kas attēlo objektu grupas. Piedāvātā pieeja var būt pielietota ne tikai pasažieru plūsmu modelēšanai – jebkurā veida objektu plūsmas (kravas, apmeklētāji, transporta līdzekļi u.c.), kam piemīt kopējās īpašības, var izskatīt kā nepārtrauktās plūsmas. Pieeja ir pamatota, jo atbilstoša diskrētu notikuma modeļa rezultātiem ir izteikts apkopojošs raksturs. Atsevišķā kustīga objekta uzvedība modeļa darba gājiena laikā netiek uzskatīta par pētījuma objektu.

Kombinētās modelēšanas pieejas ieviešanas mērķis – apvienot divu tradicionālo modelēšanas pieeju labas īpašības materiālo plūsmu sistēmu modelēšanas jomā un izvairīties no pieeju trūkumiem, piemēram, no liela laika un darba apjoma patēriņa, kas nepieciešams mikroskopisko modeļu izveidošanai un pielietošanai [81]. Šis kombinētās pieejas ar mezoskopisku detalizācijas līmeni pamatprincips tiek formulēts kā „algoritmiskā vadība un analītiskie aprēķini”.

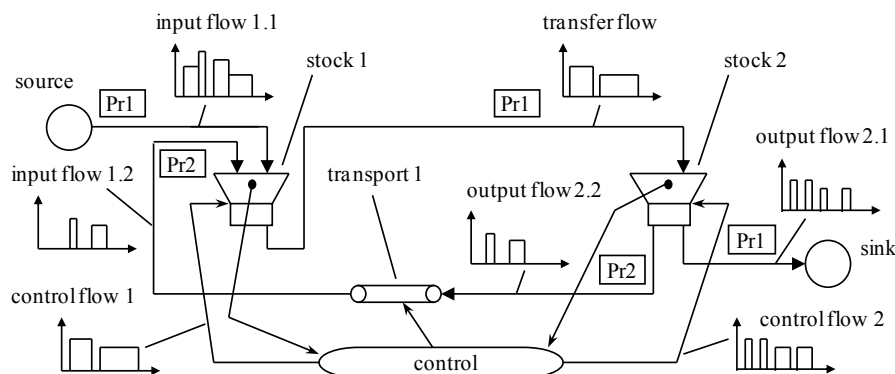
2.12. att. ir aplūkojamas šādas kombinētās pieejas raksturīgo trajektoriju piemēri, – attēlotas viena produkta krājuma izmaiņu procesa kombinētā modeļa trajektorijas. Ienākošā  $\lambda_{ien}(t)$  un izejošā  $\lambda_{iz}(t)$  produkta plūsmas tiek modelētas kā mezoskopiskās plūsmas, t.i. plūsmu intensitātes, kas ir apzīmētās ar  $\lambda(t)$  ar atbilstošo indeksu, ir nemainīgas starp notikumu laika momentiem.  $\lambda(t)$  ir gabaliem pastāvīgās funkcijas starp notikumiem, kas ir plūsmas intensitātes izmaiņu notikumi.  $C(t)$  funkcija attēlo produkta uzkrāšanas rezultātu.

Iepriekšminētās kombinētās imitācijas modelēšanas pieejas pilnvērtīgai realizācijai ir nepieciešami specifiskie modeļa elementi, kas var tikt realizēti kā plūsmas avoti un notekas, daudzkanālu bunkuri un transporta elementi. Elementu vadības funkciju var realizēt vadības algoritma veidā [40]. Mezoskopiskā modeļa realizācijas piemērs, izmantojot atbilstošus modeļa elementus, ir redzams 2.13. att.

Imitācijas modelēšanas programmatūras (IMP) tirgū eksistē universālie IMP, kas ļauj realizēt kombinēto modeļu programmēšanu ar noteiktiem nosacījumiem. Piemēram, *ARENA*



**2.12. att. Kombinētā modeļa ar mezoskopiskām plūsmām trajektoriju attēlošanas piemērs [40]**



**2.13. att. Kombinētā modeļa ar mezoskopiskiem elementiem struktūras piemērs [40]**

modelēšanas vidē ir iekļautas komponentes, kas imitē rezervuārus un cauruļvadus [2]. *SIMUL8* pakotnē ir iespēja apvienot sistēmu dinamikas modeļus un diskreto notikumu modeļus [75], izmantojot iebūvētu programmēšanas valodu. Visdabiskāko pieejas realizāciju ļauj veikt *ExtendSim* pakotne, kuras izstrādātāji tajā realizēja “diskreto tempu” pieeju, t.i. nepārtraukto plūsmu modelēšanas pieeju, kad plūsmas intensitāte ir nemainīga starp diskretem notikumiem [25]. Eksperimentālā programmatūras versija, kas balstās *EXCEL* tabulās un *VBA*, tika realizēta Magdeburgas Universitātē [68]. Taču pilnvērtīgas mezoskopiskās modelēšanas programmatūras izstrādes un pieejas teorētiska pamatojuma problēma joprojām ir aktuāla.

### 2.2.12. Kombinētā transporta tīklu modelēšanas pieeja

Transporta tīklu pētīšanas jomā plūsmas jēdziens ir „dabisks”; transporta plūsmas veido diskreto plūsmas objekti – atsevišķie transporta līdzekļi. Kombinētās modelēšanas pieejas principus transporta tīklu modelēšanas jomā var noformulēt dažādos variantos.

Viens no tiem – objektu apvienošana “paketēs”, kas pārvietojas tīklā. Diskrēto objektu pakete uzvedas kā atsevišķs objekts. Objekta pārvietošanas ātrums ceļa posmā tiek aprēķināts no ātruma sadalījuma blīvuma funkcijas, kas ir noteikta šim posmam, un no faktiskā plūsmas blīvuma posmā. Plūsmas blīvums transporta tīkla posmā tiek noteikts kā transporta līdzekļu

daudzums kilometrā katrai kustības joslai. Kustības joslu izvēle, paātrinājums un bremsēšana netiek modelēti. Pieejas realizācijai ir izstrādāts modelēšanas līdzeklis *CONTRAM* [10].

Vēl viena iespējama pieeja ir saistīta ar individuālu transporta līdzekļu grupēšanu kopējā “šūnā”, kas nosaka to uzvedību. Šūnas šķērso tīkla posmus, un transporta līdzekļi var atstāt šūnas un pievienoties citām šūnām. Transporta līdzekļu kustības ātrums tiek noteikts ar šūnas ātrumu, to neietekmē atsevišķa autovadītāja lēmumi. Šīs pieejas realizācija ir iespējama ar *DYNAMIT*<sup>2</sup> programmlīdzekli.

Atsevišķu grupu veido modeļi, kas interpretē ceļa posmus rindu teorijas pieejas ietvaros, modelējot ceļa posmu, kas sastāv no pārvietojošas daļas un daļas, kas imitē gaidīšanas un apkalpošanas procesu, izmantojot rindu teorijas principus. Ceļa posma kustības joslas var būt modelētas atsevišķi, transporta līdzekļi tiek modelēti individuāli, katram no tiem tiek modelēts individuālais pārvietošanās ātrums, taču citas uzvedības detaļas netiek modelētas. Transporta līdzekļi pārvietojas ceļa posma braucamajā daļā ar ātrumu, kas tiek noteikts ar makroskopisku ātruma-blīvuma funkciju. Ceļa posms beidzas ar rindu sistēmu, kas sastāv no rindas un apkalpojošas iekārtas. Apkalpojoša sistēma realizē transporta līdzekļa pārvietošanu uz citiem ceļa posmiem. Pieejas ietvaros tiek izmantotas detalizētas individuālu transporta līdzekļu modelēšanas priekšrocības ar modeļa kalibrēšanas vienkāršību, lietojot ātruma/blīvuma makroskopiskās attiecības. Pieveja realizēta dažādās variācijās programmlīdzekļos *DYNASMART*, *FASTLANE* un *DTASQ* [10].

Vēl viens kombinētu modeļu tips izmanto šūnu automātus. Ceļa posms tiek diskretizēts līdz šūnām, kas var būt gan tukšas, gan aizņemtas ar transporta līdzekli. Transporta līdzekļu uzvedība tiek pakļauta minimālai noteikumu kopai, kas nosaka, uz cik daudz šūnām pārvietojas transporta līdzeklis vienā laika posmā. Šāda pieeja tiek realizēta programmlīdzeklī *TRANSIMS* [10].

Iepriekšminēto kombinētu modelēšanas pieeju autori visbiežāk izmanto nosaukumu „mezoskopiskā modelēšana”, tomēr pieejas ir diezgan atšķirīgas.

### **2.2.13. Mūsdienu pētījumi kombinētas modelēšanas pielietošanas jomā**

Pēdējo gadu laikā publicēti vairāki raksti, kas saistīti ar kombinētas imitācijas modelēšanas pieejas (diskrētu notikumu modeļi ar diskrēto objektu plūsmu mezoskopisku detalizācijas līmeni) praktisku pielietošanu MPAS modelēšanā [57, 65, 81]. Publikācijās

---

<sup>2</sup> International Series in Operations Research & Management Science, 1, Volume 145, Fundamentals of Traffic Simulation. - New York: Springer, 2010. - Chapter 10. Traffic Simulation with DynaMIT. M. Ben-Akiva, H. N. Koutsopoulos, C. Antoniou and R. Balakrishna. Pages 363-398.

minētie pētījumi virzīti uz konkrētu problēmu risinājumiem, taču pieejas teorētiskā pamatojuma izstrāde ir aktuālā problēma, kas jāatrisina, pirms atbilstošās kombinētās pieejas ietvaros izstrādātos kombinētos modeļus var atzīt par uzticamiem sistēmu analīzes rīkiem.

Nobeigumā jāpiezīmē, ka kombinētā modelēšanas pieeja ar diskrētu objektu plūsmu mezoskopisku detalizācijas līmeni ir loģiska alternatīva diskrētu notikumu modelēšanas pieejai ar diskrētu objektu plūsmu mikroskopisku detalizācijas līmeni, kas ir tradicionālā pieeja. Kombinētā pieeja ļauj izmantot „dabisku” uzdevuma nostādni, kas izmanto plūsmu mezoskopisku aprakstīšanu un apkopotu rezultātu iegūšanu no apkopotiem ieejas datiem. Diskrētu notikumu imitācijas modelēšanas pieejas ietvaros dabiskais plūsmas apraksts tiek aizvietots ar plūsmas dekompozīcijas rezultātu (atsevišķu dinamisku objektu modelēšanu) un modelēšanas rezultāti tiek iegūti, izmantojot diskrētu notikumu plūsmas datu agregatizāciju (zaudējot detalizētus datus par dinamiskiem objektiem). Datu sagrozījums un informācijas zudumi dekompozīcijas/agregatizācijas procesā ir nenovēršami. Principiālā kombinētās pieejas priekšrocība var būt mezoskopisku datu pārveidošana mezoskopiskos rezultātos bez plūsmas attēlošanas diskrētu notikumu formā.

### **2.3. Alternatīvās modelēšanas metodes**

Eksistē arī citas pielietojamas modelēšanas metodoloģijas, kas bāzējas Montekarlo, stāvokļu/darbību, aģentu u.c. metodoloģijās. Šīs modelēšanas pieejas var izmantot specifiskos gadījumos.

#### **2.3.1. Montekarlo modelēšana**

Montekarlo modeļi, kas tiek bieži lietoti noteiktu uzdevumu risināšanai matemātiskajā statistikā, nodrošina rezultātu vērtējumus intervālu veidā. Tāda pieeja ir raksturīga imitācijas modeļiem ar gadījuma faktoriem. Metodes ietvaros tiek lietoti gadījuma skaitļi ieejas parametru nenoteiktības modelēšanai. Rezultāti tiek iegūti pēc aprēķinu sēriju izpildes. Aprēķinus veic vairākas reizes, un katra atsevišķa aprēķina rezultāti tiek fiksēti kā novērojumi. Atsevišķie novērojumi tiek statistiski apkopoti, veidojot novērtējumu un tā iespējamo vērtību diapazonu. Pieeja ļauj novērtēt ne tikai iespējamo rezultātu, bet arī rezultāta iespējamību.

Klasiskais Montekarlo metodes pielietošanas variants ir matemātiska vienādojuma vai vienādojumu kopas formulēšana un vairāku aprēķinu veikšana. Vienādojumi tiek iekļauti imitācijas modelī. Modeļa darba gājiena laikā notikumu momentos izpilda vairākus aprēķinus. Šajā variantā laika faktors netiek ņemts vērā, līdz ar to plūsmu modelēšana klasiskajās

Montekarlo pieejās nevar būt izdalīta kā tipisks uzdevums.

Alternatīva Montekarlo pieeja tiek lietota diskreto notikumu modeļos – gadījuma faktoru iekļaušana modelī un vairāku modeļa darba gājienu rezultātu apkopošana vai viena modelēšanas eksperimenta rezultātu sadalīšana grupās. Šo pieeju var pielietot jebkurā nepārtraukta, diskreto notikumu vai diskreto tempu modelī.

### ***2.3.2. Stāvokļu/darbību modelēšanas pieeja***

Šīs pieejas ietvaros sistēmas tiek modelētas kā diskreto stāvokļu kopas. Dažreiz modeļiem tiek izmantots arī cits nosaukums – stāvokļu diagrammas modeļi. Modelis attēlo sistēmu, kas notikuma rezultāta pāriet citā stāvoklī. Modelis veidojas no stāvokļu sērijām, kur katrs stāvoklis ir atkarīgs no iepriekšēja stāvokļa. Stāvoklim atbilst darbība un notikums, kas izraisīs nākamo pāreju uz citu stāvokli.

Pārejas no viena stāvokļa uz nākamo nav secīgas, un katram stāvoklim var sekot jebkurš cits stāvoklis. Pārejas un sazināšanās starp stāvokļiem tiek pārvaldītas ar noteikumiem: visi stāvokļi uztver notikumus; viens vai vairāki stāvokļi var izraisīt notikumu kā pārejas rezultātu no cita stāvokļa vai stāvokļu grupas; pārejas rezultātā stāvoklis var būt noteikts, izmantojot nosacījumus, kas lieto informāciju par citu stāvokli vai stāvokļu grupu. Stāvokļu/darbību modeļi ir neatkarīgi no jebkuras no trim modelēšanas pieejām (t.i. nepārtrauktas, diskreto notikumu vai kombinētas). Šie modeļi var būt noderīgi dažādu objektu pētījumos, sākot no datorprogrammām līdz biznesa procesiem. Piemēram, diskreto notikumu modelēšanas pieejas ietvaros stāvokļu/darbību modeli var izveidot izmantojot objektus, kuru uzvedība ir atkarīga no stāvokļa. Saglabājot informāciju par katru stāvokli, darbību, notikumu un nākamu stāvokli var attēlot modeļa stāvokļus. Stāvokļu/darbību modeļa piemērs ir diskretā laika Markova ķēde [31].

### ***2.3.3. Aģentu modeļi***

Aģentu modelēšana ir sistēmu modeļu veidošana no atsevišķiem aģentiem (gan individuāliem, gan kolektīviem), to darbībām un mijiedarbībām. Aģentu modeļu īpašības: atsevišķu identificējamu objektu iekļaušanās sistēmas modelī; katra objekta noteikta uzvedība, kuru nosaka noteikumi; objektu savstarpēja ietekmēšanās. Aģentu modelēšana ir saistīta ar atsevišķiem objektiem (aģentiem), kas mijiedarbojas ar citiem aģentiem noteiktā apvidū. Visiem aģentiem ir noteikti uzvedības noteikumi, tomēr aģentiem ir arī noteiktas autonomijas tiesības. Rezultātā modeļa uzvedība laikā nevar būt iepriekš noteikta, jo aģentiem piemīt intelekts, atmiņa, savstarpēja mijiedarbība, konteksta un telpas aptveršana, kā arī

apmācības spējas. Aģentu modeļa piemērs ir Boids (*Boids*) putnu bara modelis, kur katrs bara objekts (putns) ir aģents, kas pakļaujas vienkāršiem noteikumiem [59].

#### **2.3.4. Tīkla modeļi**

Tīkla modeļi ir modeļu klase, kas apraksta materiālu vai citu objektu kustību starp sākuma punktu un galapunktu [50]. Tīkla modeļi bieži tiek lietoti organizatorisku un norīkojuma uzdevumu risināšanā, kā arī tehnikā un informātikā. Daudzi sarežģītu sistēmu modeļi tiek reducēti līdz tīkla modeļiem. Parasti ar tīkla modeļiem apraksta liela vēriena situācijas, piemēram, var izveidot starptautiskas papīra ražošanas kompānijas tīkla modeli. Tīklam jāapraksta visa koksnes kustība vairāku laika posmu ilgumā – sākot no meža uz koksnes noliktavu, tad uz papīra ražotnēm, tad uz noliktavām, izmantojot dažādus transportēšanas veidus, līdz vairumtirgotāju noliktavām dažādās valstīs. Uzņēmumam ir iespēja gūt ievērojamu labumu no piegādes sistēmas dinamiska modeļa globālās operācijās.

Pēdējo gadu laikā aktīvi tiek izstrādāti tīkla modeļos bāzēti programmlīdzekļi piegādes sistēmām un materiālo resursu plānošanas sistēmām. Īpaša uzmanība šajos programmlīdzekļos tiek pievērsta stratēģiskai plānošanai produktu piegādes un sadales fāzēs. Šajā kontekstā termini „piegāde” un „sadalīšana” tiek lietoti diezgan vispārīgā nozīmē – runa var būt par produkcijas, datu, transporta līdzekļu un valūtas plūsmām.

Tīkla modeļu pielietošana reālās situācijās izvirza augstas prasības modelēšanas speciālistu kvalifikācijai un pieredzei modeļu pārveidošanas jomā. Tīkla modeļa priekšrocību pilnvērtīgai izmantošanai nepieciešama modeļa konceptualizācija tīkla struktūras veidā, kas var būt netriviāls uzdevums [50].

#### **2.3.5. Materiālo plūsmu tīkli**

Materiālo plūsmu tīkli (*Material Flow Networks*) ir speciālā Petri tīklu forma, kas ļauj modelēt materiālās un enerģijas plūsmas daudzpakāpju ražošanas sistēmas. Specifiskā pieejas īpašība ir īpašā uzmanība materiālo plūsmu analīzes aspektiem, kas saistīti ar apkārtējo vidi. Modelēšanas pieeja ir diezgan jauna, izstrādāta Hamburgas Universitātē 2000. gadā speciāli materiālo un enerģijas plūsmu aprakstīšanai ekonomikas sfērā. Materiālo plūsmu tīklu (MPT) izstrāde tika pieskaņota dažādu nozaru principiem, taču vissvarīgākie pieejas pamati ir Petri tīklu teorija un divkāršo ierakstu grāmatvedībā.

MPT izmanto Petri tīklu sintaksisku struktūru, bet neizmanto vairumu no formālām īpašībām, kas ir raksturīgas „tīriem” Petri tīkliem. Uzvedības specifiskācijas ir bāzētās divkāršo ierakstu grāmatvedībā un nosaka sistēmas dinamisku uzvedību. MPT piedāvā plašas

attēlošanas iespējas sarežģītām materiālām plūsmām un tās var lietot visu apkārtējas vides vadīšanas uzdevumu risināšanas atbalstam. Materiālo plūsmu analīzei 90.-tajos gados tika piedāvāta *Umberto* programmatūra, kurā modeļos kā sastāvdaļas ir iespējams iekļaut diskreto notikumu imitācijas modeļus. Tāda pieeja atšķirībā no vienkāršas materiālo plūsmu tīklu pieejas ļauj novērot materiālas plūsmas pārveidošanas procesu katrā apstrādes vietā un katrai operācijai. 2005. gadā ir izstrādāts jauns programmlīdzeklis *Milan*, kas apvieno materiālo plūsmu analīzi ar Petri tīkliem un diskreto notikumu modelēšanu [85].

### 2.3.6. Piltuvveida loģistikas sistēmu modeļi

Starp publikācijām par imitācijas modelēšanas pielietojumiem loģistikas jomā var atrast specifiskus modeļus konkrētā tipa sistēmu modelēšanai, piemēram, materiālo plūsmu modelis ražošanas uzņēmuma iekšējā loģistikas sistēmā [93]. Šis modeļu veids ir orientēts tieši uz materiālo plūsmu modelēšanu un līdz ar to var būt noderīgs materiālo plūsmu modelēšanas kontekstā. Galvenais modeļa objekts – „piltuve” – kalpo materiālo plūsmu kustības aprakstīšanas vienkāršošanai atsevišķos loģistikas sistēmas posmos. Ar piltuves palīdzību tiek modelēti tādi objekti, kā cehs, ražošanas iecirknis, darbavieta, noliktavu sistēma vai transporta sistēma. Materiālo plūsmu kustības shēma redzama 2.14. att.

Ienākošie pasūtījumi ir attēloti kā dažāda izmēra ovālās figūras. Figūras izmērs atbilst pasūtījuma izpildes darbietilpībai. Sistēmu raksturo maksimālā caurlaidspēja (jauca), kas tiek sasniegta pie materiālo plūsmu racionālās plānošanas, t.i., pasūtījumu sadalīšanas plāna periodā un pasūtījumu izpildes secības. Pasūtījumu ierašanās un iziešanas grafiskie attēlojumi aplūkojami attēla labajā pusē. Vidējais pasūtījuma cikla ilgums var būt novērtēts pēc formulas:

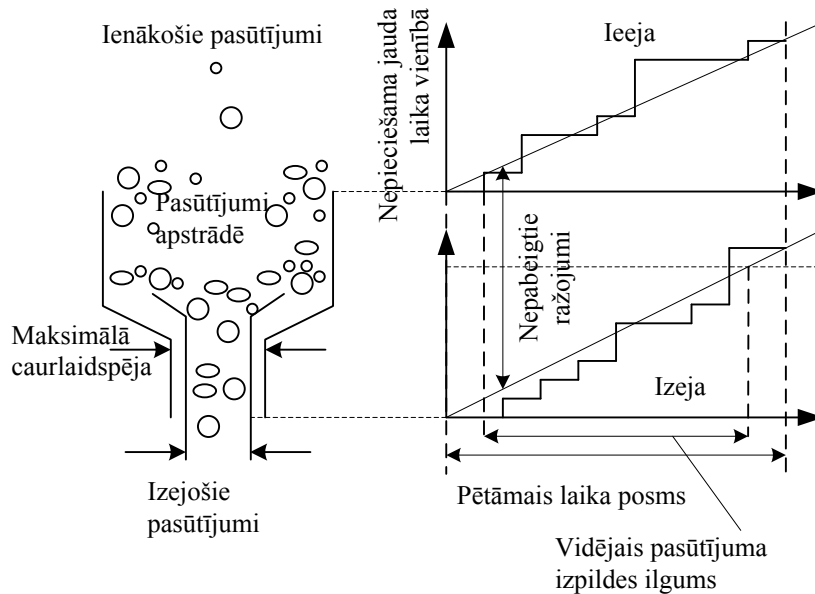
$$\bar{T}_c = \frac{\bar{Z}_n}{N}, \quad (2.6)$$

kur  $\bar{T}_c$  – vidējais pasūtījuma izpildes ilgums;

$\bar{Z}_n$  – vidējais neizpildīto pasūtījumu daudzums vai vidējais pasūtījumu skaits apstrādē;

$N$  – pasūtījumu izpildīšanas vidējā intensitāte.

Autora paskaidrojumi par modeļa īpašībām ir diezgan vispārīgi un nedod priekšstatu par modeļa pielietošanas nosacījumiem vai modeļa realizāciju datorā, taču modelis ir diezgan vienkāršs, uzskatāms un stimulē jaunu pieeju izstrādi materiālo plūsmu modelēšanai.



2.14. att. Piltuvveida loģistikas sistēmas modeļa shēma, adaptēts no [93]

## 2.4. Kopsavilkums un secinājumi

Diskrēto objektu plūsmu modelēšana kā to neatņemamā sastāvdaļa ietilpst iepriekš apskatītajās modelēšanas pieejās. Diskrēto objektu plūsmu imitācijas modelēšanai galvenā uzmanība pievērsta sistēmu dinamikas, diskrētu notikumu sistēmu un kombinētās modelēšanas pieejās. Sistēmu dinamikas pieejas ietvaros apraksta *lielumu plūsmas* vai *procesu lielumu plūsmas*, diskrētu notikumu modelēšanā notiek atsevišķu objektu „izsekošana” plūsmās, kombinētā modelēšanas pieeja apvieno dažus abu tradicionālo pieeju aspektus.

Sistēmu dinamikas nepārtrauktos modeļos laika soļi ir noteikti modeļa darba gājiena sākumā, laika skaitīšana notiek ar nemainīgiem pieaugumiem un mainīgo vērtību izmaiņas ir tieši saistītas ar laika izmaiņām. Šādos modeļos mainīgo vērtības atspoguļo modelējamās sistēmas stāvokli jebkurā atsevišķā laika momentā, modelēšanas laika skaitīšana un virzīšana uz priekšu notiek vienmērīgi. Sistēmu dinamikas nepārtrauktos modeļos objektu plūsmas var būt interpretētas kā šķidrums plūsmas caurulē, jebkurā laika momentā šķidrums apjoms var būt mainīgs, bet kopumā plūsmas ir nepārtrauktas. Plūsmu intensitātes ir nemainīgas laika soļa garumā.

Diskrētu notikumu modeļos sistēmas stāvoklis mainās tikai notikumu momentos, pārējie laika posmi ir „tukši”, t.i., pārējā laikā izmaiņas modelī nenotiek. Atšķirībā no nepārtrauktiem modeļiem modelēšanas laika virzīšana uz priekšu notiek no notikuma līdz nākamam notikumam. 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 spaiņi ar šķidrumu. Vēl viena būtiskā atšķirība ir saistīta ar izejošo plūsmu: spaiņi ar šķidrumu „iziet” no caurules pēc gadījuma laika intervāliem.

Efektīvas kombinētas pieejas modeļos ir iespējams apvienot plūsmu intensitātes nemainīgumu laika intervālā ar paša laika intervāla mainīgo ilgumu, t.i. apvienot sistēmu dinamikas plūsmu nemainīgumu laika intervālā ar diskrētu notikumu laika intervālu gadījuma ilgumu, turklāt iespējamo notikumu sarakstu var papildināt ar plūsmas izraisītiem notikumiem. Tāpat kā kombinētos modeļos, nepārtrauktos modeļos, plūsmas veidojas no „vielās”, nevis no atsevišķiem „ķermeņiem” vai diskrētiem objektiem. Ja plūsmu intensitātes ir nemainīgas starp diskrētiem notikumiem, tad sistēmas stāvokļa izmaiņas tiek modelētas tikai atsevišķos notikumu momentos. Laika posmos starp notikumiem modelī notiek lineāras līmeņu izmaiņas; tā ir galvenā atšķirība no diskrētu notikumu modeļiem. Tomēr plūsmu tempu nemainīgums starp notikumiem ļauj modelēt laika virzīšanu uz priekšu no notikuma līdz notikumam bez starppārķiniem, kā to dara diskrētu notikumu modeļos. Turpinot caurules analogiju, plūsma ir nepārtraukta, bet plūsmas intensitāte mainās momentāni, piemēram, ventiļu stāvokļa izmaiņu momentos.

Dažas sistēmas, īpaši gadījumos, kad plūsmas daļa tiek aizturēta uz laiku, var modelēt, izmantojot jebkuru no pieejām. Šādos gadījumos pieejas izvēle var būt pamatota ar nepieciešamu detalizācijas līmeni: diskrētu notikumu modeļi nodrošina augstāku detalizācijas līmeni salīdzinājumā ar nepārtrauktiem modeļiem. Nepārtrauktu un kombinētu modeļu izpilde parasti notiek ātrāk.

Šajā promocijas darba nodaļā ir veikts dažādu modelēšanas pieeju salīdzinošs pētījums dinamisko objektu plūsmu modelēšanas jomā. Pētījuma mērķis – identificēt neatrisinātās problēmas un uzdevumus, kā arī vispārīgā līmenī definēt prasības kombinētās imitācijas modelēšanas pieejai diskrētu objektu plūsmu modelēšanā.

Šīs nodaļas ietvaros paveiktais:

- izanalizētas galvenās modelēšanas pieejas diskrētu objektu plūsmu modelēšanai;
- aprakstīti kombinētu pieeju realizācijas pamatprincipi un iespējamie varianti;
- paskaidrota kombinētas modelēšanas pieejas teorētiskā pamatojuma nepieciešamība precīzai un uzticamai objektu plūsmu modelēšanai diskrētu notikumu modelēšanā.

Galvenie secinājumi ir šādi:

- tradicionālās imitācijas modelēšanas pieejas nodrošina objektu plūsmu modelēšanu atšķirīgos detalizācijas līmeņos;

- eksistē praktiska iespēja formulēt atšķirīgu tradicionālās modelēšanas pieejās bāzētu kombinētu modelēšanas pieeju, pamatprincipus;
- kombinētās modelēšanas pieejas realizēšana objektu plūsmu modelēšanā var nodrošināt tādu modeļu veidošanu, kas ļauj veikt materiālo plūsmu apstrādes sistēmu efektīvāku pētīšanu, salīdzinot ar tradicionālām imitācijas modelēšanas pieejām.

Nodaļas materiāls ļauj konstatēt, ka efektīvu un uzticamu kombinētu imitācijas modeļu izstrādei ir nepieciešams pieejas sistēmiskais un korektais teorētiskais pamatojums.

### 3. MATERIĀLO PLŪSMU KOMBINĒTĀS MODELĒŠANAS PIEEJAS IZSTRĀDE

Apskatot dažādu modelēšanas pieeju iespējas materiālo plūsmu modelēšanas jomā, var secināt, ka nepieciešams izveidot tādu plūsmu modelēšanas pieeju, kas nodrošina uzticamu materiālo plūsmu apstrādes sistēmu modeļu izveidošanu un modelēšanas rezultātu iegūšanu. Iepriekšējās nodaļās aplūkoti teorētiskie aspekti un problēmas, kas saistītas ar materiālo plūsmu imitācijas modelēšanu tradicionālo pieeju ietvaros, pamato šajā nodaļā piedāvāto kombinēto modelēšanas pieeju.

Klasiskajā diskrētu notikumu sistēmu modelēšanas pieejā ir izteikta pretruna starp atsevišķu objektu detalizētiem aprakstiem, to detalizācijas līmeņiem modelī un modelēšanas rezultātu apkopotam raksturam. Modelēšanas rezultātu iegūšana ir saistīta ar vairākām ieejas datu starppārveidošanām: sākotnējie dati par plūsmām tiek detalizēti līdz individuāliem diskrētiem objektu aprakstiem, turklāt resursu modelēšanā arī tiek pielietota ieejas datu dekompozīcija, taču novērotie modelēšanas rezultāti tiek apkopoti līdz vispārīgiem, apkopotiem rezultātiem, kas tiek iegūti no individuālo objektu notikumu protokoliem.

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.

Tādēļ šajā darbā tiek piedāvāta jauna modelēšanas pieeja, proti, kombinētā, diskrētu notikumu modelēšanā bāzētā, modelēšanas pieeja, kas izmantojama par teorētisku bāzi efektīvu un uzticamu tādu kombinētu modeļu, kas izmanto mezoskopisku detalizācijas līmeni materiālo plūsmu attēlošanai, izveidošanai.

Pieejas realizēšanā tiek nodrošināta tāda diskrētu notikumu sistēmu modelēšana, kas iekļauj sevī plūsmas stāvokļa izmaiņas notikumus. Efektīvās kombinētās pieejas modeļiem jānodrošina materiālo plūsmu attēlošana mezoskopiskajā detalizācijas līmeni, tādu plūsmu ieviešana, uzkrāšana un aizturēšana uz laiku modeļa komponentēs, kā arī plūsmas nobeigšana.

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*, porcija iekļauj sevī noteiktu plūsmas objektu

daudzumu un tai ir noteikts ilgums.

2. Plūsmas izejas punkts jeb noteka, kas ir modeļa robeželements – šeit notiek plūsmas „iztecēšana” no modeļa.
3. Universālā komponente, kas imitē plūsmas objektu aizturēšanu uz to apstrādes laiku (glabāšanas, pārkraušanas, iepakšanas un citas darbības), jeb bunkurs.
4. Transporta 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.

Pieejas pielietošanas rezultātā jānodrošina ticamu modelēšanas rezultātu iegūšana pēc modeļa darba gājiena. Diskrētu notikumu sistēmu (DNS) modelēšanā ir noformēta rezultātu veidu sistēma, kas nodrošina informācijas iegūšanu par visiem modeļa elementiem modeļa darba gājiena garumā. Piedāvātajām kombinētās pieejas modeļa komponentēm piemīt īpašības, kas saistītas ar plūsmas attēlošanas specifiku, līdz ar to ir jādefinē atbilstošie rezultātu veidi un to aprēķināšanas metodes. Noformulētās prasības plūsmu aprakstīšanai un komponentu īpašībām ļauj konstatēt agregāta notācības atbilstību kombinēto modeļu attēlojuma vajadzībām.

### **3.1. Materiālo plūsmu attēlošana kombinētajā pieejā**

Diskrētu notikumu modeļos ieejas objektu plūsmas tiek modelētas kā laikā sakārtota notikumu secība, kur katrs no notikumiem ir viena vai vairāku objektu vienlaicīgas parādīšanās notikums uz modeļa ieejas. Ieejas plūsmu modelēšanai tiek pievērsta īpaša uzmanība, turpmāk modeļos tiek imitēta objektu plūsmu kustībā, aizturēšana uz laiku, uzkrāšana un to pārvietošana cauri dažādu citu procesu posmiem, taču objektu plūsmām starp modeļa komponentēm piemīt galvenās raksturīgas diskretās ienākošās plūsmas īpašības. Diskrētu objektu plūsmu modelēšana diskrētu notikumu pieejas ietvaros tika apskatīta 2. nodaļā un ir bāzētā laika intervālu starp atsevišķiem objektiem lieluma sadalījuma funkcijās. Plūsmas korektai aprakstīšanai ir pietiekoši noteikt laika intervālu sadalījuma funkciju. Individuālas plūsmas objektu īpašības var būt realizētas, izmantojot atribūtu modelēšanu. Diskretas plūsmas modelēšanas piemērs impulsa laika funkcijas  $q(t)$  veidā ir aplūkojams 3.1. a) att. Laika momenti  $t_1, t_2, \dots, t_6$  ir atsevišķu objektu ierašanās laika momenti, katrs no objektiem ir attēlots vienības impulsa veidā. 3.1. attēlā uz horizontālās ass visos grafikos ir laiks –  $t$ , ar  $T$  ir apzīmēts modeļa darba gājiena nobeiguma laika moments.

Gadījumā, kad plūsmas modelēšanas pamatā ir plūsmas notikumu protokols

(sk. 1. nod.), plūsmas modelēšanai DNS modelēšanas pieejas ietvaros izmanto tradicionālo notikumu plānošanu: novērtē laika intervālu sadalījuma vai sadalījuma blīvuma funkciju un izmanto to laika intervālu starp notikumiem ģenerēšanai un ierašanās notikumu plānošanai.

Modelējot diskreto objektu plūsmas mezoskopiskās plūsmas veidā, ir jārealizē tāda plūsmu aprakstīšana, kas atbilst kombinētās modelēšanas pieejas prasībām, t.i., plūsmu intensitātēm ir jābūt nemainīgām starp atbilstošo notikumu laika momentiem.

Tāda plūsmas aprakstīšanas pieeja ir „dabiska” dažādām cilvēka darbības sfērām, piemēram, loģistikai vai transportam. Mezoskopiskais plūsmas apraksts, piemēram, var būt šāds: laika posmā no plkst. 5 līdz plkst. 7 automašīnu plūsmas intensitāte ceļa posmā no punkta  $A$  līdz punktam  $B$  ir 10 automašīnas stundā, no plkst. 7 līdz plkst. 10 - 25 automašīnas stundā, no plkst. 10 līdz plkst. 15 - 17 automašīnas stundā, utt. Plūsmas intensitātes mērvienības šajā piemērā ir izteiktas kā objektu daudzums noteiktajā laika posmā, taču ir iespējams to izteikt arī citās mērvienībās.

Mezoskopiskā plūsma sastāv no vielas vai objektu plūsmas porcijām, un plūsmas porciju intensitāte ir nemainīga porcijas „ilguma laikā”, tātad, jādefinē ne tikai laika intervālu sadalījuma funkcija, bet arī vielas vai objektu daudzuma vai intensitātes sadalījuma funkcija.

Mezoskopiskās plūsmas modelēšanai ir jāplāno plūsmas intensitātes izmaiņas notikumi. Šajā gadījumā ir iespējams izmantot gan „dabisko” plūsmas aprakstu, gan notikumu protokolu. Pirmajā variantā ir iespējams izveidot plūsmas intensitātes mezoskopisku laika funkciju, to var noteikt, piemēram, tabulas veidā vai grafiski. Mezoskopiskās plūsmas, kas attēlota laika funkcijas veidā, piemērs ir aplūkojams 3.1. b) att. Šeit  $\lambda(t)$  ir plūsmas intensitātes funkcija, kas ir gabaliem konstanta un tās vērtības mainās  $t_1, t_2, \dots, t_5$  laika momentos. Otrais variants ir vairāk līdzīgs diskreto objektu ierašanās notikumu plānošanai tradicionālas diskreto notikumu pieejas ietvaros. Šajā variantā plūsmas notikumu protokolu izmanto laika intervālu sadalījuma funkcijas novērtēšanai, kas tiek izmantota plūsmas intensitātes izmaiņu laika momentu plānošanai. Plūsmas intensitāte  $\lambda_i$  tiek aprēķinātā katrām laika intervālam un ir vienādā ar  $1/\Delta t_i$  gadījumā, kad katrs diskrētais objekts plūsmā tiek uzskatīts atsevišķi. Gadījumā, kad jādefinē diskreto objektu partijas, piemēram, partijas  $n_i$  izmērā, plūsmas intensitāte atbilstošajā intervālā  $\lambda_i = n_i / \Delta t_i$ . Mezoskopiskās objektu plūsmas attēls arī šajā gadījumā var būt attēlots kā 3.1. att.

Ir iespējams realizēt mezoskopiskas plūsmas modelēšanu arī citādi: plūsma tiek modelēta kā atsevišķu porciju summa. Šajā variantā ir jānovērtē trīs gadījuma lieluma sadalījumi: laika intervālu starp porcijām, porciju ilguma un vielas vai objektu daudzuma sadalījums. Modelējamā mezoskopiskā plūsma tiek izveidota kā atsevišķu vielas vai objektu

porciju superpozīcija. Mezoskopiskās plūsmas, kā vielas vai objektu porciju superpozīcijas rezultāta funkcijas veidā, piemērs ir aplūkojams 3.1. c) att. Šajā attēlā ar  $t_1, t_2, \dots, t_5$  ir apzīmēti porciju sākuma laika momenti, ar  $\lambda_i$  ir apzīmēta katras  $i$ -tās porcijas intensitāte un ar  $\lambda(t)$  ir apzīmēta kopēja plūsmas intensitātes funkcija, kas izveidota kā porciju intensitāšu superpozīcijas rezultāts.

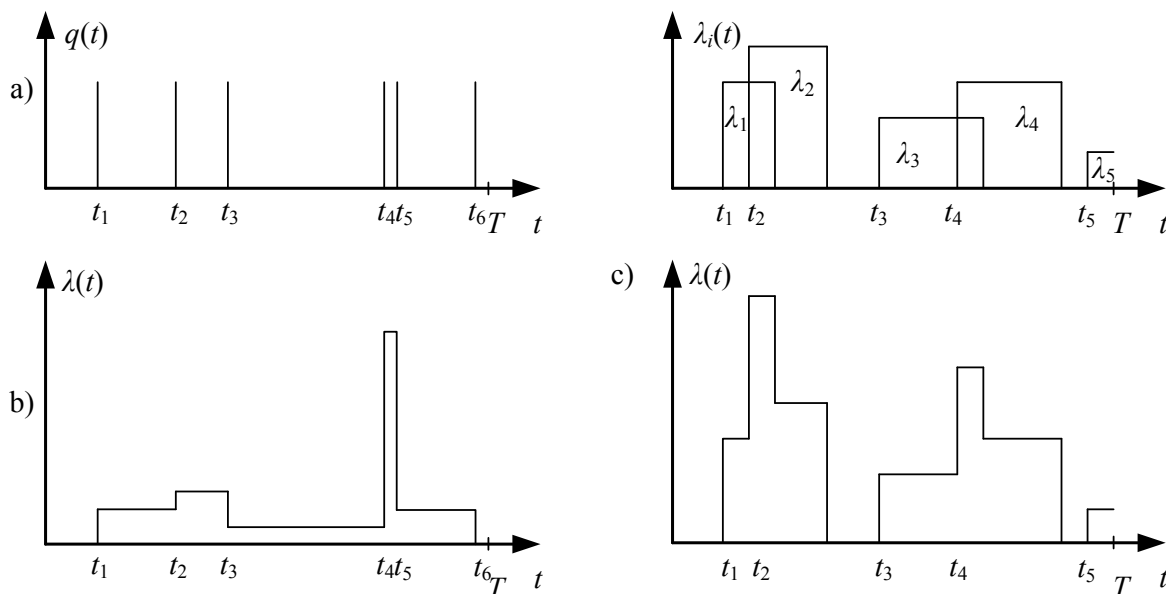
### 3.2. Kombinētā modeļa galvenās komponentes un to darbības algoritmi

Diskrētu notikumu un kombinētie modeļi izmanto vienu metodi modelēšanas laika skaitīšanai. Modeļa laika skaitīšana notiek secīgi palielinot  $t$  vērtību no notikuma līdz notikumam, modeļa stāvoklis mainās tikai notikumu momentos.

Kombinētās modelēšanas pamatā ir plūsmu tempu izmaiņas notikumu laika momentos. Plūsmas porcijas (materiāli, produkti, dati, utt.) atrodas dažādas modeļa vietās. Modeļa darba gājiena laikā plūsma pārvietojas no vienas atrašanās vietas līdz citai ar noteiktu faktisku tempu. Plūsmas kustība starp modeļa komponentēm, kas uztur plūsmas objektus vai sūta tos tālāk pa maršrutu, tiek noteikta ar trajektorijām, noteikumiem un ierobežojumiem. Dažos gadījumos kombinētā sistēmu modelēšana labāk atbilst modelējamās sistēmas īpašībām, nekā, piemēram, klasiskā DNS modelēšanas pieeja.

#### 3.2.1. Kombinētu modeļu pamatprocesu īpašības

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 [69].



3.1. att. Mezoskopisku plūsmu trajektorijas

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 diskreto notikumu modeļiem.

### **3.2.2. Komponente „avots”**

Gadījumā, ja kombinētais modelis attēlo nenoslēgtu sistēmu, sistēmas robežas elementi tiek modelēti kā avots un noteka. Tādas komponentes nav obligātās un nepieciešamības gadījumā var būt noteikti sākuma plūsmas materiāla krājumi visām modeļa iekšējām komponentēm.

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.  $n$  plūsmu modelēšanai ir jāizmanto  $n$  vienkanāla avoti vai vienu  $n$ -kanālu avotu. Šajā nodaļā apskatīsim vienkanāla avotu, kas nodrošina objektu mezoskopiskās plūsmas imitāciju kombinētā modeļa ieejā.

Kombinētā modeļa bāzes komponente ”avots” imitē plūsmas objektu porciju ierašanās procesu. 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 diskreto

objektu avotam diskrētu notikumu modelēšanas pieejā, kas ģenerē atsevišķus plūsmas objektus, izmantojot lieluma „laika intervāls starp plūsmas objektiem”  $\Delta t$  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 laika moments,  $i_{\max}$  ir pēdējās ienākošās plūsmas intensitātes izmaiņas kārtējais numurs un  $T$  ir modeļa darba gājiena nobeiguma laika moments). 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.

Ir iespējams ģenerēt arī plūsmas impulsus, t.i., porcijas, kas iekļauj noteiktu objektu daudzumu, bet kam nav ilguma. Skaidrs, ka tādām porcijām nav iespējams noteikt porcijas intensitāti, taču tāda ģenerēšana var nodrošināt, piemēram, kravas krājumu momentāna pieauguma modelēšanu izkraušanas beigu laika momentā, t.i., tad kad krava kļūst pieejama noliktavā. Pieņemsim, ka impulsa plūsmas jāģenerē atsevišķi.

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  $\lambda$  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

$$z(t) = H[z(t_0)] \quad (3.1)$$

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  $\tau_i$  uz avotu iedarbojas vadības iedarbes  $g$ , kur  $g$  ir vadības signālu kopas  $\Gamma$  elements un  $\tau_i$  laika momentus nosaka gadījuma lieluma  $\Delta \tau$  sadalījuma blīvuma funkcija  $f(\Delta \tau)$ , t.i., modelim ir stohastisks raksturs

$$g(t_i) = \{\Delta t_i, t_i\}, i = 1, i_{\max}. \quad (3.2)$$

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  $\lambda$  vērtību jebkurā laika momentā. Izejas signāls tiek formēts no avota stāvokļa  $z(t)$  saskaņā ar operatoru  $G$ , kas var būt aprakstīts šādi:

$$y(t_i) = G[z(t)] = \frac{1}{\Delta t_i}, \quad i = 1, i_{\max}. \quad (3.3)$$

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.

Avota stāvoklis  $z(t)$  patvaļīgā laika momentā  $t$  tiek noteikts ar pārejas operatoru  $H$ . Operatora  $H$  veids ir atkarīgs no tā, vai aplūkojamā laika intervālā tiek novēroti avota stāvokļa izmaiņas laika momenti. Stāvokļa izmaiņas notiek lēcienveidīgi. Pieņemsim, ka laika momentā  $t^*$  notiek vadības signāla  $g(t^*) = \{\Delta t^*, t^*\}$  uztveršana,  $z(t^*)$  ir avota stāvoklis šajā laika momentā, tad

$$z(t^*+0) = H[z(t^*)] = \{\lambda(t^*)\}. \quad (3.4)$$

Laika intervālos starp stāvokļa izmaiņām, kad  $t^*$  ir dotā konkrētā laika intervāla sākuma laiks,

$$z(t) = \{\lambda(t^*)\}. \quad (3.5)$$

Laika momentā  $t^*$  avota izejas signāls mainās un paliek nemainīgs līdz nākamā notikuma laika momentam,  $y(t) = \lambda(t)$ .

Vienkanāla avota vienkāršotais grafiskais attēls ir aplūkojams 3.2. att., izejas signāla piemērs 3.2. 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  $G$ .

Vienkanāla avota stāvokļa trajektorija  $\lambda(t)$  attēlo materiālās plūsmas intensitātes laika funkciju, tādas funkcijas piemērs ir aplūkojams 3.2. att.

Nobeigumā var piezīmēt, ka vadības signāls var tikt aplūkots kā ieejas signāls taču, ņemot vērā komponentes pielietošanas īpašības, loģiskāk tomēr ir izmantot iepriekšpieņemto interpretāciju.

Avota funkcionēšanu var aprakstīt algoritma veidā. Pieņemsim, ka netiek plānoti vienlaicīgi ierašanās notikumi:

a) Inicializācija.  $t_0 = 0$ ,  $\lambda(0) = 0$ ,  $i = 1$ ,  $i$  ir kārtējais plūsmas porcijas numurs. Nākamo

plūsmas objektu porciju ierašanās laika momentu  $t_i, t_{i+1}$  plānošana,  $z(0) = \{0; (t_i - t_{i-1})\}$  noteikšana.

b) Vērtību piešķiršana:  $t = t_i, z(t_i) = \left\{ \frac{1}{t_i - t_{i-1}}; (t_{i+1} - t_i) \right\}, i=i+1.$

c) Nākamo plūsmas objektu porciju ierašanās laika momentu  $t_i$  plānošana. Nobeiguma nosacījumu pārbaude. Gadījumā ja  $t_i > T$ , kur  $T$  ir modeļa darba gājiena ilgums,  $i_{\max} = i - 1, t = T$  un pāriet pie d), citādi atkārtot b).

d) Modelēšanas datu apkopošana, pārskata formēšana un algoritma pabeigšana.

Avota algoritms uzskatāmi demonstrē kombinētas modelēšanas pieejas īpašības plūsmu modelēšanas jomā. Gadījumā, kad plūsmas porcija sastāv no vairākiem objektiem, diskrētu notikumu modelēšanas pieejas ietvaros algoritmam jābūt izpildītam katra atsevišķa objekta ierašanās laika momentā, bet lietojot kombinēto pieeju – tikai porcijas ierašanās laika momentā.

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

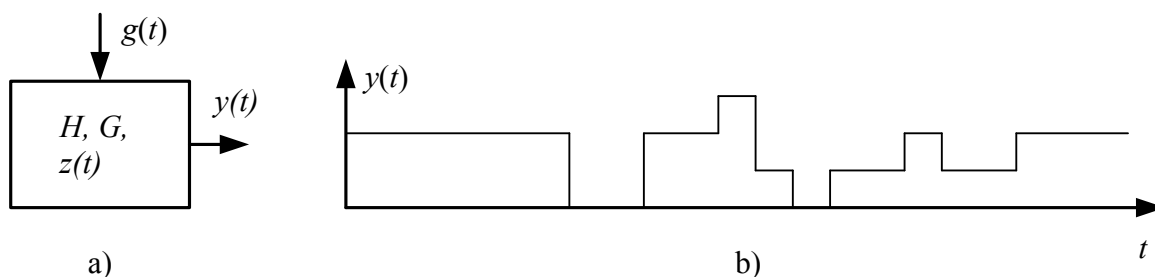
$$A = \int_0^T \lambda(t) dt = \sum_1^{i_{\max}} \lambda_i \Delta t_i, \quad (3.6)$$

kur  $i = \overline{1, i_{\max}}$ ,  $i_{\max}$  – 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  $T$ :

$$\bar{\lambda} = \int_0^T \lambda(t) dt / T = \sum_1^{i_{\max}} \lambda_i \Delta t_i / \sum_1^{i_{\max}} \Delta t_i = \sum_1^{i_{\max}} \lambda_i \Delta t_i / T. \quad (3.7)$$

Tādi modelēšanas rezultātu veidi dod iespēju iegūt nepieciešamu informāciju par objektu plūsmu kombinētā modeļa ieejā. No avota plūsmai jābūt novirzītai uz kādu no citām kombinētā modeļa komponentēm.



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

### 3.2.3. Komponente „bunkurs”

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  $\mu_{\max}$ . 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  $b(t)$

$$b(t) = b_0 + \int_0^t \lambda^{\text{ien}}(t) dt - \int_0^t \lambda^{\text{iz}}(t) dt. \quad (3.8)$$

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  $t_1, t_2, \dots, t_i, \dots$ , ( $t_0 \leq t_i \leq t_{\max} \leq T$ ) 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 nobeiguma laiks. Tad vienādojumi, kas apraksta bunkura uzvedību laikā ir šādi:

$$\lambda^{\text{iz}}(t) = \begin{cases} 0, \text{ ja } \lambda^{\text{ien}}(t) = 0 \text{ un } b(t) = 0; \\ \lambda^{\text{ien}}(t), \text{ ja } \lambda^{\text{ien}}(t) > 0 \text{ un } b(t) = 0; \\ \mu_{\max}, \text{ ja } b(t) > 0. \end{cases} \quad (3.9)$$

$$b(t_i) = b(t_{i-1}) + (\lambda_i^{\text{ien}} - \lambda_i^{\text{iz}}) \Delta t_i, \quad (3.10)$$

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

$$\lambda^{\text{iz}}(t) \leq \mu_{\max}, b(t) \leq B_{\max}. \quad (3.11)$$

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  $Z = \{\lambda^{\text{ien}}, \lambda^{\text{iz}}, b, \tau\}$ . Bunkura stāvokļa izmaiņas laikā nosaka ienākošās  $\lambda^{\text{ien}}(t)$  un izejošās  $\lambda^{\text{iz}}(t)$  plūsmas intensitāte, bunkura saturs  $b(t)$  un laiks līdz nākamajam stāvokļa izmaiņas momentam  $\tau(t)$ .

Modeļa darba gājiena sākuma laika momentā  $t_0 = 0$  bunkurs ir sākuma stāvoklī

$$z_0 = \{\lambda_0^{ien}, \lambda_0^{iz}, b_0, \tau_0\}, \quad (3.12)$$

kur  $\tau_0$  ir laiks līdz tuvākajam bunkura stāvokļa izmaiņas laika momentam, kas ir

$$\tau_0 = \begin{cases} t_1, \text{ ja } b_0 = 0, \lambda_1^{iz} = \lambda_1^{ien}, \text{ vai} \\ \frac{b_0}{\mu_{\max} - \lambda_1^{ien}}, \text{ ja } b_0 > 0, \lambda_1^{iz} = \mu_{\max} \end{cases}, \quad (3.13)$$

kur  $\lambda_1^{ien}$  – ienākošās plūsmas intensitāte laika intervālā  $\Delta t_1 = t_1 - t_0$ .

$\lambda_1^{iz}$  – 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

$$z(t) = H[z(t_0), t]. \quad (3.14)$$

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

Bunkura stāvoklis mainās notikumu laika momentos, kas var būt šādi: 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

$$x(t) = \lambda^{ien}(t). \quad (3.15)$$

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

$$y(t) = \lambda^{iz}(t). \quad (3.16)$$

Izejas signāls veidojas atkarībā no bunkura stāvokļa

$$y(t) = G[z(t)]. \quad (3.17)$$

Shematiski bunkurs var būt attēlots kā parādīts attēlā 3.3. att.

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  $\tau_1 \leq t_1$ .  $\tau_1$  ir bunkura stāvokļa

izmaiņas laika moments, un  $t_1 < \tau_2 \leq t_2$ .

Stāvokļa  $z(t)$  izmaiņas šajā intervālā ir aprakstītas 3.1. 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 komponente, kas var būt apskatīta kā vienkāršots agregāts, kam piemīt noteiktas īpašības [90]:

- 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.

Atbilstošais bunkura funkcionēšanas algoritms ir šāds:

- Inicializācija.  $t_0 = 0$ ,  $z = z_0$ . laika intervāla līdz kārtējam notikumam numura noteikšana  $i=1$ . Plāno nākamos notikumus:  $T_i$  ir plānotā notikuma ar kārtējo numuru  $i$  laika moments. Ir iespējams viens no trim notikumiem: bunkura iztukšošana
  - a) (notikuma tips  $e = 1$ ,  $T_1 = \tau_1$ ) bunkura pārpilde (notikuma tips  $e = 2$ ,  $T_1 = \tau_1$ ) vai nākošais ienākošās plūsmas intensitātes izmaiņas laika moments ( $T_1 = t_1$ , notikuma tips  $e = 3$ ). Noteic tuvākā tipa  $e$  notikuma laika momentu  $T_1 = \min\{t_1, \tau_1\}$ .
  - b) Notikuma  $e$  izpilde:
    - i. Bunkura satura aprēķināšana:  $b(T_i) = (\lambda_i^{iz} - \lambda_i^{ien})(T_i - T_{i-1})$ ;
    - ii. Izejošas plūsmas intensitātes pārrēķināšana: ja  $e = 1$  vai  $3$ , tad  $\lambda_{i+1}^{iz} = \lambda_i^{ien}$ , ja  $e = 2$ , tad  $\lambda_i^{iz} = \mu_{max}$ .
    - iii. Nākamā notikuma plānošana. Tuvākā notikuma ar numuru  $e$  laika momenta noteikšana:  $T_i = \min\{t_i, \tau_i\}$ . Modelēšanas laika virzīšana līdz kārtējā notikuma laikam:  $t = T_i$ .
  - c) Nobeiguma nosacījuma pārbaude, ja  $t > T$ ,  $t = T$ ,  $i_{max} = i$ , aprēķināt  $b(t) = z + (\lambda_i^{iz} - \lambda_i^{ien})(T - T_i)$ , pabeigt algoritma izpildi;
  - d) Kārtēja notikuma numura aprēķināšana;  $i = i + 1$  un atgriešanās šī algoritma b) punktā.

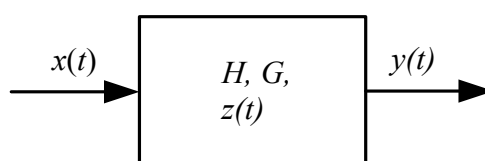
Bunkurs kombinētos modeļos izpilda funkcijas, kas diskrētu notikumu modeļos izpilda procesa tipa komponentes vai „iekārtas”, t.i., aiztur uz noteiktu laiku plūsmas objektus, kas pienāk ar noteiktu intensitāti un pēc apstrādes ļauj tiem turpināt kustību.

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

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

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.

DNS modeļu vienkāršotas komponentes – iekārtas, kas realizē apstrādes procesu imitāciju, funkcionēšanas īpašības un to raksturojumi ir detalizēti aplūkoti 1. pielikumā. 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 atbilstošo 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.

**3.3. att. Vienkanāla bunkura vienkāršotais attēls**

DNS modelēšanas pieejas ietvaros eksistē dažādi modelēšanas rezultātu veidi tai skaitā no laika atkarīgie un no laika neatkarīgie rezultāti. Piemēram, par vienkāršotu komponenti – diskrētu iekārtu – modeļa darba gājiena laikā tiek savākta un apkopota informācija, kas rezultātu pārskatā tradicionāli ir attēlota noslodzes koeficienta veidā. Noslodzes rādītājs ir no laika atkarīgs rādītājs, un noslodzes koeficienta vidējā vērtība ir iekārtas noslodzes laika funkcijas vidējā svērtā vērtība, kas ir apkopota par modeļa darba gājiena laiku. Vienkāršākais rādītājs ir apstrādāto diskrēto objektu skaits.

Lai varētu korekti aizvietot diskrētu 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 diskrēto 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 3.4. att. b), c) un d) att.. 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. 3.5. att. ir redzams detalizēts bunkura stāvokļa funkcijas attēls, kas ir nepieciešams turpmāko aprēķinu skaidrojumiem. Pieejamās ietilpības izmantotā daļa ir vienāda ar  $z_k(t)$  funkcijas noteiktā integrāļa vērtību intervālā  $[0, T]$ . Aprēķināsim integrāļa vērtību, sākot ar laika momentu  $t_1$  (sk. 3.5. att.). Integrāļa vērtība ir vienāda ar laukumu zem  $z_k(t)$  funkcijas līknes un var būt interpretēta kā poligona laukumu summa:

$$\int_0^T z_k(t) dt = S_{t_1 z_2 t_2} + S_{t_2 z_2 z_3 t_3} + S_{t_3 z_3 z_4 t_4} + S_{t_4 z_4 z_5 t_5} + \dots + S_{t_{\max} z_{\max} z_{\max+1} T}. \quad (3.18)$$

Turklāt poligona  $t_3 z_3 z_4 t_4$  laukums ir vienāds ar trīsstūri  $t_3 z_3 t_4$  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. 3.6. att.). Vienīgais īpašais loceklis šajā summā ir pēdējā poligona laukums:

$$\int_0^T z_k(t) dt = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + \dots + S_{t_{\max} z_{\max} z_{\max+1} T}. \quad (3.19)$$

Ņemot vērā 3.2. tabulas izteiksmes, pēc vienkāršiem pārveidojumiem varam pierakstīt

$j$ -tā poligona laukuma izteiksmi

$$S_j = \frac{1}{2} \cdot \Delta t_{2j} + \frac{1}{2} \Delta t_{2j+2}, j = \frac{i+1}{2}, i = 1, 3, \dots, i_{\max}. \quad (3.20)$$

Tad

$$\int_0^T z_k(t) = \sum_1^{i_{\max}} S_j = \frac{1}{2} \cdot \Delta t_2 + \sum_2^{i_{\max}} \Delta t_{2i} + \frac{1}{2} \cdot \Delta t_{i_{\max}} = \sum_2^{i_{\max}} \Delta t_{2i} + \frac{1}{2} \cdot (\Delta t_2 + \Delta t_{i_{\max}}). \quad (3.21)$$

Bunkura noslodze modeļa darba gājiena laikā

$$U_k = \frac{\sum_2^{i_{\max}} \Delta t_{2i} + \frac{1}{2} (\Delta t_2 + \Delta t_{i_{\max}})}{B_{\max} T} = \frac{\sum_2^{i_{\max}} \Delta t_{2i} + \frac{1}{2} (\Delta t_2 + \Delta t_{i_{\max}})}{T} = U_d - \frac{\Delta t_2 + \Delta t_{i_{\max}}}{2T}, \quad (3.22)$$

kur  $U_d$  ir diskrētas iekārtas noslodze.

Bunkura kumulatīvā caurlaidspēja modeļa darba gājiena laikā

$$N_k = \int_0^T \lambda^z(t) = (i_{\max+1}) \operatorname{div} 2 + \frac{T - t_{i_{\max}}}{\Delta t_{i_{\max}}^*} = N_d + \Delta^*, \quad (3.23)$$

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  $\Delta^*$ .

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

$$\Delta U = U_d - U_k = \frac{\Delta t_2 + \Delta t_{i_{\max}}}{2T} \rightarrow 0. \quad (3.24)$$

un caurlaidspējas novērtējuma precizitāti skaidro 3.7. att. Pieņemsim, ka modeļa darba gājiena ilgums  $T$  ir jebkura vērtība intervālā  $[t_{i-2}, t_{i-1}]$ . Attēlā redzams, ka  $\Delta N = N_d - N_k$  šajā intervālā mainās no  $\Delta N(t_{i-1}) = 1 - S_1$  līdz  $\Delta N(t_{i+1}) = S_4$ . No iepriekšējām izteiksmēm ir viennozīmīgi zināms, ka  $S_1 \leq 1$  un  $S_4 \leq 1$ , tātad  $0 \leq \Delta N \leq 1$ . Tas nozīmē, ka pie pietiekami lielām  $i_{\max}$  vērtībām caurlaidspējas novērtējuma precizitāte var būt iegūta vēlamā līmenī.

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

$$\bar{t}_b = \frac{1}{\bar{\lambda}^{iz}(t)} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i_{\max}} \lambda_i^{iz} \Delta t_i / \sum_{i=1}^{i_{\max}} \Delta t_i}, \quad (3.25)$$

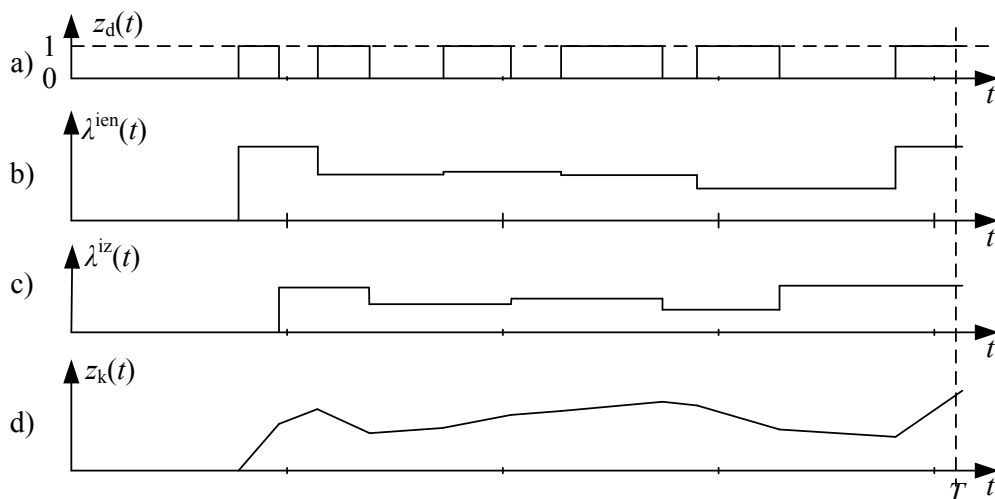
kur  $\lambda_i^{iz}$  ir izejošās plūsmas intensitāte,  $\lambda_i^{iz} > 0$ .

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  $\mu_{\max}^j$  nedrīkst pārsniegt vērtības, kuras ir jāaplūko kā bunkura parametri kopumā

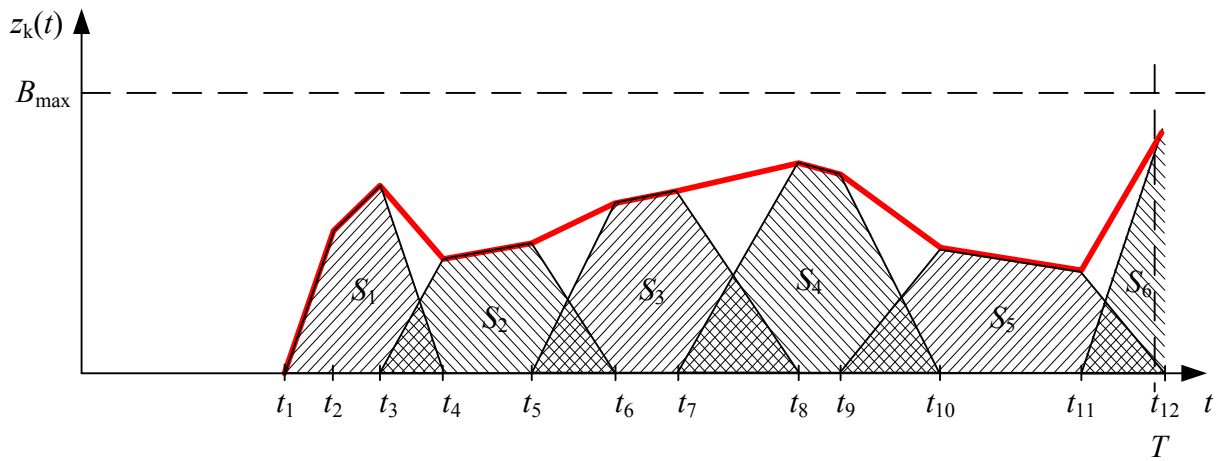
$$\sum_{j=1}^m B_{\max}^j \leq B_{\max} \quad \text{un} \quad \sum_{j=1}^m \mu_j \leq \mu_{\max}^j. \quad (3.26)$$

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

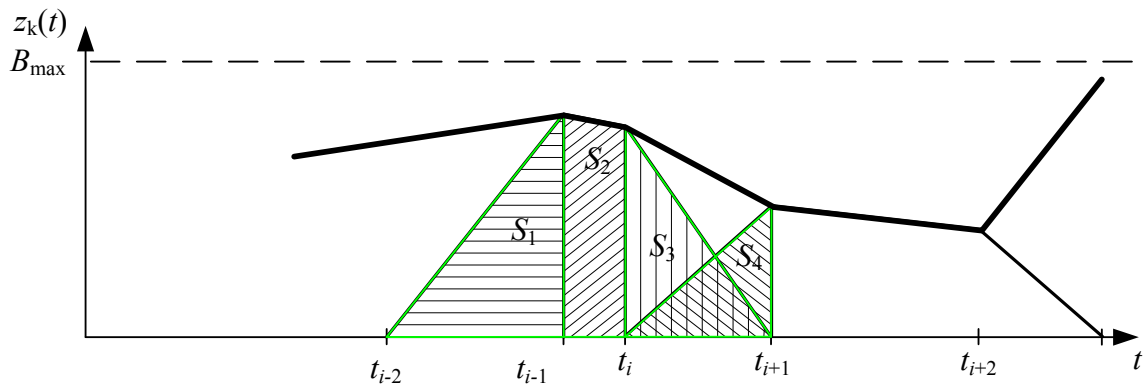
- sakarā ar ārējām izmaiņām (darba maiņu režīms, pauzes, bojājumi u.tml.);
- atkarībā no saviem parciālajiem lielumiem  $\lambda_j^{in}(t)$  un  $B_j(t)$ ;
- atkarībā no parciālajiem lielumiem  $\lambda_i^{in}(t)$ ,  $\lambda_i^{out}(t)$ ,  $B_i(t)$  un  $\mu_i(t)$  citiem paralēlajiem kanāliem;
- atkarībā no mainīgajiem, kas atspoguļo citu bunkuru un citu modeļa komponentu stāvokli.



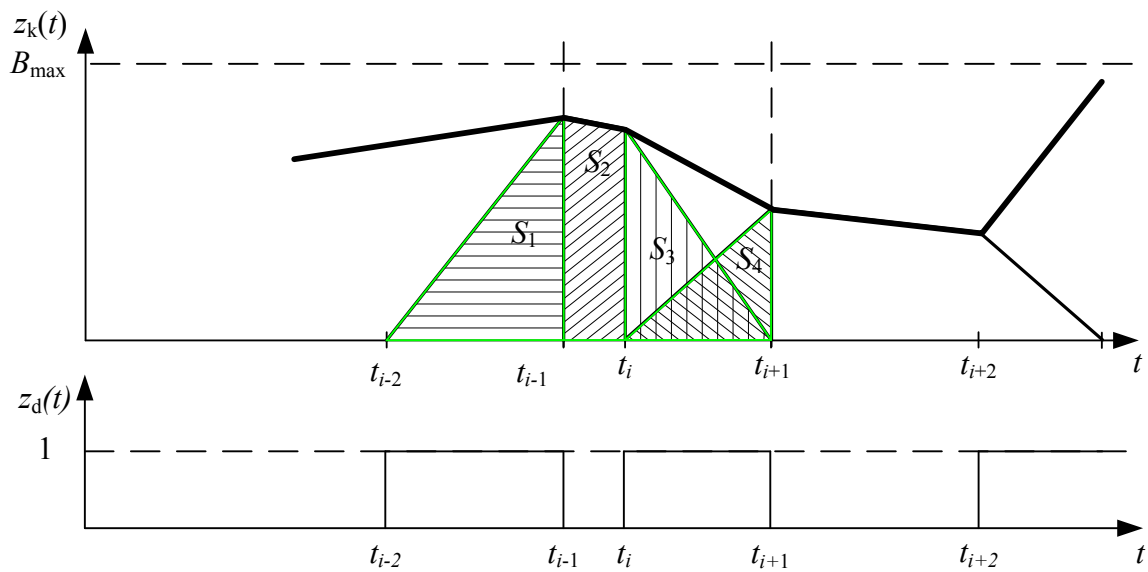
**3.4. att. a) diskrētās iekārtas stāvokļa laika funkcija, b) bunkura ienākošās un c) izejošās plūsmas intensitātes, d) bunkura stāvokļa funkcija**



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



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



3.7. att. Komponentes caurlaidspējas raksturojuma precizitātes novērtējums

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

Notikuma kārtējais numurs $i$	Notikuma laiks $t_i$	Laika intervāls no iepriekšējā notikuma $\Delta t_i$	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	$t_3$	$\Delta t_3 = t_3 - t_2$	$1/(t_5 - t_3) = 1/(\Delta t_5 + \Delta t_4)$	$1/(t_4 - t_2) = 1/(\Delta t_4 + \Delta t_3)$	$z_k(t_3) = z_k(t_2) + (\lambda^{\text{ien}}(\Delta t_3) - (\lambda^{\text{iz}}(\Delta t_3)) \cdot \Delta t_3$
...	...	...	...	...	...
$i$	$t_i = t_i - t_{i-1}$	$\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$	$1/(t_{i+2} - t_i) = 1/(\Delta t_{i+2} + \Delta t_{i+1})$ , 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 $i=2k$	$z_k(t_i) = z_k(t_{i-1}) + (\lambda^{\text{ien}}(\Delta t_i) - (\lambda^{\text{iz}}(\Delta t_i)) \cdot \Delta t_i$
...	...	...	...	...	...
$i_{\text{max}}$	$t_{\text{max}}$	$\Delta t_{\text{max}} = t_{\text{max}} - t_{\text{max}-1}$	pēc $i$ -tā locekļa formulām	pēc $i$ -tā locekļa formulām	$z_k(t_{\text{max}}) = z_k(t_{\text{max}-1}) + (\lambda^{\text{ien}}(\Delta t_{\text{max}}) - (\lambda^{\text{iz}}(\Delta t_{\text{max}})) \Delta t_{\text{max}}$
$i_{\text{max}+1}$	$T$	$\Delta T = T - t_{\text{max}}$	pēc $i$ -tā locekļa formulām	pēc $i$ -tā locekļa formulām	$z_k(T) = z_k(t_{\text{max}}) + (\lambda^{\text{ien}}(\Delta t_{\text{max}+1}) - (\lambda^{\text{iz}}(\Delta t_{\text{max}+1})) \Delta t_{\text{max}+1}$

Daudzkanālu bunkuru var aplūkot kā vairāku vienkanāla bunkuru apvienojumu (sk. 3.8. att.).

Daudzkanālu bunkura ieejā tiek uztverti ieejas signāli  $x$ , kas pieder ieejas signālu kopai  $X$ . Bunkura izejā veidojas izejas signāli  $y$  no izejas signālu kopas  $Y$ . Saskaņotai atsevišķu iekšēju agregātu darbībai ir nepieciešamas vadības iedarbes  $g$  no vadības iedarbju kopas  $\Gamma$ . Vadības iedarbes ir nepieciešamas ierobežojumu (3.26) ievērošanai.

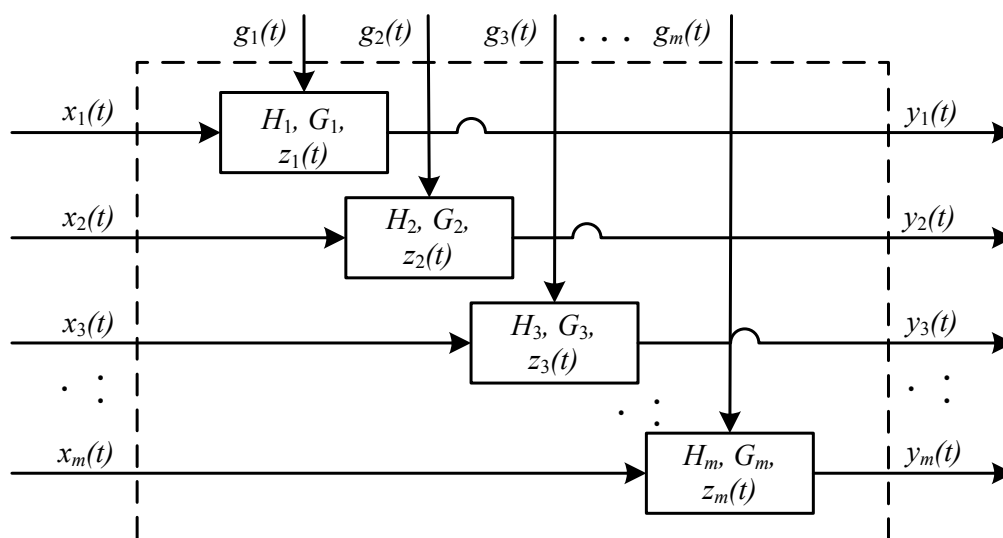
Bunkura izejas signāls var būt citas kombinētā modeļa komponentes, piemēram, cita bunkura, transporta elementa vai arī notekas ieejas signāls.

### 3.2.4. Komponente „transporta elements”

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.

Kā piemēru iespējams apskatīt pasažieru plūsmas kustību caur biļešu reģistrācijas letēm lidostā. Pasažieru reģistrācijas zonā var tikt apkalpoti līdz 500 pasažieriem stundā, bet kādas konkrētās stundas laikā ieradās tikai 250 pasažieri. Pasažieri atstās reģistrācijas zonu tādā pašā tempā, kādā viņi ierodas zonā; pati reģistrācijas procedūra aizņem tik neilgu laiku, ka tās ilgums var tikt ignorēts. Tādā gadījumā reģistrācijas zona kombinētajā modelī var būt modelēta kā bunkurs. Taču gadījumā, kad reģistrācijas laiks ir salīdzinoši ilgs, aizturēšana ir jāmodelē.

Transporta elementa ieejā tiek uztverta ienākošā plūsma ar intensitāti  $\lambda^{\text{ien}}(t)$ . Transporta



3.8. att. Daudzkanālu bunkurs kā agregātu sistēma

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

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

### 3.2.5. Komponente „noteka”

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.

Komponentes ieejas signāls ir plūsma ar intensitāti  $\lambda^{in}(t)$ , 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  $B$  laika posmā  $T$

$$B(T) = \int_0^T B(t) dt. \quad (3.27)$$

Noteka ir kombinētā modeļa komponente, kas ir objektu plūsmas nobeiguma punkts.

## 3.3. Kombinētā modeļa komponentu izveidošanas un mijiedarbības principi

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 3.9. att.

3.9. att. 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.

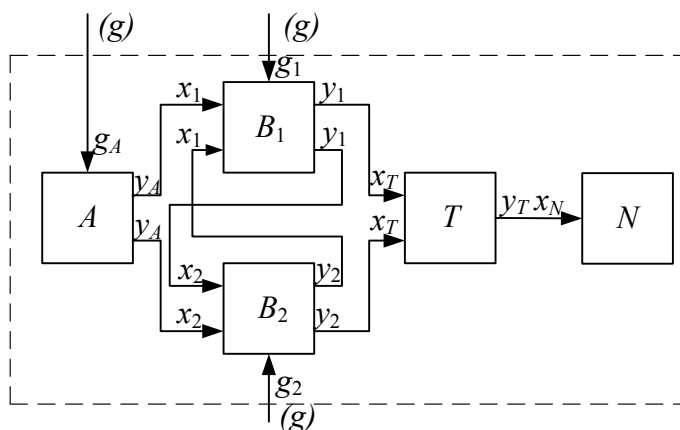
### 3.4. Kombinētu modeļu pamatstruktūras attēlošana

Rezumējot aplūkotās kombinētās modelēšanas pieejas, kas ir diskreto notikumu modelēšanā bāzētā ar materiālo plūsmu attēlošanu mezoskopiskajā detalizācijas līmenī, principus ir iespējams noformulēt kombinētas pieejas īpatnības.

Pieejas ietvaros tiek pētītas un modelētas abstraktās objektu mezoskopiskās plūsmas, kurām nav garuma un kuras tiek novērotas atsevišķos telpas punktos. Tādi punkti var būt nosaukti par plūsmas mērīšanas vai reģistrēšanas punktiem. Skaidrs, ka kombinētā modeļa komponentu ieejas un izejas punkti ir modelēto plūsmu mērīšanas punkti. Vienas komponentes izejoša plūsma var būt aplūkota kā citas komponentes ienākoša plūsma. Plūsmas var būt interpretētas kā ārējās vai iekšējās modeļa vai modeļa sastāvdaļas plūsmas. Kombinēto modeļu komponentu formalizācija agregātu veidā ļauj realizēt hierarhiskus imitācijas modeļus, kur modeļa sastāvdaļas ir nevis atsevišķas bāzes komponentes, bet tādu komponentu struktūras. Hierarhiskos modeļos var būt novērotas arī hierarhisku modeļa struktūru iekšējās plūsmas.

Kombinēto modeļu bāzes komponentēm ir universāls raksturs, jo uz to bāzes var būt izveidoti dažādiem pētāmo sistēmu mērogiem, detalizācijas līmeņiem un mērķiem atbilstoši modeļi. Modelējamo objektu lokā var būt gan iekšējie uzņēmumu loģistikas tīkli vai izejvielu pārvietošanas tīkli, gan globālās loģistikas tīkli vai starpuzņēmumu materiālu un izstrādājumu piegādes tīkli.

Konkrētās sistēmas kombinētā modeļa izstrādē ir jāpievērš īpaša uzmanība adekvātiem transporta elementu izmantošanas variantiem. Transporta elementu pielietošana kombinētos modeļos nav obligāta procesu modelēšanai, kur objektu pārvietošanas laiki ir necīgi mazi, salīdzinot ar citiem modelējamā procesa posmu ilgumiem. Tādos gadījumos ir pieļaujams tiešs komponentu savienojums, t.i., tiek pieļauts pieņēmums, ka izejot no komponentes,



3.9. att. Kombinētā modeļa komponentu apvienošanas piemērs

plūsma momentāni sasniedz nākamo komponenti. Gadījumā, ja tāds pieņēmums nevar tikt pieļauts, transporta elementa izmantošana kļūst par nepieciešamu.

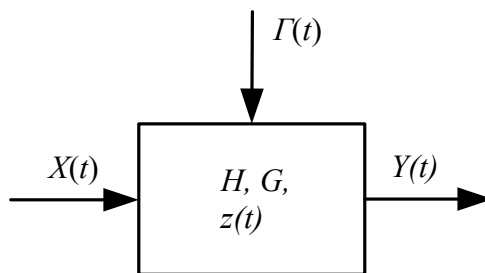
Kombinēto modeļu struktūras, kas var būt izveidotas izmantojot aprakstītas bāzes komponentes, ir daudzveidīgas. Neviena no bāzes komponentēm nav obligāti izmantojamā. Ir iespējams avota vietā lietot bunkuru, kam ir noteikts sākotnējais objektu plūsmas vielas krājums, kas modelēšanas laikā nodrošina ienākošas plūsmas formēšanu, notekas vietā ir iespējams lietot bunkuru, kas akumulē sistēmas izejas objektu plūsmas apjomu. Transporta sistēmu kombinētie modeļi var būt realizēti bez bunkuriem, bet ražošanas sistēmu kombinētie modeļi – bez transporta elementu izmantošanas. Informācijas plūsmu modelēšanā var iztikt bez transporta elementu izmantošanas, neņemot vērā aizkavēšanos datu pārraidēs.

### 3.5. Kombinētu modeļu rezultātu veidi

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 diskreto 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 datos, kas arī ir detalizēti mezoskopiskajā līmenī.

Iepriekšējās apakšnodaļās pie komponentēm tika apskatīti arī tie modelēšanas rezultāti, kas atbilst atsevišķām komponentēm, piemēram, bunkura modelēšanas rezultāti ir tā caurlaidspēja, plūsmas objektu daudzums vai līmenis, plūsmas objektu porcijas pavadītais laiks bunkurā. Runājot par kombinēto modeli kā par atsevišķo komponentu savienojumu, varam pieņemt agregāta koncepciju [90], tad kombinētais modelis var būt formalizēts kā klasiskais gabaliem lineārais agregāts (sk. 3.10. att.).

3.10. att.  $X(t)$ ,  $I(t)$  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



**3.10. att. Kombinētā modeļa attēlošana agregātā veidā**

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 vienkānāla vai daudzkanālu agregāts.

Tāpat kā atsevišķas komponentes arī kombinētais modelis var būt vienkānāla vai daudzkanālu agregāts. Kombinētā modeļa modelēšanas rezultāti tiek savākti katrai atsevišķai objektu plūsmai. Ir pietiekoši definēt modelēšanas rezultātus vienkānāla modelim, jo daudzkanālu modeļa rezultātu veidi katrai objektu plūsmai ir identiski.

Apskatīsim vienkānāla kombinētā modeļa funkcionēšanas procesa raksturojumus. Uz modeļa ieejas tiek modelēta ienākoša objektu mezoskopiskā plūsma un uz modeļa izejas veidojas izejoša objektu mezoskopiskā plūsma. Atsevišķos modeļa darba gājiena laika momentos, kā arī modeļa darba gājiena nobeiguma laika momentā  $T$ , ir iespējams aprēķināt šādus modelēšanas rezultātus:

- modeļa „tekošo” (t.i., konkrētajā brīdī novērojamo) plūsmas objektu daudzumu;
- kopējo vai kumulatīvo plūsmas objektu daudzumu, kas tika novēroti uz modeļa izejas;
- modeļa ienākošas un izejošas objektu plūsmas vidējās intensitātes;
- vidējais plūsmas objekta pavadītais laiks modelī.

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

$$B_m(t) = B_m(0) + \int_0^t \lambda_m^{\text{ien}}(t) dt - \int_0^t \lambda_m^{\text{iz}}(t) dt, \quad (3.28)$$

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 ienākošas un izejošas objektu plūsmas intensitātes laika funkcijas.

Kopējais plūsmas apjoms, kas tiek novērots uz modeļa izejas:

$$B_m^{iz} = \int_0^t \lambda_m^{iz}(t) dt. \quad (3.29)$$

Modeļa ienākošās un izejošās plūsmas vidējā intensitāte:

$$\bar{\lambda}_m^{ien} = \frac{\int_0^t \lambda_m^{ien}(t) dt}{t}, \quad \bar{\lambda}_m^{iz} = \frac{\int_0^t \lambda_m^{iz}(t) dt}{t}. \quad (3.30)$$

Vidējais plūsmas vienības atrašanās laiks modelī:

$$\bar{t}_m = \frac{1}{\bar{\lambda}_m^{iz}(t)}. \quad (3.31)$$

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

Šajā nodaļā minētie modeļa funkcionēšanas procesa raksturojumu veidi attiecas uz vienu atsevišķu modeļa darba gājienu. Atkārtoto modeļa darba gājienu datus ir iespējams izmantot nepieciešamiem raksturojumu vērtējumu aprēķiniem, izmantojot parastās matemātiskās statistikas metodes atbilstošo raksturojumu punktu un intervālu novērtējumu aprēķināšanai.

### 3.6. Kopsavilkums un secinājumi

Šajā promocijas darba nodaļā ir veikts piedāvātās kombinētās modelēšanas pieejas teorētiskā pamatojuma izklāsts, kas atbilst noformulētajām prasībām.

Šīs nodaļas ietvaros paveiktais:

- ir pamatota diskrešu objektu plūsmas formalizācija mezoskopiskās plūsmas veidā;
- ir noformulēti kombinēto modeļu galveno komponentu funkcionēšanas un apvienošanas principi;
- ir apkopoti komponentu modelēšanas rezultātu veidi, to īpašības un aprēķināšanas metodes;
- ir aprakstītas kombinēto modeļu vispārīgās īpašības un noteikti modeļu darbības rezultāti.

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

Galvenie secinājumi ir šādi:

- piedāvātā kombinētā modelēšanas pieeja pamatojas uz materiālo plūsmu teorijas jēdzieniem;

- piedāvātā kombinētā modelēšanas pieeja nodrošina vienkāršotu, salīdzinot ar tradicionāliem diskrētu notikumu, modeļu izveidošanu;
- kombinētie modeļi nodrošina efektīvu un uzticamu modelēšanas datu iegūšanu.

Nodaļā ir realizētas prasības modelēšanas pieejas realizācijai, kura atbalsta diskrētu notikumu, kas saistīti ar modeļa komponentu gabaliem lineāriem stāvokļa izmaiņām, plānošanā un modeļu izveidošanā izmanto ieejas datus, kuru attēlošana ir tuva datiem par reāliem plūsmu procesiem.

## **4. IZSTRĀDĀTĀS PIEEJAS PIELIETOJUMS MATERIĀLO PLŪSMU APSTRĀDES SISTĒMAS MODELĒŠANAI**

Šajā nodaļā ir aprakstīts kombinētās imitācijas modelēšanas pieejas pielietojums materiālo plūsmu apstrādes sistēmu imitācijas modelēšanā, apskatot pieostas dzelzceļa mezgla sistēmas imitācijas modeļus.

Apskatāmā pieostas dzelzceļa mezgla sistēmas modelēšana tiek veikta tradicionālā diskrētu notikumu sistēmu modelēšanas paradigmā un realizējot izstrādātās kombinētās pieejas teorētiskos pamatus. Galvenais imitācijas modeļa izstrādes mērķis ir parādīt izstrādātās kombinētās pieejas pielietojuma priekšrocības, salīdzinot ar diskrētu notikumu modelēšanas pieeju. Diskrētu notikumu un kombinētā modeļa eksperimentu rezultāti tiek salīdzināti savā starpā.

### **4.1. Lietojuma pētījuma problēmas formulēšana**

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. Turpmāk tekstā to sauksim par modelējamo sistēmu vai vienkārši sistēmu. Sistēmā tiek novērotas intensīvās kustīgu objektu – vilcienu un vagonu – plūsmas.<sup>3</sup>

Pieostas dzelzceļa mezglā gadījuma laika momentos piebrauc dažāda tipa vilcieni, kas sastāv no pieciem vagonu tipiem. Pēc piebraukšanas dzelzceļa mezglā vilciens tiek apskatīts vienā no trim pienākšanas parka piebraukšanas ceļiem, vienlaikus notiek nepieciešamo dokumentu noformēšana. Ceļu aizņemtības gadījumā vilciens var gaidīt nostāves parkā. Pēc dokumentu noformēšanas notiek vilciena izformēšana un vagonu uzkrāšana uzkrāšanas ceļos atbilstoši vagonu tipiem. Turpmāk vagonu grupu pārvietošanu dzelzceļa mezgla teritorijā nodrošina pieostas stacijas lokomotīves. Vagonu grupas no uzkrāšanas ceļiem tiek pārvietotas sekojoši:

- ogļu pusvagoni – uz 1. ostas rajonu,
- pusvagoni ar šķembām un segtie vagoni – uz stacijas pievedceļiem,
- fitingu platformas un fitingu platformas refkonteineri – uz 3. ostas rajonu,
- pilnie graudu vedēji – uz 2. ostas rajonu,

---

<sup>3</sup> Modelējamās sistēmas apraksts ir izstrādāts sadarbībā ar uzņēmuma „LDZ ritošā sastāva serviss” projektu, mārketinga un attīstības daļas vadītāju F. Mihailovu.

- tukšie graudu vedēji – uz centrālo terminālu.

Graudu vedēji, pārbraucot vagonu svarus, tiek svērti gan pirms, gan pēc iekraušanas/izkraušanas.

Pēc apstrādes ostas kravas rajonos vagoni var tikt pārvietoti uz vilcienu formēšanas vietu, t.i., nosūtīšanas parku. Vagoni paliek kravas frontēs, kamēr būs iespējams tos pārvietot uz formēšanas ceļiem. Pēc vilciena saformēšanas notiek tā nosūtīšana no pieostas dzelzceļa mezgla. Sistēmas darbība tiek pakļauta laika apstākļu ietekmei. Atkarībā no laika apstākļiem mainās atsevišķu operāciju, piemēram, ogļu izkraušanas operācijas ilgums un sistēmas objektu, piemēram, elevatora pieejamība.

Modelējamās sistēmas struktūras vienkāršotu shematisko attēlojumu var aplūkot 4. pielikumā.

Modelējamās sistēmas dažas īpašības, svarīgu elementu aprakstus, atsevišķu parametru vērtības, gadījuma lielumu sadalījuma funkcijas un papildus informāciju, kas tika izmantota imitācijas modeļa izstrādei, ir iespējams aplūkot 5. pielikumā.

Pētījuma veikšanas laikā sadarbībā ar ekspertu tika izstrādāts pieostas dzelzceļa transporta mezgla diskrētu notikumu modelis. Modeļa adekvātums tika pārbaudīts, veicot tā verifikāciju un validāciju. Modeļa verifikācija ir veikta, izmantojot modeļa trasēšanu un starprezultātu analīzi. Kā palīglīdzeklis tika pielietota vienkāršota modeļa darbības animācija. Modeļa validācija ir realizēta, izmantojot eksperta vērtējumu. Eksperimentos iegūti rezultāti, kas izmantoti galvenokārt vagonu un lokomotīves izmantošanas efektivitātes pētījumam [47]. Par imitācijas pētījuma rezultātiem nolasīti referāti starptautiskajās konferencēs (UKSim 12th International Conference on Computer Modelling and Simulation un 3rd International Doctoral Student Workshop on Logistics 2010. g.).

Dzelzceļa mezgla diskrētu notikumu modeļa, kas ir izveidots diskrētu notikumu sistēmu modelēšanas pakotnē, attēls ir aplūkojams 6. pielikumā.

Diskrētu notikumu modeļa izstrādes procesā kustīgie objekti, t.i., gan vilcieni, gan atsevišķi vagoni, kas veido plūsmas, tika detalizēti aprakstīti. Ņemot vērā modelējamās sistēmas funkcionēšanas īpašības, tika izvēlēts modelēšanas perioda ilgums – viens gads. Modelēšanas laikā imitācijas modelī tika konstatēts vidējais piebraucošo vilcienu skaits 100 eksperimentos 5072,37 vilcieni/gadā, t.i., tika novērota intensīva diskrētu objektu plūsma. Runājot par atsevišķiem vagonu tipiem, ir iespējams konstatēt, ka tie arī veido intensīvas plūsmas, piemēram, pusvagonu ar oglēm vidējais sastāvu skaits, kas tika apstrādāti 1. ogļu termināla zonā, 100 eksperimentos ir vidēji 3777,45 sastāvi/gadā.

Modelēšanas rezultāti ietver sevī tādus sistēmas funkcionēšanas raksturojumu

novērtējumus kā:

- ienākošo un izejošo vilcienu skaits;
- ostas aprīkojuma izpildīto operāciju skaits un noslodze;
- ostas lokomotīvu izpildīto operāciju skaits un noslodze;
- atsevišķu vagonu tipu pavadītais laiks pieostas dzelzceļa stacijā;
- citi novērtējumi.

Modelēšanas rezultāti tika izmantoti likumsakarības starp lokomotīvu pieejamību un vagonu pavadītā laika sistēmā analīzei, vagonu svara, lokomotīvu un dzelzceļa ceļa posmu noslodzes radītāju novērtējumu iegūšanai [23].

## **4.2. Dzelzceļa mezgla konceptuālais modelis**

Ar diskreto notikumu modeli iegūtie novērtējumi, realizējot dažādus kravu plūsmu veidošanas scenārijus, tiek aprēķināti, izmantojot detalizētus notikumu protokolus par lieliem notikumu skaitiem. Rezultātu kopsavilkumā vairs nav iespējams atšķirt atsevišķa plūsmas objekta „ieguldījumu” apkopotajos novērtējumos. Konstatēta pretruna starp izstrādātā modeļa plūsmu objektu smalki detalizētu aprakstu un iegūto rezultātu vispārīgu raksturu pamato mēģinājumu vienkāršot modelēšanas pieeju no materiālo plūsmu aprakstīšanas viedokļa. Par eksperimentālā kombinētā modeļa pētījuma objektu ir izvēlēta modelējamās sistēmas apakšsistēma – ogļu termināla 1. zona, kas apstrādā 80% no ienākošajiem ogļu sastāviem.

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 6. pielikumā.

Ogļu terminālā 80% sastāvu tiek pārvietoti uz 1. zonu un 20% – uz 2. zonu. 1. zonā ir divas vagonu apstrādes pozīcijas (kravas frontes). 1. pozīcijā var atrasties 50 vagoni, 2. pozīcijā – 55 vagoni. Starp pozīcijām atrodas bufera zona (2 izlikšanas ceļi 60 vagoniem). Stundas laikā var tikt apstrādāti (iekrauti/izkrauti) vidēji 25 vagoni. Pēc apstrādes vagoni var tikt pārvietoti uz staciju, pārvietošanu izpilda 2. lokomotīve. Gadījumā, ja 2. lokomotīve izpilda citas operācijas, vagoni var tikt pārvietoti uz buferi un neapstrādātie vagoni – no bufera uz apstrādes vietu. Tāda veida pārvietošanu var izpildīt brīvostas lokomotīve. Pēc vagonu apstrādes, gadījumā, ja buferī ir brīvas vietas, bet stacija nevar pieņemt apstrādātos vagonus un izformēšanas punktā gaida vagoni, apstrādātos vagonus var pārvietot uz bufera

zonu. Pārvietošanu var izpildīt 2. lokomotīve vai brīvostas lokomotīve. Pārvietošana starp apstrādes un bufera zonām aizņem 30 minūtes.

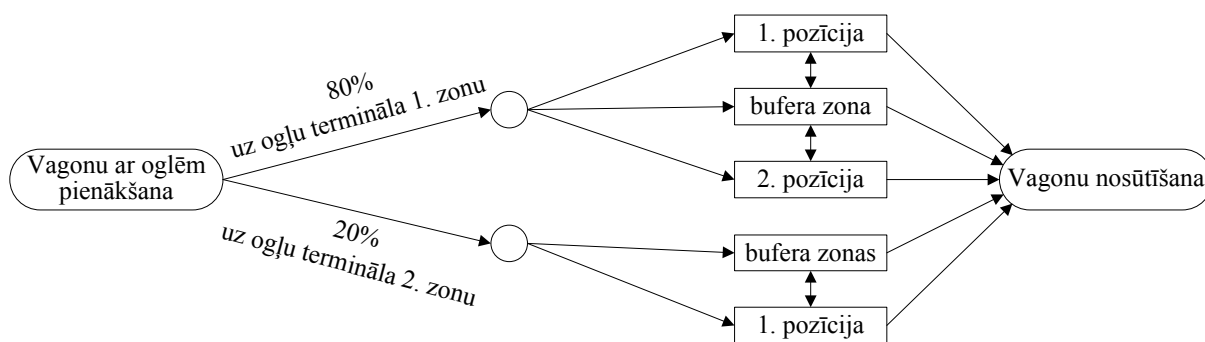
2. zonā ir viena apstrādes pozīcija. Šeit var atrasties 83 vagoni. Šeit arī atrodas divas bufera zonas, kur 1. bufera zonā var atrasties 83 vagoni un 2. bufera zonā – 64 vagoni. Stundas laikā var tikt apstrādāti vidēji 25 vagoni. Lokomotīvu darbības algoritms ir tāds pats kā pirmajai zonai.

Ogļu termināla struktūras vienkāršots attēls ir aplūkojams 4.1. att., ogļu termināla objektu galvenie parametri detalizētāk ir aprakstīti 6. pielikumā.

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

Modelēšanas uzdevuma nostādnes analīze ļauj konstatēt, ka objektu plūsmas modelējamā sistēmā var tikt dabiski aprakstītas mezoskopiskajā detalizācijas līmenī, t.i., izmantojot objektu plūsmas intensitātes. Piemēram, 6. janvārī laika posmā no plkst. 0:42 līdz plkst. 9:32 ir novērota ienākošās ogļu vagonu plūsmas intensitāte 28,1 vagoni/stundā; tajā pat laika posmā izkraušanas operāciju intensitāte, ņemot vērā laika apstākļus, termināla 1. pozīcijā sastāda 20,5 vagoni/stundā. Izkraušanas operāciju intensitāte var tikt izteikta kā izpildīto izkraušanas operāciju skaits stundā, kur viena operācija ir viena vagona pabeigta izkraušana.

Tātad ir iespējams izskatīt modelējamo sistēmu kā materiālo plūsmu apstrādes sistēmu (MPAS), turklāt var konstatēt, ka uzdevuma nostādnē izmantotie plūsmu raksturojumi ļauj pielietot gan tradicionālo diskreto notikumu modelēšanas pieeju, gan kombinēto modelēšanas pieeju sistēmas darbības raksturojumu novērtēšanai.



4.1. att. Ogļu termināla vienkāršota struktūra

### 4.3. Prasības modelēšanas programmatūrai

Analizējot uzdevuma nostādni, ir iespējams noformulēt prasības programmlīdzeklim, ar kura palīdzību ir iespējams realizēt MPAS kombinēto modeli un iegūt ticamus rezultātus.

Ir nepieciešama dažu standarta funkciju realizācija, t.i.:

- gadījuma lielumu ģenerēšana,
- laika progresa nodrošināšana,
- notikumu plānošana un notikumu apakšprogrammu izpildes vadīšana,
- sarakstu dinamiska vadīšana,
- statistisku rezultātu vākšana un pārskatu veidošana,
- entītiņu un resursu (dinamisku un statisku objektu) modelēšana,
- vadības elementu un operāciju modelēšana,
- modelēšanas eksperimentu vadīšana,
- entītiņu stāvokļu noteikšana,
- kļūdu novēršana.

Tādas funkcijas realizē vairums diskrētu notikumu sistēmu programmlīdzekļu [30, 60].

No 3. darba nodaļas seko, ka specifiskās funkcijas, kas ir nepieciešamas kombinēto modeļu realizācijai, ir šādas:

1. Notikumu plānošana, atbilstošo apakšprogrammu izpildes vadīšana un statistisku rezultātu vākšana pārskatiem, kas ir saistīti ar:
  - plūsmas intensitātes izmaiņu momentiem,
  - resursu pieejamības un caurlaidspējas izmaiņu momentiem.
2. Gabaliem konstanto un gabaliem lineāro stāvokļa mainīgo imitācija.

No mūsdienīgajiem imitācijas modelēšanas programmlīdzekļiem šīm prasībām atbilst tādi programmlīdzekļi, kas realizē diskrētu notikumu sistēmu modelēšanas pieeju, iekļauj sevī objektus, kuru stāvokļa trajektorijas ir gabaliem lineāras un pieļauj lietotāja koda fragmentu iekļaušanu modeļos. Tādu programmlīdzekļu (pēc to ražotāju informācijas) ir diezgan daudz. Var atzīmēt, piemēram, *ExtendSim* modelēšanas programmu kopu, *Arena* un *SIMUL8* imitācijas modelēšanas programmatūru kā pieejamākos un plašāk izmantojamus līdzekļus [78, 79]. Var piezīmēt, ka ar specializētas programmatūras izstrādi ir saistīti daži Magdeburgas Universitātes zinātnieku darbi un publikācijas [40], taču programmatūras tirgū kombinētās imitācijas modelēšanas programmlīdzekļi netiek piedāvāti.

Promocijas darba tapšanas laikā ir izstrādāti kombinēti materiālo plūsmu apstrādes sistēmas imitācijas modeļi *Arena* un *SIMUL8* imitācijas modelēšanas vidēs [12, 13] un

eksperimentālais modelis *EXCEL* elektroniskajā tabulā.

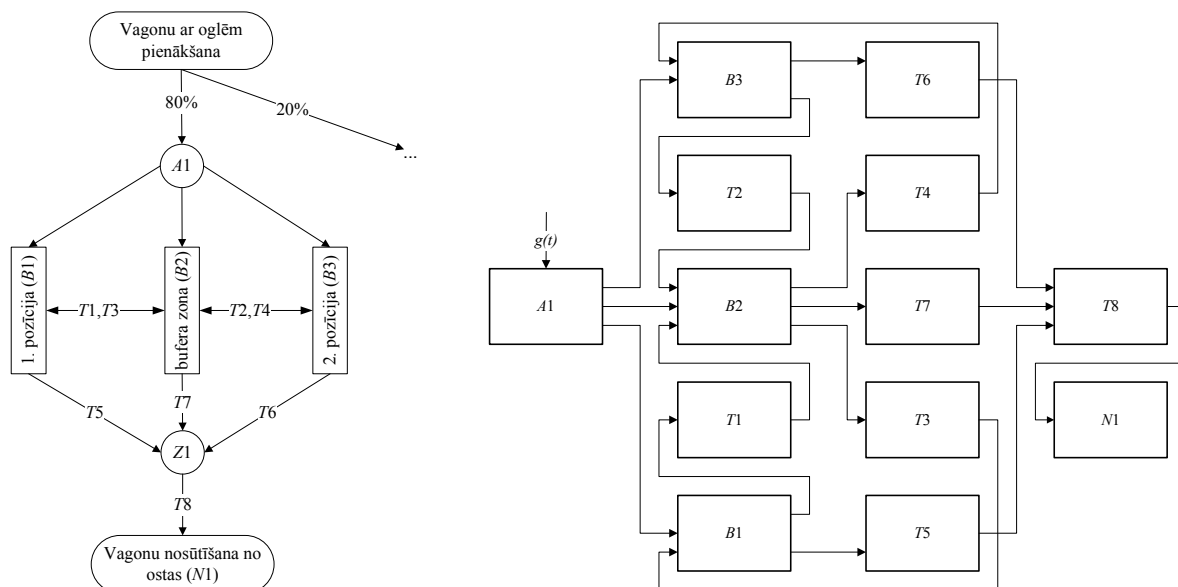
#### 4.4. Kombinētā modeļa izstrāde

Kombinētā imitācijas modeļa veidošanu var uzsākt ar konceptuālā modeļa izstrādāšanu. Ogļu termināla 1. zonas vienkāršotajā procesa diagrammā 4.2. 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. Attēls pilnā izmērā ir aplūkojams 7. pielikumā. Transporta elementi no *T1* līdz *T7* atbilst plūsmu objektu pārvietošanas procesa posmiem līdz ogļu termināla robežai. Punktā *Z1* notiek lokomotīves nomaīņa. Transporta elements *T8* modelē 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 laiki starp sastāviem netiek imitēti atsevišķi, bet tie tiek iekļauti jaunā sastāva kopējā pārvietošanas laikā, lokomotīves mašīnisti strādā bez pārtraukumiem un lokomotīves vienmēr ir darbaspējīgā stāvoklī. Procesu diagrammai atbilstošā kombinētā modeļa shēma ir aplūkojama 4.2. att. Attēls pilnā izmērā ir aplūkojams 7. pielikumā.

Kombinētais modelis ir izveidots ar diskrētu 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 3.2.1. nodaļā, 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 paralēlas plūsmas, kas ietver sevī citus vagonu tipus. Modelī ienākošā plūsma tiek attēlota impulsu veidā, kas ir vagonu „porcijas” jeb sastāvi. Modeļa mezglu „atlikums” jeb saturs veidojas kā vagonu ienākošās un izejošās plūsmas starpība.

Ogļu termināla zonas kombinētais imitācijas modelis ir izveidots uz 1. zonas procesa diagrammas pamata, kas attēlota 4.2. a) att.



a) Ogļu termināla 1. zonas procesa b) Ogļu termināla 1. zonas kombinētā modeļa struktūra diagramma

#### 4.2. att. Ogļu termināla 1. zonas konceptuālā modeļa shematisks attēlojums

Ogļu vagonu ierašanās punkts tiek modelēts, izmantojot vienkanāla avotu, kam ir sekojošas īpašības:

- Uz komponentes izejas gadījuma laika momentos, kas tiek noteikti ar empīriskā laika intervālu starp ogļu vagonu sastāviem no uzkrāšanas ceļiem (turpmāk tekstā – ierašanās laika intervāli) sadalījuma funkciju  $g(t)$ , kas aplūkojama 6. pielikumā, P6.1. att., tiek modelētas vagonu „porcijas”.
- Porcija tiek interpretēta kā atsevišķs ogļu vagonu sastāvs, kas tika saformēts dzelzceļa mezglā uzkrāšanas ceļos.
- Porcijas apjomu nosaka ogļu vagonu sastāvos ietilpstošo vagonu skaita empīriskā sadalījuma masas funkcija, kas aplūkojama 6. pielikumā, P6.4. att.

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

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 imitēt, lietojot tradicionālas diskretu notikumu programmatūras objektu avotu. Kombinētā modeļa komponentu realizācijas īpašības var apskatīt laika diagrammu veidā pēc modeļa izpildes.

Komponente „avots” ir realizēta ar DNS modelēšanas pakotnes objektu „*Tank*” un skripta fragmentiem, kas tiek izpildīti sastāva ierašanās laika momentā.

Pēc ierašanās ogļu terminālā vagonu sastāvi tiek ievietoti vienā no divām izkraušanas

pozīcijām  $B1$  un  $B3$  vai bufera zonā  $B2$ . Termināla kombinētajā modelī gan bufera zona, gan izkraušanas pozīcijas tiek modelētas kā bunkuri. Bunkuri tiek realizēti ar diviem 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. DNS modelēšanas programmatūras objektu logi, kas imitē bunkuru  $B1$ , ir aplūkojami 4.3. att.

Šajā piemērā bunkura ietilpība ir apskatīta kā neierobežota, taču nepieciešamības gadījumā ir iespējams ierobežot bunkura ietilpību  $B_{\max}$  un noteikt bunkura sākuma plūsmas vielas apjomu (*Capacity* un *Start up level*), sk. 4.3. att. Ir iespēja modificēt objekta funkcionēšanas algoritmu, izmantojot skriptus, kas nostrādā dažādu nosacījumu izpildīšanās laika momentos, sk. 4.3. att. Bunkura maksimālā izejošas objektu plūsmas intensitāte  $\mu_{\max} = 25$  vagoni/stundā vai 0,416(6) vagoni/minūtē tiek noteikta, izmantojot objekta *Pipe* parametru *Flow rate*, sk. 4.3. att.

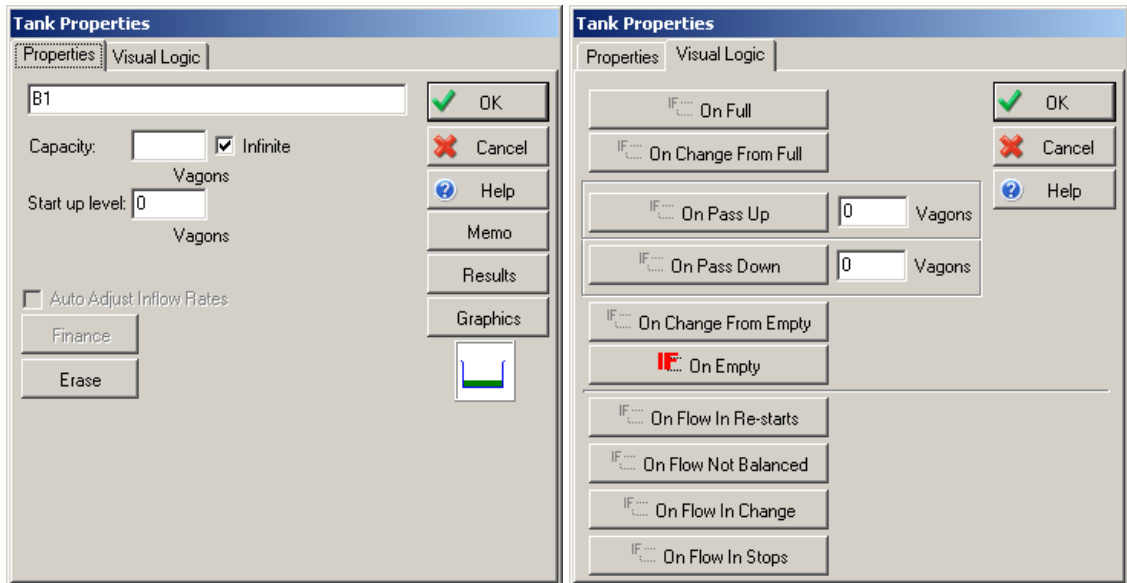
Transportēšanas laiks starp avotu  $A1$  un bunkuriem  $B1$ ,  $B2$  un  $B3$  netiek ņemts vērā, un diskretu objektu plūsmas objekti momentāni tiek ievietoti vienā no diviem bunkuriem  $B1$  vai  $B2$ , kas imitē iekraušanas/izkraušanas operācijas, vai bunkurā – bufera zonā –  $B3$ , ja bunkuri  $B1$  un  $B2$  nav tukši. Plūsmas porcijas, kas tiek ievietota vienā no bunkuriem, 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. Bunkuru ienākošās plūsmas intensitātes netiek definētas, jo šajā piemērā bunkuri  $B1$  un  $B2$  izpilda kombinēto avotu funkcijas. 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. Kā piemēri 4.4. att. ir aplūkojami *Process Oven* objekta operandu noteikšanas logi, kas daļēji imitē transporta elementu  $T5$ . Parametru vērtības tiek noteiktas, ņemot vērā sistēmu dinamikas objektu īpašības un diskretizācijas soli (*System Dynamics Time Slice*), kas šajā piemērā ir vienāds ar 0,01 min. Piemērā apskatītais transporta elements imitē 30 minūšu transportēšanas laiku (*Duration*).

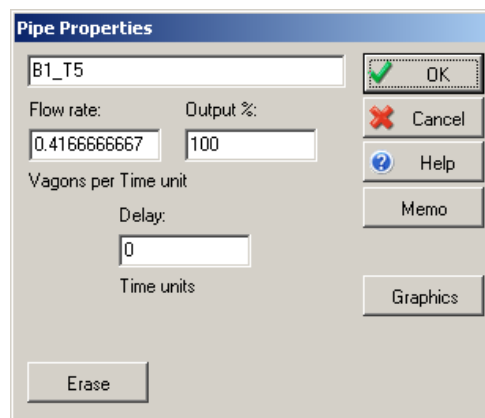
Pēc transportēšanas līdz ogļu termināla robežai notiek transportēšana līdz dzelzceļa mezgla robežai, kas aizņem vidēji 32,5 minūtes vienam sastāvam. Šis procesa posms tiek modelēts kā vēl viens transporta elements –  $T8$ .

Pēc visu procesa posmu modelēšanas notiek plūsmas beigšana, ko imitē noteka M1. Aplūkojamajā piemērā notekas funkcijas imitē divi *Tank* objekti, no tiem pēdējais *Tank* objekts ir neierobežotas ietilpības rezervuārs, kas uzkrāj izejošo plūsmu un nodrošina nepieciešamās statistiskās informācijas iegūšanu.

Izstrādātā kombinētā modeļa attēls ir aplūkojams 4.5. att. bet skripta teksts – 7. pielikumā, P7.3. att.

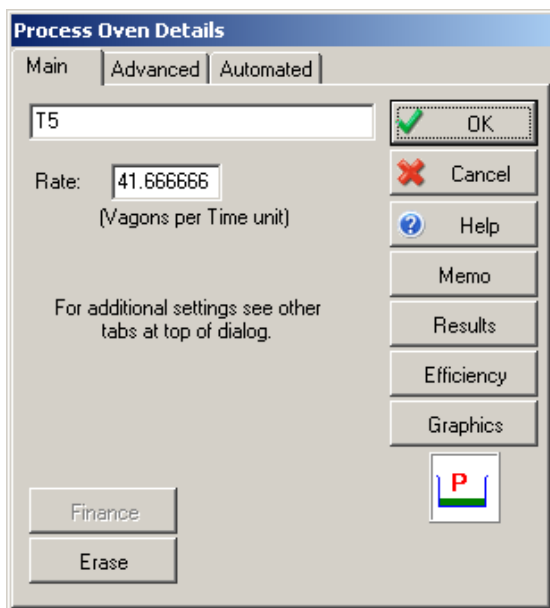


a) Objekta *Tank* parametru noteikšanas logs      b) Objekta *Tank* notikumu skriptu ieejas logs

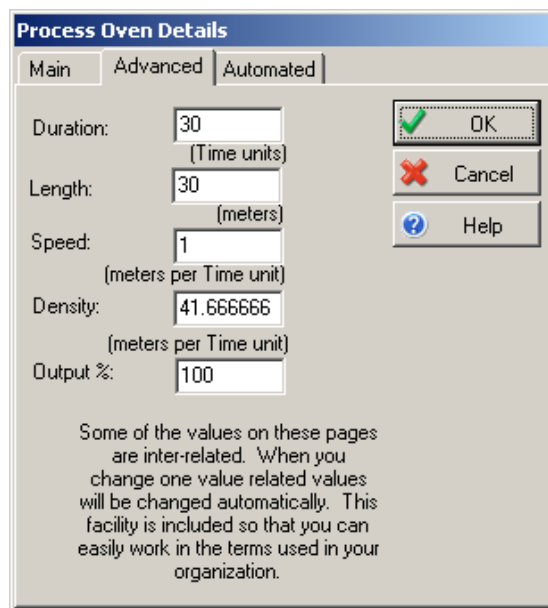


c) Objekta *Pipe* parametru noteikšanas logs

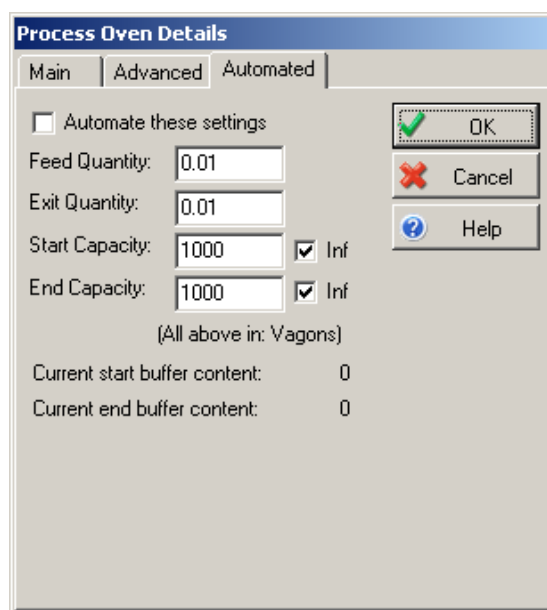
4.3. att. DNS modelēšanas programmatūras objektu *Tank* un *Pipe* galvenie logi



a) Objekta *Process Oven* galvenais parametru noteikšanas logs



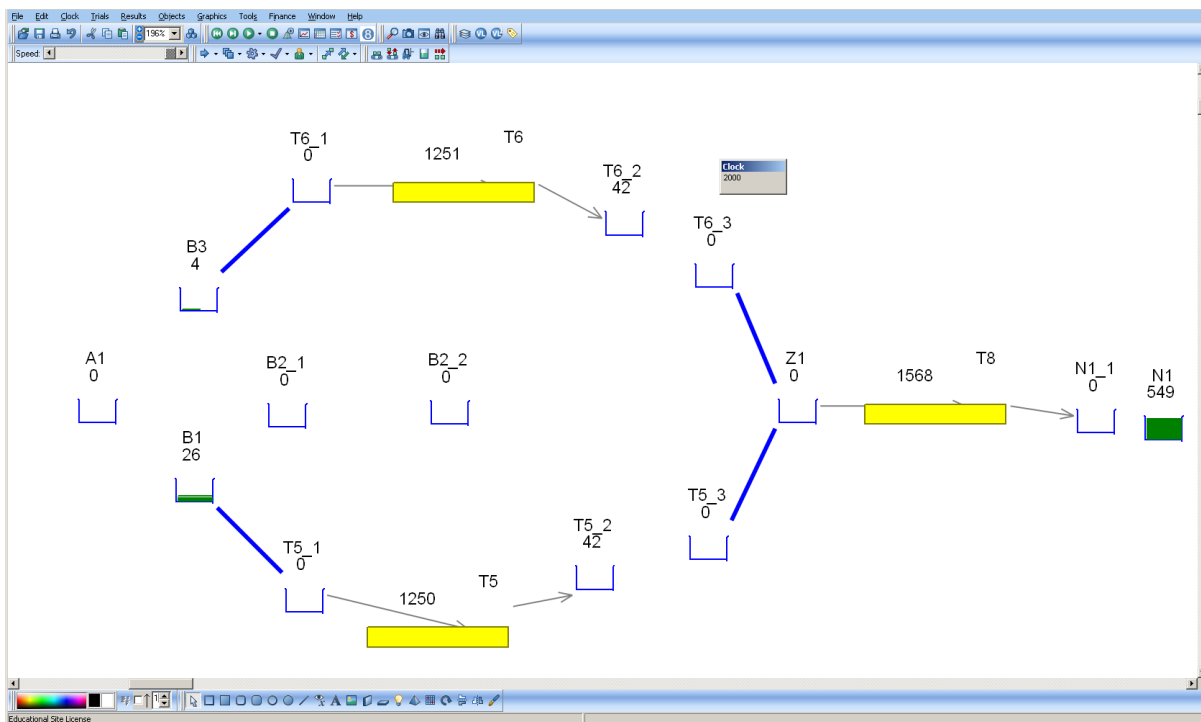
b) Objekta *Process Oven* saistīto parametru noteikšanas logs



c) Objekta *Process Oven* parametru automātiskās izvēles logs

#### 4.4. att. DNS modelēšanas programmatūras objekta *Process Oven* parametru noteikšanas logi

Izveidotā modeļa struktūras attēlojums vizuāli atšķiras no konceptuālā modeļa struktūras, jo dažas modeļa komponentes ir realizētas skriptos, piemēram, avots *A1* nav vizuāli savienots ar bunkuriem *B1* un *B3*, jo objektu porcijas ierašanās laika momentā tiek realizēts skripta fragments, kas diskrēto objektu, t.i., ogļu vagonu sastāvu pārveido plūsmas porcijā ar apjomu, kas atbilst vagonu skaitam.



4.5. att. Ogļu termināla 1. zonas kombinētā imitācijas modeļa attēls

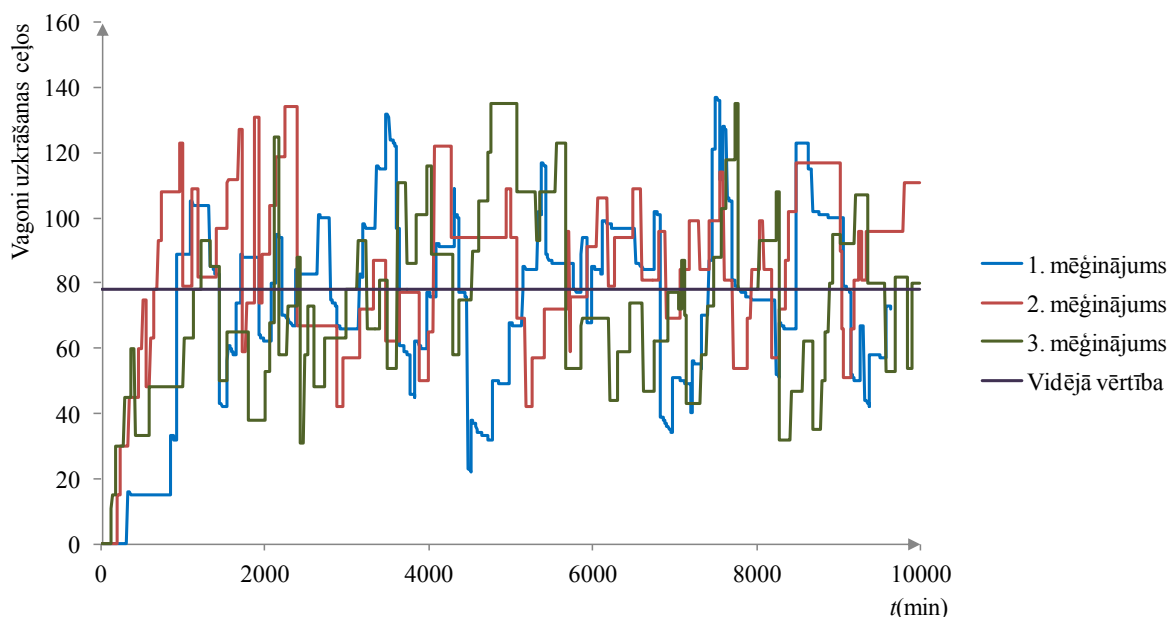
## 4.5. Imitācijas eksperimentu realizācija

Kombinētās modelēšanas pieejas izstrādes procesā tika izveidoti dažādas sarežģītības modeļi, kas imitē pieostas dzelzceļa transporta mezgla darbību gan kopumā, gan tā atsevišķu rajonu darbību. Šajā nodaļā apskatīsim un analizēsim iegūtos mezgla kopējo un ogļu termināla diskreto notikumu modeļu rezultātus un ogļu termināla kombinētā modeļa rezultātus, un salīdzināsim tos savā starpā.

### 4.5.1. Dzelzceļa mezgla diskreto notikumu imitācijas modelis

Diskreto notikumu imitācijas modelis tiek realizēts kā sistēmas, kas strādā bez pārtraukumiem (*non-terminating system*), modelis. Sākotnēji modelis tika apskatīts un pārbaudīts no „uzsildīšanas” perioda modelēšanas nepieciešamības viedokļa. Modelēšanas mēģinājuma ilgums ir viens gads, t.i., 525600 minūtes. 4.6. att. ir aplūkojami 3 mēģinājumos novērotās vagonu skaita laika diagrammas modelēšanas laika sākumā.

Vagonu skaita sadalījums šajā mezgla zonā neatbilst normālam sadalījumam, un analītiskais uzsildīšanas perioda aprēķins nav iespējams. Taču ir iespējams konstatēt, ka visos mēģinājumos vagonu skaits „svārstās” ap vidējo vērtību, kas tika konstatēta, modelējot



**4.6. att. Dzelzceļa mezgla diskretu notikumu modeļa laika diagramma trijos mēģinājumos. Vagonu skaits uzkrāšanas ceļos modelēšanas mēģinājumu sākumā**

ilgu laika periodu. Uzsildīšanas procesa ilguma  $t_{uzs}$  aptuvenš novērtējums, piemēram, pieņemot par stacionārā perioda sākuma punktu pirmo laika momentu, kad novērotā vērtība ir lielāka par ilgā laika periodā novēroto vidējo vērtību, dod tā ilgumu  $t_{uzs} \leq 2000 \text{ min} \approx 0,38\%$  no modelēšanas mēģinājuma ilguma (pārejas procesa nogriešanas *Gafarian* algoritms). Līdz ar to tiek pieņemts, ka uzsildīšanas procesa ietekme uz ilgtermiņa modelēšanas rezultātiem nav būtiska.

Modelēšanas mēģinājuma ilgums tika novērtēts, izmantojot 3 mēģinājumu rezultātu konverģences aprēķina metodi [60]. Šī metode ļauj pamatot modelēšanas mēģinājuma ilguma izvēli. Metodes pamatā ir konverģences radītāja aprēķins:

$$C_i = \frac{\text{Max}(\bar{Y}_{i1}, \bar{Y}_{i2}, \bar{Y}_{i3}) - \text{Min}(\bar{Y}_{i1}, \bar{Y}_{i2}, \bar{Y}_{i3})}{\text{Min}(\bar{Y}_{i1}, \bar{Y}_{i2}, \bar{Y}_{i3})}, \quad (4.1)$$

kur  $C_i$  – konverģence  $i$ -tajā modelēšanas periodā,

$Y_{ij}(t)$  – uzkrātā vidējā izejas raksturojuma vērtība  $i$ -tajā periodā  $j$ -tajam mēģinājumam.

Modelēšanas mēģinājuma ilgums tiek izvēlēts, sasniedzot pieņemamu konverģences radītāja vērtību, piemēram, izvēloties 5% konverģences radītāju, dzelzceļa mezgla mēģinājuma ilgumam jābūt ne mazākam kā 66300 minūtes. Tātad ir iespējams izvēlēties vienu garu mēģinājumu kā alternatīvu atkārtotiem mēģinājumiem.

Konverģences aprēķinam atbilstošas triju mēģinājumu kumulatīvās vidējās vagonu

skaita vērtību līknes ir aplūkojamas 4.7. att.

Stacionārā režīmā tika iegūti dažu raksturojumu novērtējumi, kas ļauj novērtēt dzelzceļa mezgla objektu funkcionēšanas efektivitāti un eksperimentāli pārbaudīt mezgla raksturojumu uzlabošanas iespējas.

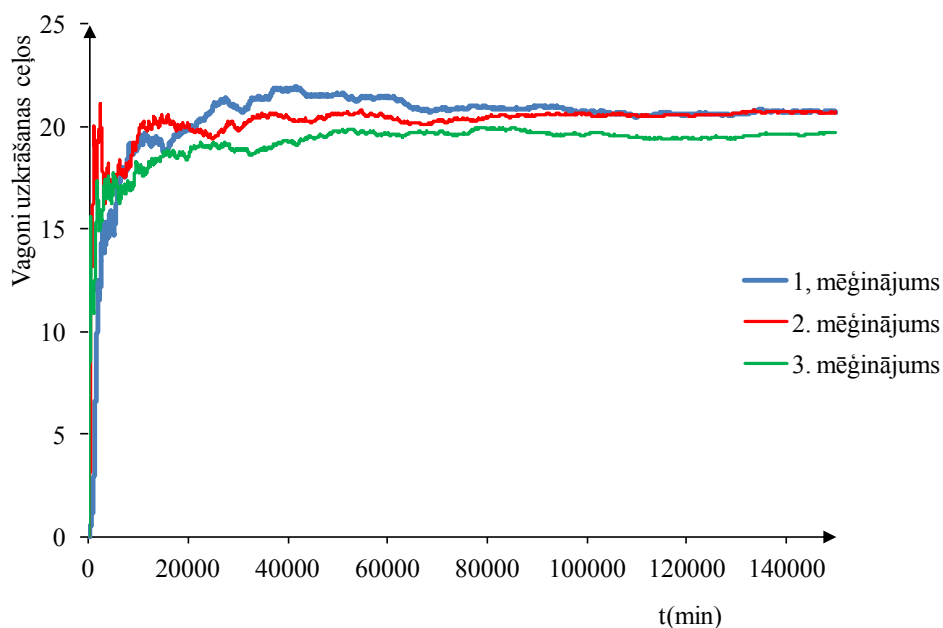
Kā objektu funkcionēšanas efektivitātes raksturojumus varam apskatīt lokomotīvu noslodzes koeficientu novērtējumus, piemēram:

Lokomotīve 1	Utilization % 53.937
Lokomotīve 2	Utilization % 75.6913
Brīvostas lokomotīve	Utilization % 22.40868

1. un 2. lokomotīve ir vienāda tipa objekti, kas izpilda identiskas darbības dzelzceļa mezgla teritorijā. Ilgtermiņa mēģinājumā iegūtie novērtējumi ļauj konstatēt, ka ir būtiska starpība 1. un 2. lokomotīves noslodzē. Šis fakts var būt par pamatu lokomotīvu darbības algoritma izmaiņām vai tām norīkoto operāciju pārskatīšanai.

Vēl viens nozīmīgs dzelzceļa mezgla funkcionēšanas raksturojums ir vagonu dīkstāve [23]. Šī raksturojuma novērtējumu var iegūt atsevišķiem mezgla rajoniem. Piemēram, 4.1. tabulā ir aplūkojami mēģinājumu rezultāti (visos mēģinājumos  $T=525600$  min), kas iegūti, mainot resursu skaitu dzelzceļa mezglā. Resursu skaita izmaiņu rezultāts ir īpaši uzskatāms 2. alternatīvas scenārija realizācijas rezultātā. Ir redzams, ka 2. lokomotīves summārā noslodze praktiski neatšķiras no citos scenārijos iegūtajiem novērtējumiem, taču vagonu pavadītais laiks ogļu terminālā ir mazāks par 35% (100% – laiks, kas iegūts, modelējot esošo situāciju). Ir skaidrs, ka ogļu vagonu pavadītais laiks terminālā ir atkarīgs no 2. lokomotīves pieejamības un termināla pārvietošanas pieprasījumu operatīvas izpildes, kā arī ir iespējams salīdzināt ekonomiskos radītājus, ņemot vērā tarifus par vagonu dīkstāvēm, lokomotīvu nolietojuma izmaksas un iesaistītā personāla atalgojumu.

Dzelzceļa mezgla diskrētu notikumu imitācijas modelim piemīt tāda tipa modeļu tradicionālās īpašības. Modelis ir izveidots, izmantojot objektu un resursu detalizētu aprakstīšanas pieeju, kas prasa liela ieejas datu apjoma vākšanu un apstrādi. Piemēram, šajā modelī kā parametri ir izmantoti dažādi empīriskie gadījuma lielumu sadalījuma likumi: laika intervālu starp vilcieniem sadalījums, vagonu tipu sadalījums piekrautiem un tukšiem vilcieniem un citi sadalījumi. Ir savākts liels datu apjoms par operāciju izpildīšanas laikiem. Daļa no informācijas ir iekļauta, pēc eksperta rekomendācijām, piemēram, resursu pieejamības koeficients, kas attēlo laika apstākļu ietekmi uz atsevišķu operāciju izpildīšanas laikiem.



4.7. att. Dzelzceļa mezgla diskrētu notikumu modeļa vagonu skaita uzkrāšanas ceļos kumulatīvo vidējo vērtību laika funkcijas

4.1. tabula

Dzelzceļa mezgla diskrētu notikumu modeļa 4 scenāriju realizācijas rezultāti

Resurss	Scenārijs	Resursa vienību skaits	Resursa summārā noslodze (%)	Ogļu vagonu vidējais laiks terminālā (min)	Ienākošo ogļu vagonu skaits
1. lokomotīve	esošā situācija	1	54	103,77	4174
2. lokomotīve		1	76		
brīvostas lokomotīve		1	22		
1. lokomotīve	1. alternatīva	2	54	105,07	4174
2. lokomotīve		1	76		
brīvostas lokomotīve		1	22		
1. lokomotīve	2. alternatīva	1	54	67,89	4174
2. lokomotīve		2	76		
brīvostas lokomotīve		1	20		
1. lokomotīve	3. alternatīva	1	54	103,66	4174
2. lokomotīve		1	76		
brīvostas lokomotīve		2	23		

Iegūtajiem modelēšanas rezultātiem piemīt visas īpašības, kas ir raksturīgas diskrešu notikumu modeļu rezultātiem. No laika atkarīgie un no laika neatkarīgie rezultāti iekļauj sevī resursu izmantošanas intensitātes un apkalpošanas kvalitāti raksturojošos novērtējumus.

Izmantojot atsevišķu objektu raksturojumu novērtējumus, ir iespējams realizēt alternatīvu scenāriju salīdzināšanu un formulēt rekomendācijas pētāmā objekta vadības uzdevumu efektīvai risināšanai. Iegūtie modelēšanas rezultāti apkopo informāciju par atsevišķiem notikumiem, piemēram, modeļa objektu kopējā un vidējā caurlaidspēja, ogles vagonu plūsmas vidējā intensitāte modelēšanas laikā [56].

#### **4.5.2. Ogļu termināla diskrešu notikumu imitācijas modelis**

Izstrādātās teorētiskās kombinētās pieejas praktiskas pielietošanas posmā ir izstrādāti gan diskrešu notikumu, gan kombinētais ogļu termināla 1. zonas imitācijas modelis. Modeļu darbības rezultātu salīdzināšanai ir veikts kopējais modelēšanas mēģinājums. Mēģinājumi ir izpildīti vienādos apstākļos, t.i., ienākošās objektu plūsmas ir saskaņotas savā starpā: sastāvu ierašanās laika momentiem un to garumiem diskrešu notikumu modelī atbilst plūsmas porciju ierašanās laika momenti un apjomi kombinētajā modelī. „Saisītā” mēģinājuma veikšana ļauj uzskatāmi salīdzināt iegūtos rezultātus un izdarīt secinājumus par kombinētā modeļa adekvātumu.

Kombinētā modeļa adekvātuma pārbaudei ir izvēlēts saīsināts modelēšanas mēģinājuma periods  $T = 2000$  min, kas atvieglo modeļa stāvokļa attēlošanu un vienkāršo aprēķinus. Sistēmas raksturojumu novērtējumu darbības analīzei ir jāņem vērā eksperimenta ilguma noteikšanas rezultāti, kas tika apspriesti iepriekšējā nodaļā.

Uz diskrešu notikumu modeļa ieejas mēģinājuma laikā tiek ģenerēti ogļu sastāvi, sastāvu objektu ģenerēšanas rezultāti ir aplūkojami 4.2. tabulā.

Modelēšanas mēģinājuma rezultātā ir iegūts DNS modelēšanas pieejas noslodzes novērtējums 1. un 2. apstrādes pozīcijai, sk. 4.8. att.,

$$U_{d1} = 0,4464, U_{d2} = 0,3972.$$

Apstrādāto vagonu skaita novērtējums 1. un 2. apstrādes pozīcijai ir vienāds ar

$$N_{d1} = T \cdot U_{d1} \cdot C_{d1} = 2000 \cdot 0,4464 \cdot 0,4167 = 372, \text{ un}$$

$$N_{d2} = T \cdot U_{d2} \cdot C_{d2} = 2000 \cdot 0,3972 \cdot 0,4167 = 331,$$

kur  $C_{d1}$  un  $C_{d2}$  – 1. un 2. pozīcijas caurlaidspēja,  $C_{d1} = C_{d2} = 25$  vagoni/stundā vai 0,416(6) vagoni/minūtē.

**Diskrētu notikumu modeļa ienākošās ogļu vagonu sastāvu plūsmas dati mēģinājumā**

Sastāva numurs	Ierašanās laiks terminālā (min)	Vagonu skaits sastāvā
1.	0,000	41
2.	50,000	42
3.	282,433	41
4.	334,108	42
5.	533,157	42
6.	682,069	41
7.	732,069	41
8.	841,577	42
9.	958,371	40
10.	1008,371	40
11.	1058,371	42
12.	1224,989	41
13.	1274,989	42
14.	1420,799	41
15.	1488,149	41
16.	1538,206	42
17.	1825,926	42

Šajā mēģinājumā sastāvu ievietošanai terminālā pirms apstrādes netika izmantota bufera zona.

Pārvietošanas procesa posmiem no 1. un 2. apstrādes pozīcijas līdz ogļu termināla robežai, kas tiek imitēti, izmantojot resursu – brīvostas lokomotīvi, modelēšanas rezultāts ir iegūts kā brīvostas lokomotīves noslodzes rādītājs

$$U_{d\_br\_lok} = 0,26.$$

Pārvietošanas procesa posmam no ogļu termināla robežas līdz vagonu nosūtīšanas no ostas punktam, kas tiek imitēts, izmantojot resursu – 2. lokomotīvi, modelēšanas rezultāts ir iegūts kā 2. lokomotīves noslodzes rādītājs

$$U_{d\_2\_lok} = 0,28.$$

Modeļa nobeiguma posmam, kas ir posms pēc termināla robežas līdz dzelzceļa mezgla robežai, ir iegūts apstrādāto vagonu skaita novērtējums

$$N_{d\_sist} = 703.$$

Vidējā laika, kuru vagonš pavadījis terminālā, novērtējums

$$\bar{t}_{d\_sist\_v} = 152,60 \text{ min.}$$

Vidējā laika, kuru sastāvs pavadījis terminālā, novērtējums

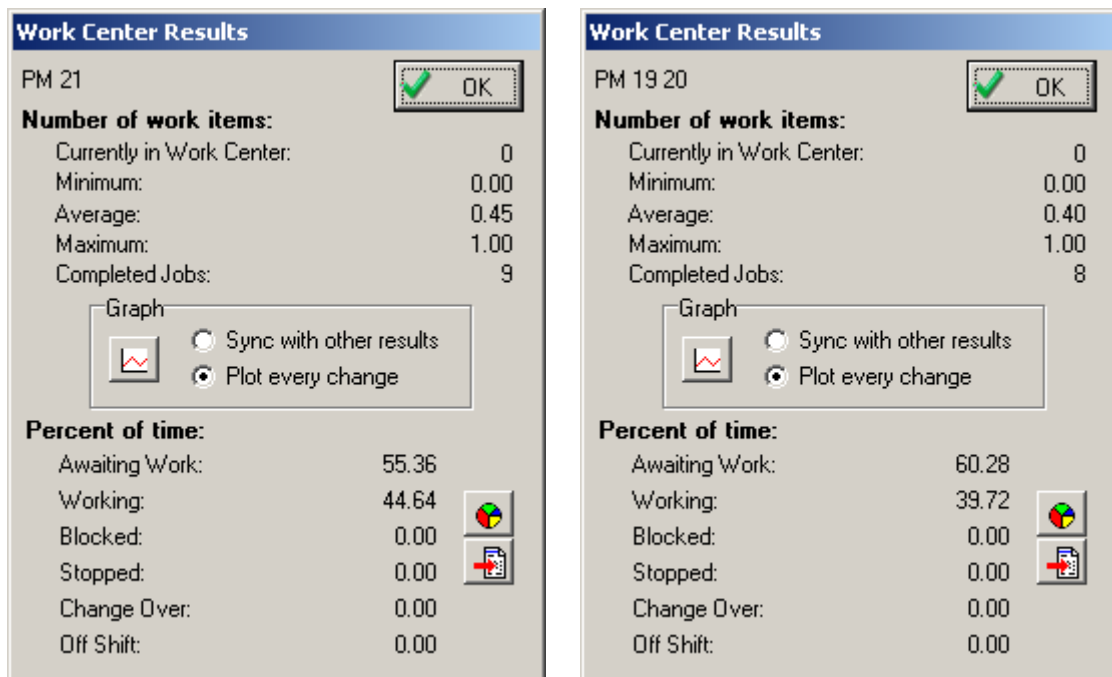
$$\bar{t}_{d\_sist\_s} = 161,85 \text{ min.}$$

Iegūtie modelēšanas rezultāti ļauj secināt, ka resursu izmantošanas intensitāte nav augsta. Neskatoties uz to, vidējais laiks, kuru vagonis ir pavadījis terminālā, būtiski atšķiras no kopējā operāciju laika. Šo faktu var izskaidrot ar to, ka pārvietoti tiek sastāvi, nevis atsevišķi vagoni. Kopumā rezultāti nav pretrunā ar vienkāršiem inženieraprēķiniem atbilstošam modelēšanas mēģinājumam.

#### 4.5.3. Ogļu termināla kombinētais modelis

Uz kombinētā modeļa ieejas mēģinājuma laikā tiek ģenerēti ogļu sastāvi, sastāvu objektu ģenerēšanas rezultāti ir aplūkojami 4.9. att. kā plūsmas avota A1 laika diagramma.

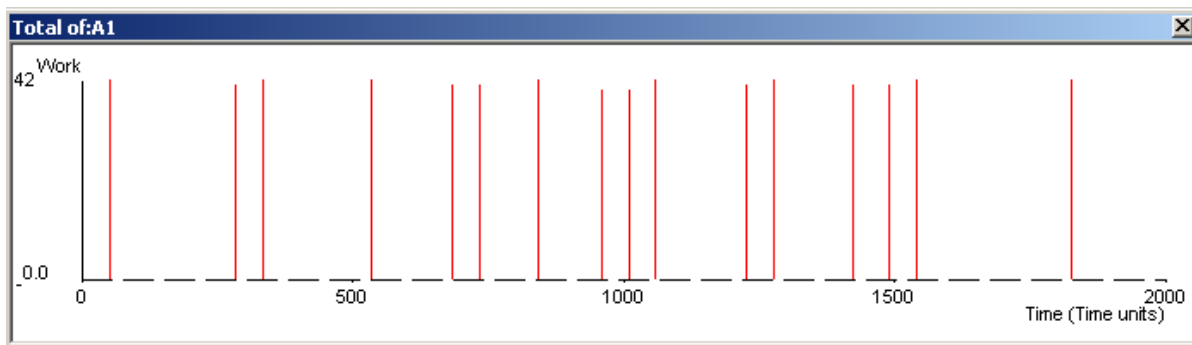
Līdz modelēšanas laikam  $T = 2000$  tika ģenerētas 17 materiālās plūsmas porcijas, t.sk. viena porcija laika momentā  $t = 0$ , kas nav attēlota diagrammā. Plūsmas porcijas laika momenti ir tādi paši kā diskrēto objektu plūsmas ierašanās laika momenti, kas attēloti 4.2. att.



a) 1. apstrādes pozīcijas  
raksturojumu novērtējumi

b) 2. apstrādes pozīcijas  
raksturojumu novērtējumi

4.8. att. Diskrētu notikumu modeļa 1. un 2. apstrādes pozīcijas raksturojumu novērtējumi



**4.9. att. Kombinētā modeļa avota A1 ienākošās plūsmas laika diagramma**

Atbilstoši darba 3.2. nodaļā formulētajiem noteikumiem modelēšanas mēģinājumā ir iegūti 1. un 2. apstrādes pozīciju (t.i., bunkuru B1 un B2) rādītāju novērtējumi, kas aplūkojami 4.10. att. Papildus modelēšanas gājiena laikā ir savākti dati par vagonu plūsmas porcijām, kas ļauj novērtēt bunkuru noslodzi

$$U_{k\_B1} = \frac{\sum_{i=1}^9 t_i}{T} = \frac{892,8368}{2000} = 0,4464,$$

kur  $t_i$  –  $i$ -tais laika intervāls, kad bunkurs B1 nav tukšs, un

$$U_{k\_B3} = \frac{\sum_{j=1}^8 t_j}{T} = \frac{794,4}{2000} = 0,3972,$$

kur  $t_j$  –  $j$ -tais laika intervāls, kad bunkurs B3 nav tukšs.

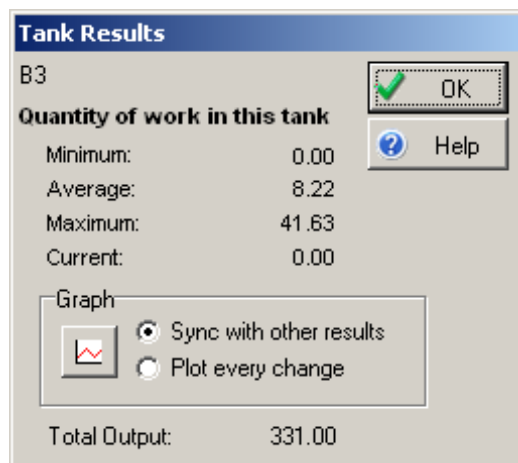
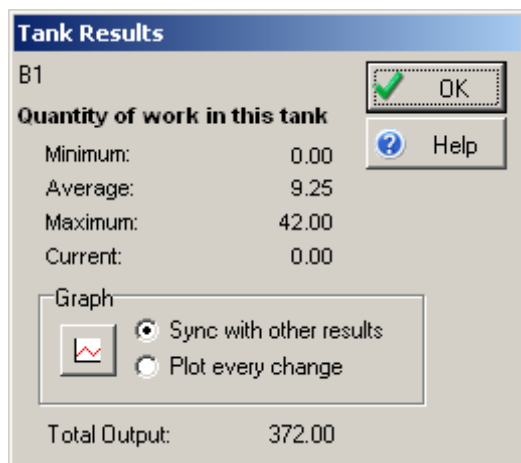
Bunkuru „apstrādāti” plūsmu apjomi ir šādi

$$N_{k\_B1} = 372, \text{ un } N_{k\_B3} = 331.$$

Iegūtie bunkuru raksturojumu novērtējumi ir aplūkojami 4.10. att.

Atbilstoši darba 3.2. nodaļā formulētajiem principiem ir aprēķināti transporta elementu T5 un T6 noslodzes novērtējumi, kas sakrīt ar bunkuru B1 un B3 noslodzes novērtējumiem un ir aplūkojami 4.11. att.

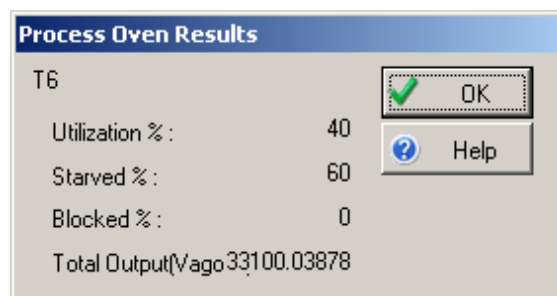
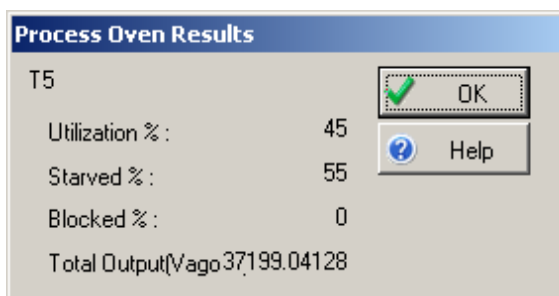
Standarta raksturojumu novērtējumiem, kas iegūti transporta elementiem, ir nepieciešami paskaidrojumi, jo tiešā veidā tos nevar izmantot lokomotīvu noslodzes analīzei. Transporta elementi nodrošina ienākošās plūsmas aizkavēšanu uz noteiktu laiku, šajā piemērā T5 un T6 aizkavēšanas laiki ir vienādi ar 30 minūtēm un T8 aizkavēšanas laiks ir 32,5 minūtes. Noslodzes koeficienta novērtējumus transporta elementiem, kas tiek imitēti ar *Process Oven* objektiem, nevar izmantot tieši, jo tiem ir cita jēga. Taču kopējais uzkrātais aizkavēšanās laiks, kas tika konstatēts visām izejošajām plūsmas porcijām, ir raksturojums,



a) bunkura *B1* raksturojumu novērtējumi

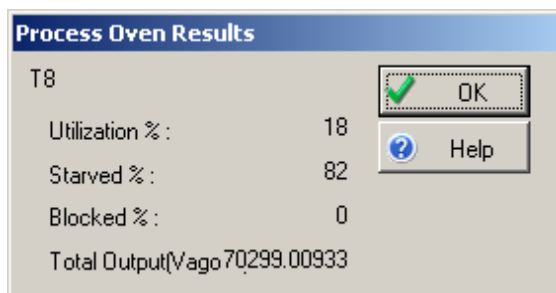
b) bunkura *B3* raksturojumu novērtējumi

**4.10. att. Kombinētā modeļa bunkuru *B1* un *B3* raksturojumu novērtējumi**



a) transporta elementa *T5* raksturojumu novērtējumi

b) transporta elementa *T6* raksturojumu novērtējumi



c) transporta elementa *T8* raksturojumu novērtējumi

**4.11. att. Kombinētā modeļa transporta elementu *T5*, *T6* un *T8* raksturojumu novērtējumi**

kas sniedz informāciju, identisku lokomotīvu noslogojuma laikam, un ļauj aprēķināt atbilstoša resursa noslodzi, kas ir attiecināma uz apskatāmo procesa posmu. Aprēķinu veikšanai ir nepieciešams kopējais aizkavēto plūsmas porciju skaits. Transporta elementiem *T5*, *T6* un *T8* izejošās plūsmas laika diagrammas ir aplūkojamas 4.12 att.

Ir iespējams aprēķināt transporta elementu noslodzes novērtējumus

$$U_{Ti} = \frac{n_i \cdot t_{aiz i}}{T},$$

kur  $n_i$  – ar  $i$ -to transporta elementu pārvietoto plūsmas porciju skaits,

$t_{aiz i}$  –  $i$ -tā transporta elementa aizkavēšanās laiks.

Aprēķinātie transporta elementu noslodzes novērtējumi ir šādi

$$U_{T5} = \frac{n_5 \cdot t_{aiz 5}}{T} = \frac{30 \cdot 9}{2000} = 0,135,$$

$$U_{T6} = \frac{n_6 \cdot t_{aiz 6}}{T} = \frac{30 \cdot 8}{2000} = 0,12 \text{ un}$$

$$U_{T8} = \frac{n_8 \cdot t_{aiz 8}}{T} = \frac{32,5 \cdot 17}{2000} = 0,2763.$$

Modeļa nobeiguma posmam, kas ir posms pēc termināla robežas līdz dzelzceļa mezgla robežai, tiek iegūts apstrādāto vagonu skaita novērtējums

$$N_k = 702,99.$$

Vidējā laika, kuru plūsmas porcija pavadīja terminālā, novērtējums

$$\bar{t}_{\text{tem}} = \frac{1}{\bar{\lambda}^{iz}(t)} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{\text{tem } i}}{n} = \frac{2756,42}{17} = 162,14 \text{ min.}$$

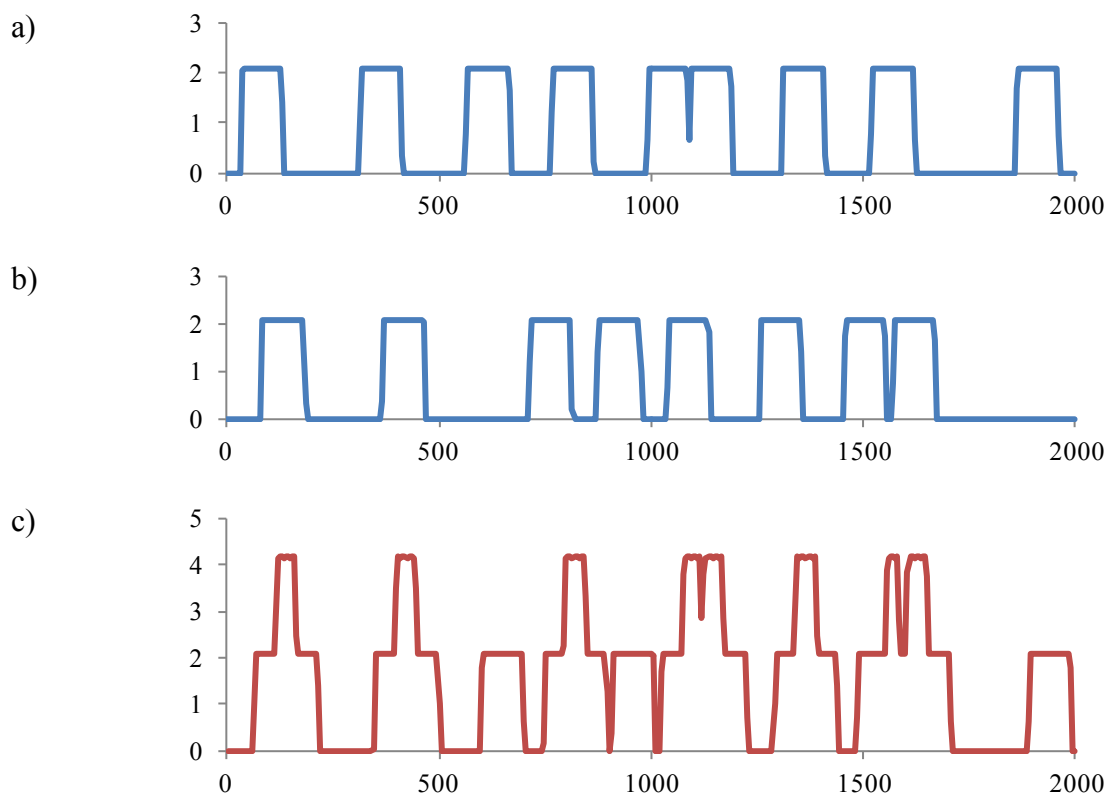
No iegūtā  $\bar{t}_{\text{tem}}$  novērtējuma ir iespējams aprēķināt vidējo ogļu vagonu sastāvu plūsmas intensitāti terminālam, t.i.,

$$\bar{\lambda}^{iz}(t) = \frac{1}{\bar{t}_{\text{tem}}} = \frac{1}{162,14} = 0,0062 \text{ sastāvi/min.}$$

Ir iegūti novērtējumi, kas ir identiski pēc satura diskrešu notikumu modeļa rezultātu novērtējumiem un sniedz informāciju, kas var tikt izmantota modelējamās sistēmas darbības efektivitātes analīzei.

Kombinētā modeļa specifiskās laika diagrammas un plūsmu intensitātes laika diagrammas transporta elementiem  $T5$ ,  $T6$  un  $T8$ , proti, komponentēm, kam nav tiešu analogu DNS modelī, ir aplūkojamas 4.12 att.

Ņemot vērā kombinētā imitācijas modeļa pētniecisko raksturu, varam apskatīt modelēšanas rezultātus no diviem aspektiem: tie var tikt izmantoti gan kombinētā modeļa validācijai, gan modelējamās sistēmas funkcionēšanas raksturojumu novērtējumiem. Iepriekšējās nodaļās tika apskatīti resursu caurlaidspējas un noslodzes novērtējumi, un citi gan no laika atkarīgie, gan no laika neatkarīgie rezultāti. Raksturojumu novērtējumi tika iegūti



**4.12 att. Transporta elementu T5, T6 un T8 plūsmu laika diagrammas**

modeļa elementiem, kas imitē vienus un tos pašus objektus salīdzināmos apstākļos. Tādi novērtējumi ir salīdzināmi savā starpā.

Eksperimenti ir izpildīti, imitējot vienu un to pašu objektu plūsmu, t.i., diskrēto vagonu plūsmu un mezoskopisko vagonu plūsmu. Modeļa darba gājiena sākuma periodā (līdz  $T = 2000$  min) tika iegūti salīdzināmu modeļa objektu raksturojumu novērtējumi.

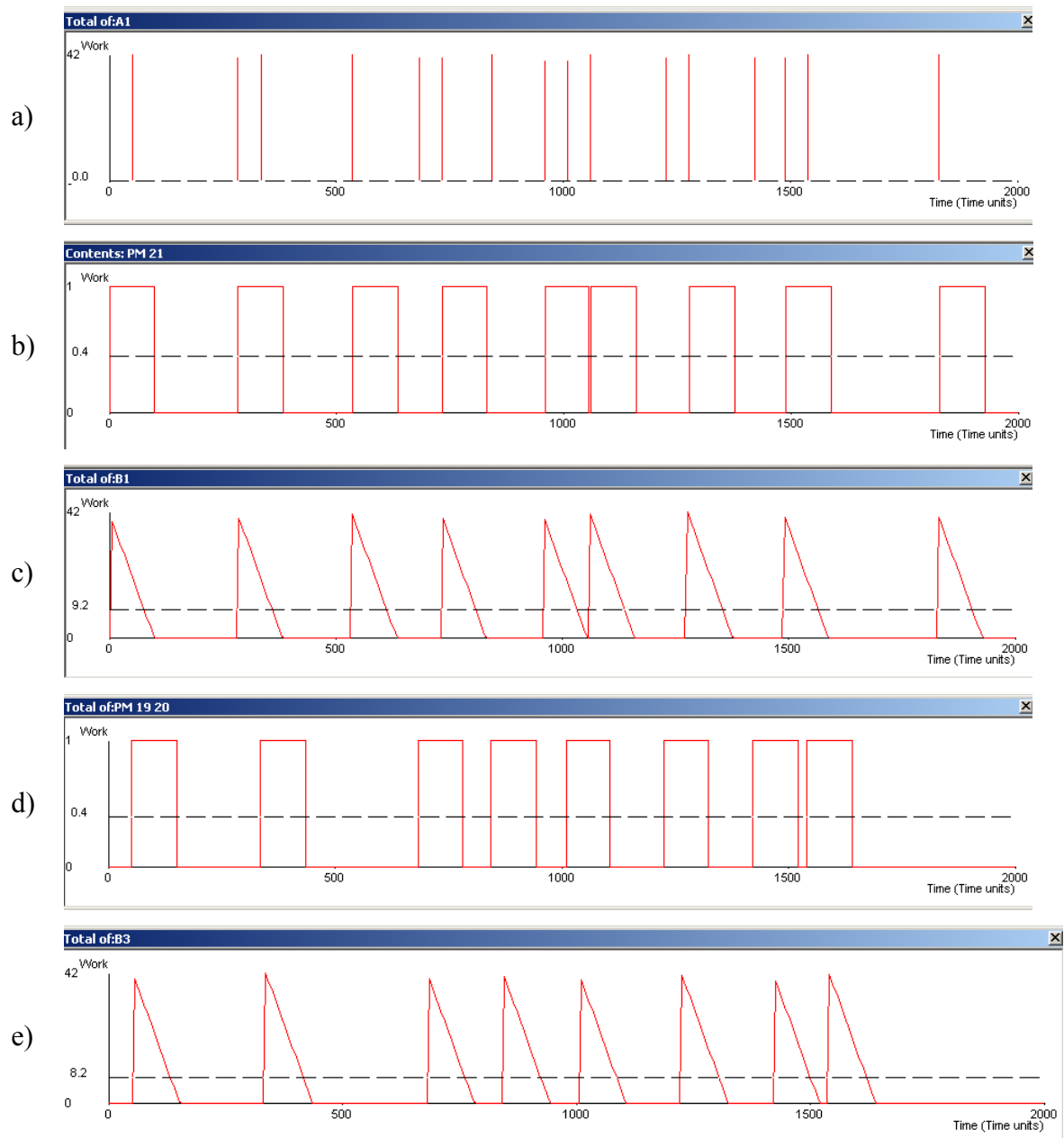
#### **4.5.4. Izstrādāto modeļu rezultātu salīdzināšana**

Uzskatāmu salīdzinājumu nodrošina laika diagrammas, kas attēlo modeļa objektu stāvokļa izmaiņas un kas ir aplūkojamas 4.13. att. 4.13. a) att. ir attēlota objektu plūsmas avota impulsa diagramma, kurā redzami ogļu vagonu sastāvu ierašanās laika momenti. Laika intervāli starp sastāviem tiek ģenerēti, izmantojot P7.1. att. attēlotu sadalījuma blīvuma funkciju  $g(t)$ . Impulsu augstumi ir vienādi ar vagonu sastāvu garumiem, kas arī ir gadījuma lielumi un tiek noteikti, izmantojot P7.4. att. attēlotu ogļu vagonu sastāvu plūsmas vagonu skaita empīrisku sadalījuma masas funkciju. Šis plūsmas avots nodrošina plūsmas porciju momentānu pārvešanu uz bunkuriem B1 vai B3, sk. 4.13. c) un e) att., kas kombinētajā modelī imitē sastāvu iekraušanas/izkraušanas pozīcijas, analogiskas 1. un 2. apstrādes pozīcijām DNS modelī. 1. un 2. pozīciju stāvokļa laika diagrammas var aplūkot 4.13. b) un d) att. Šajā attēlā

ir uzskatāmi aplūkojamas modeļu objektu funkcionēšanas principiālās atšķirības.

Skaitliskie raksturojumu novērtējumi ir apkopoti tabulā 4.3. Salīdzināšanai ir izvēlēti modeļa objektu raksturojumi, kas tiek izmantoti modelējamā objekta funkcionēšanas efektivitātes analīzei. Viens no svarīgākajiem funkcionēšanas raksturojumiem ir resursu noslodze. Šis raksturojums var tikt izmantots gan kombinētā modeļa validācijai, gan resursa funkcionēšanas efektivitātes novērtējumam. Apskatītajā modelī tiek novērtēta iekraušanas-izkraušanas pozīciju noslodze un ostas lokomotīvu noslodze.

4.3. tabulā attēlotie raksturojumu novērtējumi ir praktiski identiski. Ar \* ir apzīmēti divi kombinētā modeļa novērtējumi, kas atšķiras no diskrētu notikumu modeļa



4.13. att. Diskrētu notikumu un kombinētā modeļa objektu laika diagrammas

**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

novērtējumiem, kuri ir noapaļoti līdz veseliem skaitļiem. Ogļu vagonu sastāva terminālā pavadītā vidējā laika novērtējumi atšķiras par 0,17%, un atšķirības izskaidrojums ir atrodams kombinētās pieejas teorētiskajos pamatos (sk. nod. 3.2.).

#### 4.6. Kopsavilkums un secinājumi

Šajā nodaļā ir detalizēti aprakstīts kombinētās imitācijas modelēšanas pieejas lietojums materiālo plūsmu apstrādes sistēmu imitācijas modeļa izstrādei un iegūto rezultātu analīzei.

Sasniegtie rezultāti ir šādi:

- Kombinēto imitācijas modeļu galveno komponentu realizācija DNS modelēšanas pakotnē.
- Kombinētā materiālo plūsmu apstrādes sistēmas imitācijas modeļa izstrāde.
- Kombinētā modeļa rezultātu iegūšana.
- Izstrādātā modeļa rezultātu prezentācijas un interpretēšanas pieejas formulēšana.

Modeļa izstrāde, adekvātuma pārbaude un rezultātu analīze uzskatāmi demonstrē izstrādātās kombinētās imitācijas modelēšanas pieejas efektivitāti materiālo plūsmu sistēmu imitācijas modelēšanas jomā.

Galvenie secinājumi ir šādi:

- Kombinēto imitācijas modelēšanas pieeju ir iespējams pielietot materiālo plūsmu apstrādes sistēmu imitācijas modelēšanai, ko pierāda ogļu termināla modelēšanas rezultāti;
- Kombinētajā pieejā bāzēti imitācijas modeļi ir efektīvi pielietojami un ļauj veikt materiālo plūsmu apstrādes sistēmu imitāciju un raksturojumu uzticamu novērtēšanu;
- Neraugoties uz objektu plūsmas vienkāršotu imitāciju mezoskopiskās plūsmas veidā, ir iespējams iegūt raksturojumu novērtējumus, kas ir identiski diskreto notikumu modeļa novērtējumiem.

## GALVENIE REZULTĀTI UN SECINĀJUMI

Promocijas darbā ir izstrādāta kombinētā modelēšanas pieeja, kas ir paredzēta tādu materiālo plūsmu apstrādes sistēmu modelēšanai, kuras tiek formalizētas tā, ka diskreto 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. Pievejas ietvaros tiek lietota materiālo plūsmu vienkāršota formalizācija, kas veicina modeļa funkcionēšanas efektivitātes paaugstināšanos, samazinot ar notikumu apstrādi saistīto aprēķinu apjomu.

Pētījumā ir izstrādāts pieejas pilnīgs un korekts 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 diskreto notikumu laika skaitīšanas principu ar stāvokļa mainīgajiem, kurus raksturo gabaliem lineāras izmaiņas. Salīdzinājumā ar tradicionālo diskreto 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 pielietošanu 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.

## LITERATŪRAS SARAKSTS

1. Alkhaldi F. M., Olaimat J. M., Rashed A. A. The Role of Simulation in Business Process Reengineering// Simulation and Modeling: Current Technologies and Applications. - New York: IGI Publishing, 2008. - 359-390 pp.
2. Arena User's Guide. PUBLICATION ARENA-UM001D-EN-P. - Rockwell Software: Allen-Bradley, 2007. - 154 p.
3. Ballou R., Business Logistics/Supply Chain Management. 5th edition. - Prentice Hall, 2003. - 816 p.
4. 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.
5. Birta L. G., Arbez G. Modelling and Simulation. Exploring Dynamic System Behaviour. - London: Springer-Verlag, 2007. - 454 p.
6. Boccara N. Modeling Complex Systems. - New York: Springer-Verlag, 2004. - 397 p.
7. 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.
8. Bolch G., Greiner S. Queueing Networks and Markov Chains. Modeling and Performance Evaluation with Computer Science Applications. 2nd ed. - Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2006. - 878 p.
9. Burghout W. Hybrid microscopic-mesoscopic traffic simulation: Doctoral Dissertation. - Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology, 2004. - 185 p.
10. Burghout W. Mesoscopic Simulation Models for Short-Term Prediction. - Linköping: Linköping University, 2005. - 24 p.
11. Checkland P. Systems Thinking, Systems Practice. - Chichester: John Wiley & Sons, 1981. - 344 p.
12. Dambītis J. Modernā grafu teorija. - Rīga: Datorzinību centrs, 2002. - 155 lpp.
13. Dameron 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.
14. De Marco A., Rafele C., Simulating Regional Logistics: the North-Western Italy Case-Study// Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on System Science and Simulation in Engineering (ICOSSSE '07). Venice: 2007. - 274-279 pp.
15. Diestel R. Graph Theory. Fourth Edition. - Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. - 451 p.
16. Dym C.L. Basic Elements of Mathematical Modeling// Handbook of Dynamic System Modeling. Edited by Fishwick P. A. - Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2007. 5-1 - 5-20 pp.
17. Europe in figures. Eurostat yearbook European Union. - Luxembourg: Publication Office of European Union, 2010. - 664 p.
18. Fishwick P. A., editor. Handbook of Dynamic System Modeling. - Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2007. - 760 p.
19. Forrester J.W. Industrial Dynamics. - Cambridge: The M.I.T. Press, 1961. - 479 p.
20. Grundspenķis J., Tolujevs J. Sistēmu modelēšana. Lekciju konspekts. II. daļa. - Rīga: RPI, 1984. - 86 lpp.
21. Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice. Edited by Banks J. - New York: John Wiley & Sons, Inc., 1998. - 849 p.
22. Hangos K.M., Cameron I. Process Modelling and Model Analysis. - Harcourt Place: Academic Press, 2001. - 543 p.

23. Hansen A., Pachl J., eds. Railway Timetable & Traffic. Analysis, Modelling, Simulation. - Hamburg: Eurailpress, 2008. - 228 p.
24. Ieviņa I., Meļņikova J., Rozīte K. Dynamic Optimisation Model for the Long Term Labour Market Balancing in Latvia// Scientific Papers, University Of Latvia, Vol. 717, Management. - Rīga: Latvijas Universitāte, 2007. - 51 - 66 pp.
25. Imagine That Inc. ExtendSim User Guide. - San Jose: Imagine That Inc., 2007. - 780 p.
26. Ioannou P. A., Pitsillides A. (editors). Modeling and Control of Complex Systems. - Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2008. - 522 p.
27. Ioannou P., Wang Y., Chang H. Modeling, Simulation, and Control of Transportation Systems// Modeling and Control of Complex Systems. - Boca Raton: CRC Press, 2008. - 407-437 pp.
28. 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.
29. Karlsson, S. Man and materials flows – towards sustainable materials management. - Uppsala: Uppsala University, 1997. - 52p.
30. Kelton W.D., Sadowski R. P., Swets N.B. Simulation With Arena, 5 edition -McGraw-Hill, 2009. - 656 p.
31. Kouikoglou V.S., Phillis Y. A. Hybrid Simulation Models of Production Networks. - New York: Kluwer Academic, 2001. - 206 p.
32. Law A. M. Simulation Modeling and Analysis. - Boston: McGraw-Hill Higher Education, 4th ed., 2007. - 768 p.
33. Law A.M., Kelton W.D. Simulation Modelling and Analysis. Third edition. - Boston: McGraw Hill Higher Education, 2000, - 784 p.
34. [Letonika. Terminoloģijas portāls/ Internets. - Sk. 2011. 10. okt.: http://www.termnet.lv/DesktopDefault.aspx?tabindex=0&tabid=1](http://www.termnet.lv/DesktopDefault.aspx?tabindex=0&tabid=1)
35. Liljenström H., Svedin U. Micro meso Macro : Addressing Complex Systems Couplings. - River Edge: World Scientific Publishing Company, Inc., 2005. - 375 p.
36. [Massachusetts Institute of Technology. Intelligent Transportation Systems Program: Ben-Akiva M, Bierlaire M.,Koutsopoulos H., Mishalani R. DynaMIT: a simulation-based system for traffic 3rediction/ Internets. - Sk. 2011. gada 13. sept. - http://www.cyberax.eu/book/1187731/dynamit-a-simulation-based-system-for-traffic-prediction](http://www.cyberax.eu/book/1187731/dynamit-a-simulation-based-system-for-traffic-prediction)
37. Material flow systems in manufacturing. Edited by Tanchoco J.M.A. - Springer, 1994 - 420 p.
38. Meadows D., Meadows D., Randers J., Behrens W. The Limits to Growth. - New York: Universe Books, 1972. - 205 p.
39. Merkurjevs J., Merkurjeva G., Pečerska J., Tolujevs J. Sistēmu imitācijas modelēšanas tehnoloģija. - Rīga: RTU, 2008. - 120 lpp.
40. Merkurjevs, J., Pečerska, J., Tolujevs, J. Simulation-Based Analysis of Logistic Systems. Humanities and Social Sciences. Latvia. Institute of Economics, Latvian Academy of Sciences. - Volume 4(57), 2008, 27 - 48 p.
41. Merkuryev Y., Bardachenko V., Solomennikov A., Kamperman F. Simulation-based resource pooling at the Baltic Container Terminal// Proceedings of International Workshops on Harbour, Maritime and Multimodal Logistics Modelling and Simulation, and Applied Modelling and Simulation. HMS2004 & AMS2004. - Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004. - 16-24 pp.
42. Merkuryev Y., Lopatenok V. Simulation of urban transport systems// Riga Forum. Modern City. Conference materials. - Riga: Riga Managers School, 2002. - 60-65 pp.

43. Merkuryev Y., Pecherska J. Discrete-Event Simulation: Methodology and Spreadsheet-Based Implementation// Warszawa, Przegląd Elektrotechniczny. 4'2006. - 49.-55. lpp.
44. 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.
45. 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.
46. 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.
47. 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.
48. 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.
49. 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.
50. Moore J. H., Weatherford L. R. Decision Modeling with Microsoft Excel. - Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001. - 1018 p.
51. Mudriková A., Košťál P. Material Flow in Automated Manufacturing. Machine Design, 2010, 331-334 pp.
52. Muthu S., Whitman L., Cheraghi S.H. Business Process Reengineering: A Consolidated Methodology// Proceedings of the 4th Annual International Conference on Industrial Engineering Theory, Application and Practice. - San Antonio, 1999.
53. Nance R.E. A History of Discrete Event Simulation Programming Languages. - Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1993. - 53 p.
54. Parola F., Sciomachen A. Intermodal container flows in a port system network: Analysis of possible growths via simulation models// International Journal of Production Economics. - 2005, Vol. 97, Iss. 1. - 75–88 pp.
55. 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.
56. 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.
57. [Reggelin T. A Mesoscopic Approach to Modeling and Simulation and its Application for a Logistics Hub// COMEC. Santa Clara, 2008.](#)
58. Research and Practical Issues of Enterprise Information Systems IIVolume 2. Eds. Xu L., Tjoa A.M., Chaudhry S. - New York: Springer, 2008. - 808 p.
59. Reynolds, C.W. Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model// Computer Graphics. - 1987. - Nr. 21(4). - 25-34 pp.
60. Robinson S. Simulation. The Practice of Model Development and Use. - Chichester: John Wiley&Sons, 2004. - 316 p.

61. 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.
62. Saouma V., Sivaselvan M.V. (editors). Hybrid simulation : theory, implementation and applications. - London: Taylor & Francis Group, 2008. - 226 p.
63. 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.
64. 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.
65. 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.
66. Schenk M., Tolujew J., Reggelin T. Advanced Manufacturing and Sustainable Logistics. A Mesoscopic Approach to the Simulation of Logistics Systems// Proceedings of 8th International Heinz Nixdorf Symposium. - Paderborn: Springer Berlin Heidelberg, 2010. - 15-25. pp.
67. Schenk M., Tolujew J., Reggelin T. Comparison of Three Methods of Implementation of Mesoscopic Flow Models// Logistics and Supply Chain Management: Modern Trends in Germany and Russia. – Göttingen: Culliver Verlag, Ivanov D., Meinberg U. (eds.), 2009. - 36-44 pp.
68. Schenk M., Tolujew J., Reggelin T., "Mesoscopic Modeling and Simulation of Logistics Networks", Preprints of the 13th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, Moscow, Russia, June 3 - 5, 2009, pp. 586-591.
69. 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.
70. Schmidt M. Der Einsatz von Sankey-Diagrammen im Stoffstrommanagement// Beitrage der Hochschule Pforzheim. - 2006. - Nr. 124. / Internets. –[http://umwelt.hs-pforzheim.de/fileadmin/dokumente/2006/Nr\\_124-Der\\_Einsatz\\_von\\_Sankey-Diagrammen\\_im\\_Stoffstrommanagement.pdf](http://umwelt.hs-pforzheim.de/fileadmin/dokumente/2006/Nr_124-Der_Einsatz_von_Sankey-Diagrammen_im_Stoffstrommanagement.pdf).
71. Scholz-Reiter, B., Delhoum, S., Zschintzsch, M., Jagalski, T., Freitag M., Inventory Control in Shop Floors, Production Networks and Supply Chains Using System Dynamics. Wenzel, S. (ed.) 12. ASIM-Fachtagung. Erlangen: SCS Publishing House, 2006. – 273 - 282 pp.
72. Schriber T. J., Brunner D. T. Inside Discrete-Event Simulation Software: How It Works and Why It Matters// Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference. - Washington: eds. Smith J., Peters B., Ingalls R.G. et. al., 2004. - pp. 142-152.
73. 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.
74. Shoubo X. The concept and theory of material flow// Information Systems. Frontiers archive. 2008. Volume 10, Issue 5, November. - 601 - 609 pp.
75. SIMUL8, Manual and Simulation Guide. - Herndon: SIMUL8 Corporation, 2003. - 363 p.
76. Sokolowski J. A., Banks C, M. Principles of Modeling and Simulation : A Multidisciplinary Approach. - Hoboken: John Wiley & Sons, 2009. - 259 p.
77. Song B., Xu S. The Theory of Material Flow Substance// Systems Research and Behavioral Science. - 2009. - Nr.26. - 251-258 pp.

78. Swain J.J. Software Survey: Simulation – Back to the future. Institute for Operations Research and Management Sciences homepage/ Internets. - Sk. 2011. 21. nov.:<http://www.informs.org/ORMS-Today/Public-Articles/October-Volume-38-Number-5/Software-Survey-Simulation-Back-to-the-future>
79. Swain J.J. To Boldly Go... Discrete Event Simulation Software Tools// OR/MS Today. -2009. - Vol. 35, No. 5. - pp. 50-61.
80. The Site about Railways of Russia, C.I.S., and the Baltics.[http://www.parovoz.com/gallery/LV/20071208\\_110863.jpg](http://www.parovoz.com/gallery/LV/20071208_110863.jpg)
81. 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.
82. 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.
83. Wagner F., Schmuki R., Wagner Th., Wolstenholme P. Modeling Software with Finite State Machines. A Practical Approach. - Boca Raton: Auerbach Publications, 2006. - 362 p.
84. Wainer G. A. Discrete-Event Modeling and Simulation. A Practitioner’s Approach. - Boca Raton: CRC Press, 2009. - 483 p.
85. 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.
86. Yatskiv I., Yurshevich E., Pticina I., Analysis of Mobility and Reliability Measures on the Particular Transport Node at the Stage of Its Reconstruction// Proceedings of International Conference “Modelling of Business, Industrial and Transport Systems” (MBITS’08). - Rīga: Transporta un sakaru institūts, 2008. - 52-158 pp.
87. Zeigler B. P. Multifaceted Modelling and Discrete Event Simulation. - London: Academic Press, 1984. - 372 p.
88. Zeigler B. P. Theory of Modelling and Simulation. - Malabar: Krieger Pub Co, 1984. - 435 p.
89. 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.
90. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. - Москва: Наука, 1968. -356 с.
91. Бусленко Н.П.,Юркевич О.М. Об операциях над агрегатами в сложных системах// Техническая кибернетика. - 1964. - Nr.2.
92. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. - Москва: Academia, 2003. - 383-388 стр.
93. [Ельдештейн Ю.М. \(2006\). Логистика: электронный учебно-методический комплекс. Сайт Красноярского государственного аграрного университета. Sk. 2011. 29. jūn.: http://www.kgau.ru/distance/fub\\_03/eldeshtein/logistika/index.html](http://www.kgau.ru/distance/fub_03/eldeshtein/logistika/index.html)
94. Имитационное моделирование экономических процессов. Сост. Лычкина Н.Н. - Москва: Академия АйТи, 2005, - 164 с.
95. Кобелев Н.Б. Основы имитационного моделирования сложных экономических систем. - Москва: Дело, 2003. - 336 с.
96. Корпоративная логистика. 300 ответов на вопросы профессионалов. Под редакцией проф. В.И. Сергеева. - Москва: ИНФРА-М, 2005. - 976 с.
97. Логистика. Учебное пособие. Под ред. Б.А. Аникина. - Москва: ИНФРА-М, 2000. - 356 с.
98. Лопатников Л. И. Экономико-математический словарь: Словарь современной

- экономической науки. 5-е изд., перераб. и доп. - Москва: Дело, 2003. - 520 с.
99. Лупал А. М. Теория автоматов. - Санкт-Петербург: СПбГУАП, 2000. - 119 с.
  100. Маркс К. Капитал. Критика политической экономии. Том 1, книга 1: процесс производства капитала. - Москва: Политиздат, 1983. - 592 с.
  101. Матвеева Т.Ю. Введение в макроэкономику. 5-е изд. - Москва: Изд. дом ГУ ВШЭ, 2007. - 511 с.
  102. Москинова Г.И. Дискретная математика. - Москва: Логос, 2000. - 238 с.
  103. Райзберг Б. А., Лозовский Л. Ш., Стародубцева Е. Б. Современный экономический словарь. 5-е изд., перераб. и доп. - Москва: ИНФРА-М, 2007. - 495 с.
  104. Сербин В.Д. Основы логистики: Учебное пособие. - Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. - 38 с.
  105. Толуев Ю.И. Имитационное моделирование логистических сетей // Логистика и управление сетями поставок. - 2008. - № 2/25. - 53-63 с.
  106. Толуев Ю.И., Некрасов А.Г., Морозов С.И. Анализ и моделирование материальных потоков в сетях поставок // Интегрированная логистика. - 2005, №5. - 7-14 с.
  107. Швецов В.И. Математическое моделирование транспортных потоков// Автоматика и телемеханика. - 2003. - № 11. - 3-46 с.

## **PIELIKUMI**

## Komponente „iekārta” diskrētu notikumu sistēmu modelēšanā

Apskatīsim diskrētu notikumu sistēmu (DNS) modeļa vienkāršotu komponenti – iekārta, kas realizē apstrādes procesa matemātisku modelēšanu, kā arī iekārtas funkcionēšanas īpašības, modelēšanas rezultātus un to interpretāciju.

Vispārīgā gadījumā iekārta vienlaicīgi apstrādā vienu kustīgu objektu. Iekārtas stāvokli var aprakstīt ar mainīgo  $z$ , kas norāda uz iekārtas „tekošo”, pašreizējo stāvokli, piemēram, 0 – brīva iekārta, kas gaida apstrādes objektus, 1 – iekārta pašlaik izpilda apstrādi. Iekārtas stāvokļa mainīgais  $z$  maina savu vērtību divu notikumu rezultātā: apstrādes objekta ierašanās notikuma rezultātā  $z = 1$ , apstrādes nobeiguma notikuma rezultātā  $z = 0$ . Gadījumā, kad vienlaicīgi ar apstrādes nobeiguma notikumu ir ieplānots ierašanās notikums, stāvokļa mainīgais momentāni mainās un  $z = 1$ . Pieņemsim, ka komponentes funkcionēšanas laiks  $t \in [0, T]$ . Jābūt zināmai sākotnējai vērtībai  $z_0$ , tad modeļa darba gaitā tiek iegūta stāvokļa  $z(t)$  trajektorija. DNS modeļos iekārtas stāvoklis mainās iepriekš nenoteiktos laika momentos, kas tiek iegūti, fiksējot objektu ierašanās laika momentus iekārtā un izmantojot apstrādes laika sadalījuma funkciju apstrādes ilguma noteikšanai. Starp notikumu laika momentiem iekārtas stāvokļa funkcija  $z(t)$  ir nemainīga. Stāvoklis mainās tā notikuma rezultātā, kas pieder iespējamo notikumu galīgai kopai  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_i, \dots, e_{i_{\max}}\}, i = \overline{1, i_{\max}}$ ;  $i_{\max}$  ir maksimālais iekārtai plānotā notikuma numurs modeļa darba gājiena laikā. Jebkurā stāvoklī kopas  $E$  notikumi sacenšas par iespēju izraisīt nākamo stāvokļa pāreju. Katram notikumam ir atbilstošais plānotais notikuma laiks.

Pieņemsim, ka  $t_k$  ir  $k$ -tās pārejas laika moments,  $e_k$  ir  $k$ -tais notikums,  $e_k \in E$ , un  $z(t_k)$  ir atbilstošais iekārtas stāvoklis.  $T_{k,e}$  ir notikuma laika moments  $e \in E$ , kas izraisa stāvokļa  $k$ -to pāreju. Nākamā laika momenta un notikuma noteikšana

$$t_{k+1} = \min\{T_{k,e}: e \in E\},$$

$$e_{k+1} = \{e \in E \mid T_{k,e} = \min\}.$$

Notikumu plānošanu nodrošina plānošanas vienādojumu kopa

$$T_{k,e} = G_e(T_{k-1,e}, e_k, t_k).$$

Stāvokļa pārejas nodrošina pārejas funkciju kopa

$$z(t_{k+1}) = H[z(t_k), e_{k+1}].$$

Tradicionāli diskrētu notikumu modeļu komponentes darbību apraksta ar algoritmu [31]:

- a) inicializācija:  $t=0$ ,  $e = \emptyset$  [nulle notikums],  $T = [0, 0, \dots, 0]$  – nulles vektors,  $z = z_0$ ;

tiek plānoti nākamie notikumi:  $T = G([0, 0, \dots, 0], \emptyset, t_0)$ ;

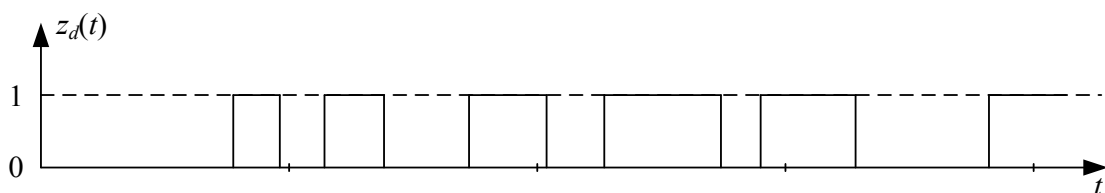
- b) tuvākā notikuma noteikšana:  $t = \min\{T_j, j \in E\}$ ,  $e = \{j \in E \mid \min T_j\}$ ;
- c) nobeiguma nosacījuma pārbaude: ja  $t > t_{\max}$ , pabeigt algoritma izpildi;
- d) notikuma  $e$  izpilde: stāvokļa izmaiņa  $z = H(z, e)$ ; nākamo notikumu plānošana,  $T = G(T, e, t)$ ; atgriešanās b) punktā.

No algoritma ir skaidrs, ka DNS modelēšanas pieejas ietvaros ir jāizpilda notikumu daudzumam vai stāvokļa pāreju daudzumam atbilstošais aprēķinu apjoms.

DNS modelēšanas pieejas ietvaros modelēšanas dati ietver sevī dažādus raksturojumu veidus, kas ir gan no laika atkarīgie, gan no laika neatkarīgie raksturojumi. Piemēram, par vienkāršotu komponenti – diskreto iekārtu – modeļa darba gājiena laikā tiek savākti un apkopoti dati. Modelēšanas rezultātu pārskatā šie dati tradicionāli ir attēloti noslodzes koeficienta veidā. Noslodzes koeficients ir no laika atkarīgs raksturojums. Noslodzes koeficienta vidējā vērtība ir iekārtas noslodzes laika funkcijas vidējā svērtā vērtība, ko apkopo par modeļa darba gājiena laiku. Vienkāršākais iekārtas funkcionēšanas raksturojums – apstrādāto objektu skaits.

Pieņemsim, ka modeļa darba gājienā ir iegūta iekārtas stāvokļa diagramma  $z_d(t)$ , kas redzama P1.1. attēlā.

Iepriekš nenoteiktos laika momentos  $t_i$  ( $t_i \in [0, t_{i\max}]$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, i_{\max}$ ) iekārtas stāvokļa funkcija  $z_d(t)$  mainās lēcienveidīgi.  $i_{\max}$  ir maksimālais notikumu skaits modeļa darba gājiena laikā,  $t_{i\max}$  ir pēdējā notikuma ar numuru  $i_{\max}$  laiks. Modeļa darba gājiena nobeiguma laiks ir modelēšanas nobeiguma notikuma laiks. Tā kā vienkāršotai iekārtai ir tikai divi iespējamie stāvokļi  $z = 0$  vai  $1$  – t.i., iekārta var būt brīva vai var izpildīt apstrādes operāciju,  $z_d(t)$  laika funkcija ir vienkārša. Laika intervālu un stāvokļu funkcijas P1.1. tabulā atspoguļo iekārtas stāvokļa izmaiņas. P1.1. tabulā  $z_d(\Delta t_i) = z_d(t_{i-1} + 0) = z_d(t_i) = \text{const}$  ir stāvokļa funkcijas vērtība laika intervālā  $\Delta t_i = [t_{i-1} + 0; t_i]$ . Vispārīgā gadījumā laika intervāli starp notikumu iestāšanos momentiem var būt arī nulles (tas atbilst nosacījumam, ka asinhronajā modelī pirms iekārtas atrodas buferis).



**P1.1. att. Vienkāršotas diskretas iekārtas stāvokļa laika diagrammas piemērs**

**Vienkāršotas diskrētas iekārtas stāvokļa funkcijas vērtības modeļa darba gājiena laikā**

Notikuma kārtējais numurs $i$	Notikuma laiks $t_i$	Laika intervāls no iepriekšējā, $i-1$ , notikuma $\Delta t_i$	Stāvokļa funkcija $z_d(t_i)$ un $z_d(\Delta t_i)$
0	$t_0$	$\Delta t_0 = 0$	0
1	$t_1$	$\Delta t_1 = t_1 - t_0$	1
2	$t_2$	$\Delta t_2 = t_2 - t_1$	0
3	$t_3$	$\Delta t_3 = t_3 - t_2$	1
...	...	...	...
$i_{\max}$	$t_{i_{\max}}$	$\Delta t_{i_{\max}} = t_{i_{\max}} - t_{i_{\max}-1}$	0, ja $i_{\max}$ – pāra skaitlis, 1, ja $i_{\max}$ – nepāra skaitlis
$i_{\max+1}$	$T$	$\Delta T = T - t_{i_{\max}}$	0, ja $i_{\max}$ – nepāra skaitlis, 1, ja $i_{\max}$ – pāra skaitlis

Iekārtas kumulatīvā caurlaidspēja modeļa darba gājiena laikā tiek aprēķināta pēc formulas

$$N_d = \sum_{i=0}^{i_{\max+1}} z_d(t_i) = (i_{\max+1}) \text{div} 2, \quad (\text{P1.1})$$

iekārtas noslodze modeļa darba gājiena laikā

$$U_d = \frac{\sum_{i=0}^{i_{\max+1}} z(\Delta t_i) \cdot \Delta t_i}{\sum_{i=0}^{i_{\max+1}} \Delta t_i} = \frac{\sum_{i=2k}^{[i_{\max} \text{div} 2] \cdot 2} \Delta t_i}{T}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, ([i_{\max} \text{div} 2] \cdot 2), \quad (\text{P1.2})$$

kur  $\text{div} 2$  – dalīšanas ar 2 bez atlikuma operācija.

DNS modelēšanā iekārtai var būt aprēķināti arī citi raksturojumi – piemēram, minimālais, maksimālais un vidējais kustīgu objektu skaits iekārtā.

### Sarežģītu dinamisku sistēmu aprakstīšana uz agregātu bāzes

Agregāts ir sarežģītas sistēmas formalizācijas shēma, kas ir sistēmas funkcionēšanas abstrakcija matemātiskā modeļa veidā [20, 90].

Jebkurā laika momentā  $t \in (0, T)$ , kur  $T$  ir interesējoša laika intervāla nobeiguma laiks (bieži lieto terminu „modelēšanas laiks”), agregāts atrodas vienā no iespējamiem stāvokļiem  $z(t)$ . Iespējamie stāvokļi  $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_n\}$ . Katrs stāvoklis laika intervālā  $(0, T)$  tiek novērots kā laika funkcija  $z_i(t), i = \overline{1, n}$ . Vispārīgā gadījumā šīs laika funkcijas ir gadījuma funkciju  $Z_i(t)$  realizācijas.

Pieņemsim, ka funkcijas  $z_i(t)$  vai to varbūtiskie raksturojumi var būt atkarīgi no vairākiem agregāta parametriem  $\beta_m, m = \overline{1, m^*}$ . Sākotnējā laika momentā  $t_0 = 0$  stāvokļi  $z_i(t) = z_i^0$ , un tie nosaka agregāta sākuma stāvokļa sadalījuma likumu  $L[Z_i(t_0)]$ , kas tiek iegūts no vispārīgā  $L[Z_i(t)]$  pie  $t = t_0$ .

Agregāta stāvokli  $z(t)$  jebkurā patvaļīgā laika momentā  $t > t_0$  nosaka gadījuma operators, kas realizē funkcijas

$$z(t) = H[z(t_0, t)].$$

Tās nozīmē, ka konkrētām  $z(t_0)$  atbilst vairākas  $z(t)$  un konkrētā  $z(t)$  realizācija ir atkarīga no operatora  $H$  veida.

Agregātam ir tā saucamie ieejas poli jeb ieejas, kas var uztvert apkārtējās vides iedarbes – ieejas signālus. Ieejas signāli  $x$ , kas pieder ieejas signālu kopai  $X$ , tiek uztverti laika momentos  $t_j, j = 1, 2, \dots; t_j \geq t_{j+1}$ .

Vispārīgā gadījumā secība  $(t_j, x_j)$  ir kādu gadījuma secību realizācija, kas pakļaujas sadalījuma likumam  $L[\theta, X]$ .

Agregātam ir īpašs ieejas pols vadības signālam  $g \in \Gamma$ . Vadības signāli tiek uztverti laika momentos  $\tau_i, i = 1, 2, \dots; \tau_i \geq \tau_{i+1}$ . Vadības signāls var būt uzskatīts kā ieejas signāla īpašs gadījums, un uz signālu attiecas iepriekš minētais sakarā ar ieejas signāliem.

Galīgā laika intervālā tiek uztverts galīgs ieejas un vadības signālu skaits.

Uz agregāta izejas veidojas izejas signāli. Izejas signāls  $y \in Y$  tiek noteikts no agregāta stāvokļa ar operatoru  $G$ . Galīgā laika intervālā uz agregāta izejas veidojas galīgs izejas signālu

skaits.

Operatoru  $H$  parasti sauc par pāreju operatoru, bet operatoru  $G$  – par izeju operatoru.

Agregāta funkcionēšanas laikā ir nepieciešams atšķirt stāvokļus  $z(t)$  un  $z(t+0)$ . Pieņemsim, ka jebkuram  $t_1 > t$  moments  $t+0$  pieder intervālam  $(t, t_1]$ . Agregāta stāvokli  $z(t)$  jebkurā patvaļīgā laika momentā nosaka operators  $H$ . Operatora  $H$  veids ir atkarīgs no tā, vai apskatāmā laika intervālā ir iekļauti agregātā īpašo stāvokļu laika momenti. Īpašo stāvokļu laika momenti ir agregāta stāvokļu laika momenti ieejas, vadības signāla uztveršanas vai izejas signāla veidošanas momentos. Pārējos agregāta stāvokļus sauc par ne īpašiem agregāta stāvokļiem. No īpašiem stāvokļiem agregāts var lēcienveidīgi pāriet jaunā stāvoklī.

Sīkāk agregātu teorijas jēdzienus un lietojuma aspektus var apskatīt, piemēram [90], vai citos darbos.

Tātad agregāts  $A$  ir struktūra

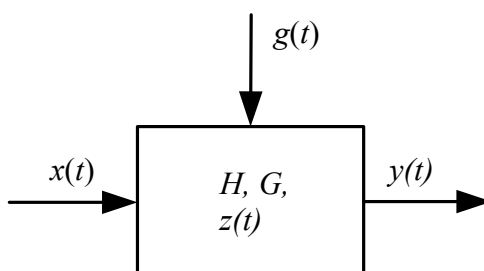
$$A = \langle X, \Gamma, Z, Y, H, G, t \rangle. \quad (\text{P2.1})$$

Autori, kas izmanto agregātus kā sarežģītu sistēmu formalizācijas shēmu, bieži lieto agregāta grafisku attēlošanu [90], piemēram, tādu, kas aplūkojama P2.1.att.

Agregāts pats par sevi var kalpot par sarežģītu sistēmu elementu formālās aprakstīšanas shēmu. Taču eksistē sarežģītas sistēmas, kas var būt sadalītas tādos elementos, kas var būt apskatīti kā atsevišķi agregāti. Tad sistēma kopumā ir konstrukcija no agregātiem vai agregātu sistēma. Atsevišķam agregātam ne obligāti piemīt visas agregāta īpašības, piemēram, agregātam var nebūt vadības signāla ieejas. Starp sistēmas elementiem nevar būt objektu, kas ir sarežģītāki par agregātu. Tādas sistēmas īpašības tiek noteiktas ar tās struktūru un elementiem-agregātiem. Atsevišķu agregātu, apvienojums arī ir agregāts [91].

Var piezīmēt, ka sistēmu attēlošana agregātu veidā nav viennozīmīga, tas ir saistīts ar stāvokļa mainīgo izvēli, kas var būt atšķirīga dažādos pētījumos [90,91].

Sarežģītu sistēmu formalizācija uz agregātu bāzes ir universāla un attiecas no vienas puses uz sistēmas attēlošanu „melns kastes” veidā, bet no otras puses uz trajektoriju, kā reakciju uz gadījuma iedarbēm, attēlošanu  $n$ -dimensiju telpā. Pieejas ietvaros tieši vai netieši



**P2.1. att. Agregāta shematiskais attēls**

tiek pieņemts, ka ir iespējams analītiski aprakstīt un „atrisināt” sistēmu, apskatot sarežģītu sistēmu kā stohastisku un ievērojot dažus vienkāršojumus un pieņēmumus.

### **DEVS formālisms un gabaliem lineārā agregāta shēma**

Pielikumā tiek pārbaudīts, vai ir iespējams diskrešu notikumu sistēmu modeļos izmantot kombinētas komponentes, proti – avotus, bunkurus, transporta elementus un notekas.

Diskrešu notikumu sistēmu modeļu komponentes klasiskajā variantā [87, 88] tiek aprakstītas, lietojot atomāru (*atomic*) *DEVS*. Veidojot modeļus, komponentes apvieno hierarhiskos modeļos, kas savukārt var būt aprakstīti kā saistītas (*coupled*) *DEVS* modeļi [88]. Kombinēto modeļu komponentēm, kuras ir bāzētas diskrētos notikumos, jābūt atomāriem *DEVS* modeļiem. Tādā gadījumā diskrešu notikumu sistēmu modelēšanas paradigmā, kuras teorētiskais pamatojums ir *DEVS*, šie modeļi var būt atzīti par korekti strādājošām komponentēm. Darbā ir pierādīts, ka iepriekšminētās komponentes var tikt aprakstītas kā gabaliem lineārie agregāti.

Apskatīsim gabaliem lineāra agregāta matemātisku struktūru un pārbaudīsim to saderību ar *DEVS* formālismu.

Gabaliem lineārais agregāts (GLA) vispārīgā gadījumā ir struktūra

$$A = \langle X, \Gamma, Z, Y, H, G, t \rangle, \quad (\text{P3.1})$$

- kur  $X$  – ieejas signālu kopa,  
 $\Gamma$  – vadības signālu kopa,  
 $Z$  – stāvokļu kopa,  
 $Y$  – izejas signālu kopa,  
 $H$  – pāreju operators,  
 $G$  – izeju operators,  
 $t$  – laiks (pozitīvais reālais skaitlis).

Atomārais *DEVS* ir struktūra

$$M = \langle X, S, Y, \delta_{int}, \delta_{ext}, \lambda, ta \rangle, \quad (\text{P3.2})$$

- kur  $X$  – ieejas vērtību kopa,  
 $S$  – stāvokļu vērtību kopa,  
 $Y$  – ir izejas vērtību kopa,  
 $\delta_{int}: S \rightarrow S$  – ir iekšējā pārejas funkcija, kas nosaka sistēmas stāvokļa izmaiņas, kas atkarīgas no iekšējiem notikumiem, pēc laika  $ta$ ,  
 $\delta_{ext}: Q \times X \rightarrow S$  – ārējā pārejas funkcija,

kur  $Q = \{(s, e) | s \in S, 0 \leq e \leq ta(s)\}$  – pilna stāvokļu kopa,  
 $e$  – laiks pēc pēdējās pārejas,  
 $\lambda (\lambda : S \rightarrow Y)$  – izejas funkcija,  
 $ta : S$  – pozitīvie reālie skaitļi,  $[0, +\infty)$ .

Pirms struktūru salīdzināšanas savā starpā nepieciešams tās pārveidot tādā formā, kurā kopas, funkcijas un attiecības būtu izteiktas salīdzināmā veidā. Eksistē ar *DEVS* un *GLA* terminu izcelsmi un sākotnēju pielietošanas sfēru saistītas terminoloģijas atšķirības, taču vairākiem terminiem var noteikt atbilstību. Piemēram, termins *signāls*, kas tradicionāli tiek lietots agregātu teorijā, var būt aizstāts ar vārdiem „ievadsignāls” vai „ievaddati” [34]. Agregātu teorijā tiek izmantots arī termins *operators*, kas tiek interpretēts kā funkcijas paplašinājums [92]. Divu algebrisku struktūru salīdzināšana ir iespējama, ja tām ir izomorfas pamatkopas un ir vienāds signatūru operāciju skaits [102].

*DEVS* formālisms ļauj aprakstīt jebkuru sistēmu, kuras ieeju un izeju izmaiņas iespējams definēt kā secīgu notikumu vērtību virknes pie nosacījuma, ka sistēmas stāvokļu izmaiņu skaits ir galīgs jebkurā galīgā laika intervālā [89].

*DEVS* formālismā ir iekļautas divas notikumu vērtību kopas –  $X$  un  $Y$  – ieejas un izejas kopas. Šinī gadījumā tās ir notikumu vērtību virknes.

Gabaliem lineārā agregātā ir iekļautas trīs signālu kopas –  $X$ ,  $\Gamma$  un  $Y$  – ieejas, vadības un izejas signālu kopas, kas ir gabaliem lineāras laika funkcijas. Tādējādi ir iespējams interpretēt vadības signālu kā īpašu ieejas signāla veidu un apvienot kopas  $X$  un  $\Gamma$  [90]:

$$X' = X \cup \Gamma. \quad (P3.3)$$

Vadības signāls  $\Gamma$  nosaka agregāta pārejas operatora  $H$  un izejas operatora  $G$  veidus. Tad vispārīgā gadījumā signālu kopu  $X$  un  $\Gamma$  apvienošanas rezultātā operatori  $H$  un  $G$  var mainīties.

Signālu kopas  $X'$  un  $Y$  var būt interpretētas kā vērtību un stāvokļu funkciju kopas

$$\begin{aligned} X' &= \{X'', Z'\}, \\ Y &= \{Y', Z''\}. \end{aligned} \quad (P3.4)$$

Pārrakstot gabaliem lineāra agregāta izteiksmi, ņemot vērā (P3.5), tiek iegūts

$$\begin{aligned} A &= \langle \{X'', Z'\}, Z, \{Y', Z''\}, H, G, t \rangle = \langle X'', Z', Z, Y', Z'', H, G, t \rangle = \\ &= \langle X'', Y', Z', Z, Z'', H, G, t \rangle = \langle X'', Y', Z'', H, G, t \rangle, \end{aligned} \quad (P3.5)$$

kur  $Z''$  ir jauna stāvokļu kopa, kas iekļauj sevī sākotnējo stāvokļu kopu  $Z$  un stāvokļu kopas  $Z'$  un  $Z''$ .

*DEVS* formālismā iekļautās funkcijas  $\delta_{ext}$  un  $\lambda$  realizē stāvokļa izmaiņas, kas atkarīgas no ieejas vērtībām  $X$ , kā arī stāvokļa  $S$  un izejas  $Y$  vērtību izmaiņas, kas savukārt ir atkarīgas no stāvokļa  $S$  (P3.2).

GLA operators  $H$  realizē no ieejas signāla  $X$  un stāvokļa  $Z$  atkarīgas stāvokļa izmaiņas un izejas signāla  $Y$  izmaiņas, kas ir atkarīgas no stāvokļa  $Z$  [90].

*DEVS* formālismā teorijas izstrādātāja Zeiglera atšifrējumā ārējās pārejas funkcijas pielietojuma rezultāts ieejas iedarbes uztveršanas laika momentā – jaunā stāvokļa vērtība ir atkarīga ne tikai no ieejas vērtības, bet arī no iepriekšējās stāvokļa vērtības un laika posma pēc iepriekšējās stāvokļa izmaiņas [89]. Piemēram, ja laika momentā  $t_1$  *DEVS* modeļa stāvoklis ir  $s_1$  un jaunā ieejas iedarbe tiek konstatēta laika momentā  $t_1 + \varepsilon < ta(s_1)$  un tās vērtība ir  $x_1$ , tad jaunā stāvokļa vērtība tiek aprēķināta kā

$$s_2 = \delta_{ext}(s_1, \varepsilon, x_1). \quad (P3.6)$$

Attiecīgi, ja laika momentā  $t_1$  GLA stāvoklis ir  $z(t_1)$  un laika momentā  $t_1 + \varepsilon < t^*$  ( $t^*$  – nākamā īpaša stāvokļa laika moments), GLA ieejā tiek uztverts ieejas signāls  $x_1$ . Tad GLA stāvoklis ir

$$z(t_1 + \varepsilon + 0) = H'[z(t_1 + \varepsilon), x_1, g_s] = H''[z(t_1), x_1, \varepsilon], \quad (P3.7)$$

kur  $H'$  – pārejas operatora  $H$  veids ieejas signāla uztveršanas laika momentā, kas atkarīgs no iepriekšējās vadības iedarbes  $g_s$ , un  $H'|_{g_s, \varepsilon} \rightarrow H''$  [90].

Salīdzinot (P3.6) un (P3.7) funkciju vispārīgās izteiksmes, iespējams konstatēt, ka gan *DEVS* atomārā modeļa, gan *GLA* stāvokļa izmaiņas ieejas signāla uztveršanas laika momentā tiek definētas kā funkcijas no iepriekšējā stāvokļa, ieejas vērtības un laika posma starp iepriekšējo notikumu un ieejas vērtības uztveršanas laika momentu.

Var spriest arī tā: jebkuras atomārā *DEVS* modeļa stāvokļa izmaiņas tiek realizētas ar funkcijām  $\delta_{int}$  un  $\delta_{ext}$ . Savukārt jebkuras GLA stāvokļa izmaiņas tiek realizētas ar pārejas operatoru  $H$ , kas šajā shēmā izpilda *DEVS* modeļa funkcijām  $\delta_{int}$  un  $\delta_{ext}$  atbilstošas funkcijas.

Funkcija  $\lambda$  realizē atomārā *DEVS* modeļa stāvokļa izmaiņas laika momentos, kuros veidojas izejas vērtības. Analogi darbojas GLA operators  $G$ .

Abu struktūru pēdējais elements (t.i.  $t$  – GLA un  $ta$  – *DEVS* modelī) apzīmē laiku un tiek noteikts reālu skaitļu apgabalā.  $T$  – agregāta funkcionēšanas laika nobeiguma apzīmējums  $t \in (0, T)$ ,  $ta$  – *DEVS* modeļa atrašanās laiks stāvoklī  $s$

$$t = \sum_0^{i-1} ta(s_{i-1}) + e_i, \quad (\text{P3.8})$$

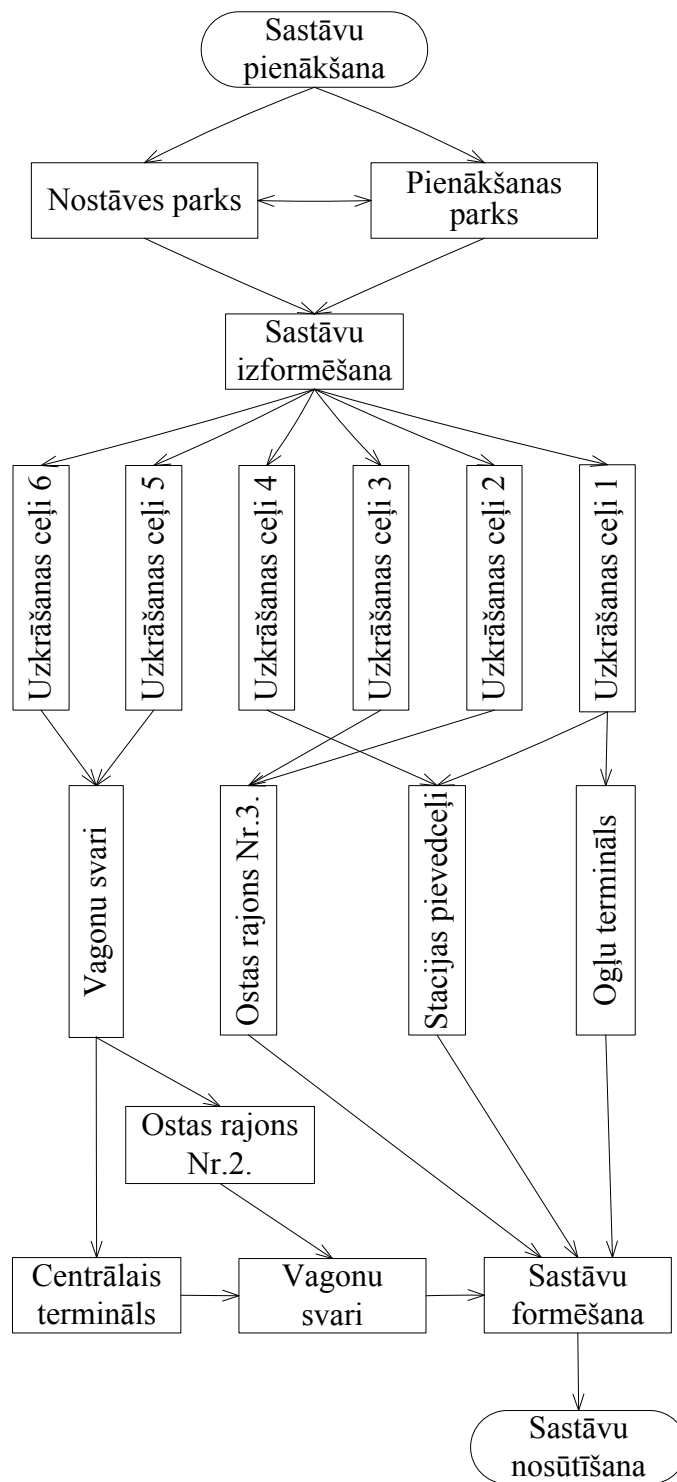
kur  $i$  – kārtējas stāvokļa izmaiņas numurs un  $e_i$  – laiks pēc pēdējās stāvokļa izmaiņas. Var konstatēt, ka (P3.8)  $t \in (0, T)$ , ja ar  $T$  apzīmēt *DEVS* modeļa funkcionēšanas laiku.

Tātad ir iespējams konstatēt divu struktūru

$$\begin{aligned} M &= \langle X, S, Y, \{\delta_{\text{int}}, \delta_{\text{ext}}\}, \lambda, ta \rangle, \\ A &= \langle X'', Y', Z''', H, G, t \rangle \end{aligned} \quad (\text{P3.9})$$

savstarpēju atbilstību, kas nosaka principiālu iespējamību pierādīt šo struktūru homo- vai izomorfismu pie konkrētiem funkciju  $(\delta_{\text{int}}, \delta_{\text{ext}}), \lambda$  un operatoru  $H, G$  veidiem un kombinētu diskrētu notikumu modeļu komponentu savienojamību ar *DEVS* bāzētām diskrētu notikumu modeļu komponentēm.

### Modelējamā dzelzceļa mezgla struktūra



P4.1. att. Modelējamā dzelzceļa mezgla struktūras vienkāršots attēlojums

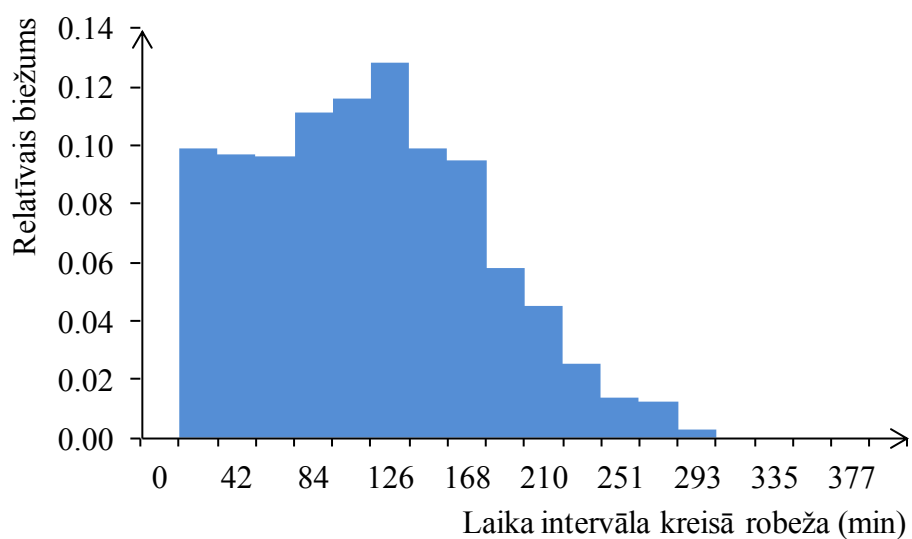
### **Pieostas dzelzceļa mezgla imitācijas modeļa galvenie parametri, struktūra un funkcionēšanas īpašības**

Pieostas dzelzceļa mezgla pienākšanas parkā gadījuma laika momentos pienāk divu tipu sastāvi: piekrauti (88%) un ar tukšiem vagoniem (12%). Laika intervāls starp sastāvu ierašanās laika momentiem ir gadījuma lielums, kura sadalījuma likums ir aplūkojams P5.1. tabulā un histogramma – P5.1. attēlā. Standarta sastāvā ir 57 dažāda tipa vagoni: pusvagoni, fītingu platformas, fītingu platformas refkonteineriem, segtie vagoni, graudu vedēji. Vagonu tipa sadalījums sastāvā atbilst pieostas stacijas kravu nomenklatūrai un tiek aprakstīts ar diskrētām empīriskām sadalījuma funkcijām (tabulās P5.2. tukšiem un P5.3 piekrautiem sastāviem).

P5.1. tabula

#### **Laika intervāla starp sastāviem empīriskā sadalījuma blīvuma funkcija**

Laika intervāla kreisā robeža (min)	Relatīvais biežums
0	0,000
21	0,099
42	0,097
63	0,096
84	0,111
105	0,116
126	0,128
147	0,099
168	0,095
189	0,058
210	0,045
230	0,025
251	0,014
272	0,012
293	0,003
314	0,000
398	0,000



**P5.1. att. Laika intervāla empīriskā sadalījuma histogramma**

P5.2. tabula

**Vagonu tipa empīriskais sadalījums sastāviem ar piekrautiem vagoniem**

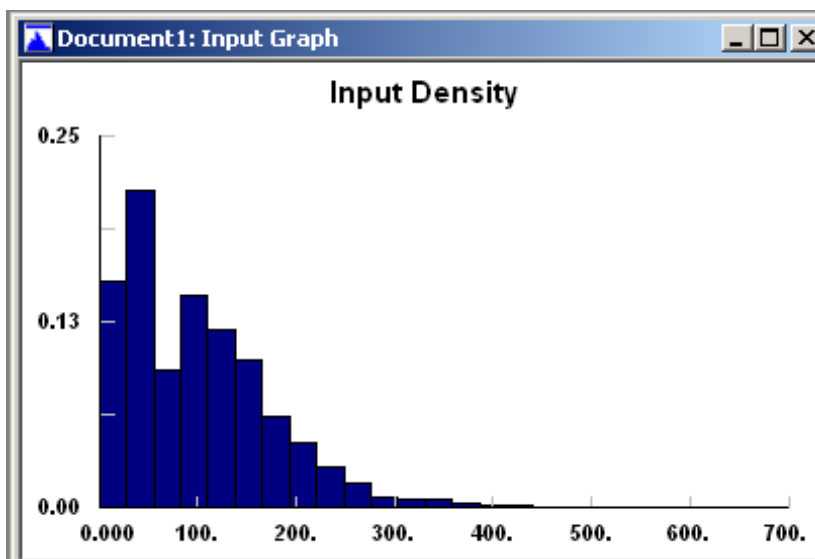
Piekrauta vagona tips	Relatīvais biežums
pusvagoni	0,87
fitingu platformas	0,05
fitingu platformas refkonteineriem	0,03
segšie vagoni	0,00
graudu vedēji	0,05

P5.3. tabula

**Vagonu tipa empīriskais sadalījums sastāviem ar tukšiem vagoniem**

Tukša vagona tips	Relatīvais biežums
pusvagoni	0,00
fitingu platformas	0,41
fitingu platformas refkonteineriem	0,00
segšie vagoni	0,24
graudu vedēji	0,35

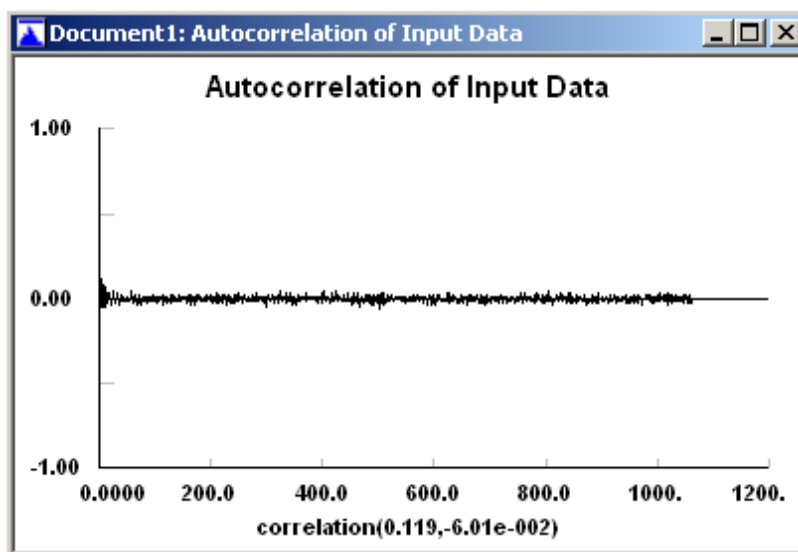
## Ogļu termināla galvenie parametri un funkcionēšanas algoritma īpašības



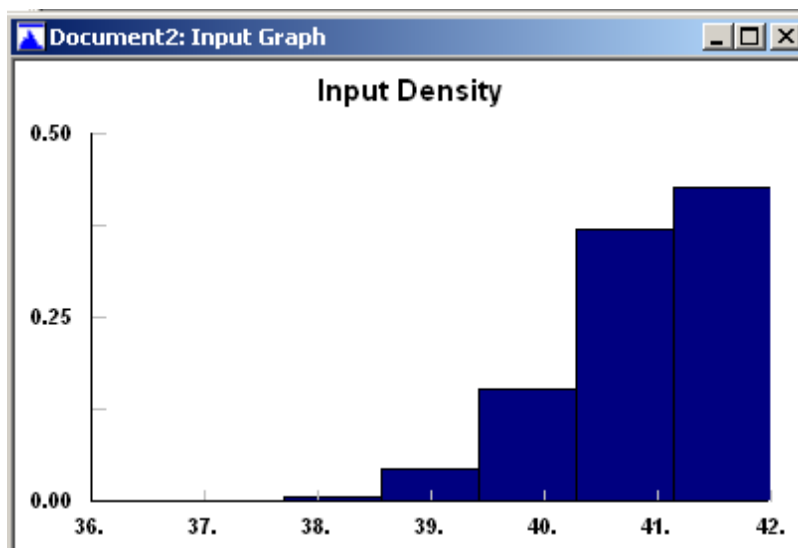
P6.1. att. Ogļu vagonu sastāvu ierašanās laika intervāla empīriskā sadalījuma blīvuma funkcijas histogramma

descriptive statistics	
data points	5301
minimum	0.
maximum	604.318
mean	100.096
median	90.287
mode	0.
standard deviation	77.922
variance	6071.83
coefficient of variation	77.8474
skewness	1.06504
kurtosis	1.94374

P6.2. att. Ogļu vagonu sastāvu ierašanās laika intervāla empīriskā sadalījuma parametru novērtējumi



**P6.3. Ogļu vagonu sastāvu ierašanās laika intervāla autokorelācijas funkcija**



**P6.4. att. Ogļu vagonu sastāvu vagonu skaita empīriskā sadalījuma masas funkcija**

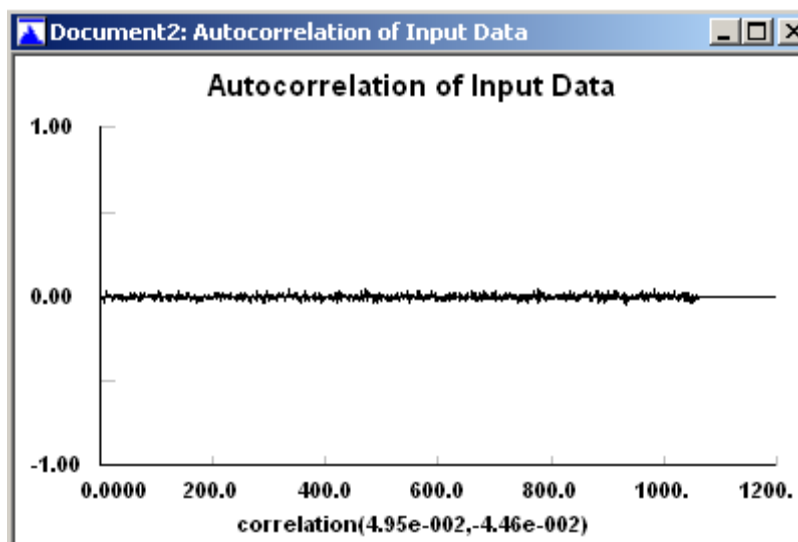
Dzelzceļa mezgla ogļu termināla objektu galvenie parametri iegūti no novērošanas datiem vai no pieostas dzelzceļa mezgla sistēmas modelēšanas datiem. Pārvietošanas laiks no uzkrāšanas ceļiem uz ogļu terminālu aizņem 30-35 min. Pārvietošanu nodrošina 2. lokomotīve. Pārvietošanas laiks starp bufera zonām un apstrādes pozīcijām ir 30 minūtes, pārvietošanu nodrošina 2. lokomotīve vai brīvostas lokomotīve. Vagonu izkraušanas intensitāte – 25 vagoni/stundā. Izkraušanas intensitāti var ietekmēt laika apstākļu koeficients, kura vērtība normālos apstākļos ilgā laika periodam ir vienāda ar 0,82.

Document2: Descriptive Statistics

descriptive statistics

data points	5302
minimum	36.
maximum	42.
mean	41.1596
median	41.
mode	42.
standard deviation	0.908055
variance	0.824563
coefficient of variation	2.20618
skewness	-1.0908
kurtosis	1.32883

P6.5.att. Ogļu vagonu sastāvu vagonu skaita empīriskā sadalījuma parametru novērtējumi



P6.6.att. Ogļu vagonu sastāvu vagonu skaita empīriskā sadalījuma autokorelācijas funkcija

Kopējā bufera zonu ietilpība ļauj vienlaikus gaidīt apkalpošanu līdz trim ogļu pusvagonu sastāviem. Pēc izkraušanas darbiem pusvagonu sastāvus 2. lokomotīve pārvieto uz sastāvu formēšanas punktu; pārvietošanas ilgums – 30-35 minūtes.



## Pieostas dzelzceļa transporta mezgla diskrētu notikumu modelis

### Ogļu vagonu sastāva formēšanas punkta funkcionēšanas algoritms (skripta fragments)

```

VL SECTION: Pieprasījumi1 On Entry Logic
Begin
  'Obeyed just after a work item enters the storage bin
  Select Current Work Item  Pieprasījumi1 , Pieprasījumi1.Count Contents
  SET F_StatussKontrolsumma = F_StatussU1+F_StatussU2
  IF Pieprasījumi1.Count Contents > 0
  Begin
    IF Sastāva_Tips = 0
    Begin
      'Vai tas ir jaunais sastāvs? Noteikt parametrus
      SET Sastāva_Tips = Formēšanas_Tips
      SET Sastāva_Garums = Formēšanas_Garums
      SET F_Vagonu skaititājs = F_Vagonu skaititājs+Formēšanas_Garums
      SET Sastāva_Laiks = Formēšanas_Laiks
      SET F_Transportēšanas_laiks = F_Transportēšanas_laiks_1
    End
  ELSE
  Begin
    'Sastāvs, kas gaidīja lokomotīvi. Parametri jau ir noteikti
  End
  Select Current Work Item  Pieprasījumi1 , 1
  IF Lokomotīve 1.Current Available = 1
  Begin
    'Lokomotīve1 ir pieejama
    IF F_StatussKontrolsumma <= 3
    Begin
      'Ir brīvas vietas formēšanai
      IF F_StatussKontrolsumma > 0
      Begin
        'Pārbaudīt, vai iespējams pabeigt sastāvu
        IF Sastāva_Garums+F_Sastāva_Garums_UC1 = 57
        Begin
          SET F_Sastāva_Garums_UC1 = 57
          SET Galapunkts = 1
          SET F_StatussU1 = 2
          SET F_StatussKontrolsumma = F_StatussU1+F_StatussU2
          Move Work Item To  F_Lokomotīves1_gaidīšana , -1
        End
      ELSE IF Sastāva_Garums+F_Sastāva_Garums_UC2 = 57
      Begin
        SET F_Sastāva_Garums_UC2 = 57
        SET F_StatussU2 = 2
        SET Galapunkts = 2
        SET F_StatussKontrolsumma = F_StatussU1+F_StatussU2
        Move Work Item To  F_Lokomotīves1_gaidīšana , -1
      End
    ELSE
  Begin
    IF F_StatussKontrolsumma = 3

```

```

Begin
'Viens no ceļiem ir aizņemts ar sagatavotu vilcienu
IF F_StatusU1 < 2
Begin
IF F_Sastāva_Garums_UC1+Sastāva_Garums < 57
Begin
SET F_Sastāva_Garums_UC1 = F_Sastāva_Garums_UC1+Sastāva_Garums
SET F_StatusU1 = 1
SET Galapunkts = 1
SET F_StatusKontrolsumma = F_StatusU1+F_StatusU2
Move Work Item To F_Lokomotīves1_gaidīšana , -1
End
ELSE
Begin
'Vagonu ir vairāk. Pabeigt vilciena formēšanu, noteikt vagonu atlikumu
SET F_Daļējais_Garums = 57-F_Sastāva_Garums_UC1
SET F_Skaitītājs2 = 1
SET Sastāva_Garums = Sastāva_Garums-F_Daļējais_Garums
SET Formēšanas_Tips = Sastāva_Tips
SET Formēšanas_Garums = F_Daļējais_Garums
SET Formēšanas_Laiks = Sastāva_Laiks
SET F_Sastāva_Garums_UC1 = 57
SET F_StatusU1 = 2
SET F_StatusKontrolsumma = F_StatusU1+F_StatusU2
Add Work To Queue Vagoni_formēšanai , F_Lokomotīves1_gaidīšana
'Plānojam nākamā pieprasījuma apkalpošanu pēc noteiktā laika
Schedule Event on Simulation Object Pieprasījumi1 On Entry Logic , Pieprasījumi1 ,
F_Laiks_līdz_pārbaudei
End
End
ELSE
Begin
IF F_StatusU2 < 2
Begin
IF F_Sastāva_Garums_UC2+Sastāva_Garums < 57
Begin
SET F_Sastāva_Garums_UC2 = F_Sastāva_Garums_UC2+Sastāva_Garums
SET F_StatusU2 = 1
SET Galapunkts = 2
SET F_StatusKontrolsumma = F_StatusU1+F_StatusU2
Move Work Item To F_Lokomotīves1_gaidīšana , -1
End
ELSE
Begin
'Vagonu ir vairāk.Pabeigt vilciena formēšanu, noteikt vagonu atlikumu
SET F_Daļējais_Garums = 57-F_Sastāva_Garums_UC2
SET F_Skaitītājs2 = 2
SET Sastāva_Garums = Sastāva_Garums-F_Daļējais_Garums
SET Formēšanas_Tips = Sastāva_Tips
SET Formēšanas_Garums = F_Daļējais_Garums
SET Formēšanas_Laiks = Sastāva_Laiks
SET F_Sastāva_Garums_UC2 = 57
SET F_StatusU2 = 2

```

```

SET F_StatussKontrolsumma = F_StatussU1+F_StatussU2
Add Work To Queue  Vagoni_formēšanai , F_Lokomotives1_gaidišana
'Plānojam nākamā pieprasījuma apkalpošanu pēc noteiktā laika
Schedule Event on Simulation Object  Pieprasījumi1 On Entry Logic , Pieprasījumi1 ,
F_Laiks_līdz_pārbaudei
    End
End
ELSE
Begin
'Go on
End
End
End
ELSE
Begin
IF F_Sastāva_Garums_UC1 >= F_Sastāva_Garums_UC2
Begin
'Ir uzsākti sastāvi, atrāst visgarāko
SET F_Skaitītājs2 = 1
End
ELSE
Begin
SET F_Skaitītājs2 = 2
End
IF F_StatussKontrolsumma = 2
Begin
'Uzsākt vilciena formēšanu uz tukša ceļa
IF F_StatussU1 = 0
Begin
SET Galapunkts = 1
SET F_Sastāva_Garums_UC1 = F_Sastāva_Garums_UC1+Sastāva_Garums
SET F_StatussU1 = 1
SET F_StatussKontrolsumma = F_StatussU1+F_StatussU2
Move Work Item To  F_Lokomotives1_gaidišana , -1
End
ELSE IF F_StatussU2 = 0
Begin
SET Galapunkts = 2
SET F_Sastāva_Garums_UC2 = F_Sastāva_Garums_UC2+Sastāva_Garums
SET F_StatussU2 = 1
SET F_StatussKontrolsumma = F_StatussU1+F_StatussU2
Move Work Item To  F_Lokomotives1_gaidišana , -1
End
ELSE
Begin
'Neiespejama situācija
SET Galapunkts = F_Skaitītājs2
End
End
ELSE
Begin
'StatussKontrolsumma=1
IF F_StatussU1 = 1
Begin
IF F_Sastāva_Garums_UC1+Sastāva_Garums < 57
Begin
SET Galapunkts = 1
SET F_Sastāva_Garums_UC1 = F_Sastāva_Garums_UC1+Sastāva_Garums
SET F_StatussU1 = 1

```

```

SET F_StatussKontrolsumma = F_StatussU1+F_StatussU2
Move Work Item To F_Lokomotives1_gaidisana , -1
End
ELSE
Begin
'Vagonu ir vairāk.Pabeigt vilciena formēšanu, noteikt vagonu atlikumu
SET F_Skaititajs2 = 1
SET F_Daļējais_Garums = 57-F_Sastāva_Garums_UC1
SET Sastāva_Garums = Sastāva_Garums-F_Daļējais_Garums
SET Formēšanas_Tips = Sastāva_Tips
SET Formēšanas_Garums = F_Daļējais_Garums
SET Formēšanas_Laiks = Sastāva_Laiks
SET F_Sastāva_Garums_UC1 = 57
SET F_StatussU1 = 2
SET F_StatussKontrolsumma = F_StatussU1+F_StatussU2
Add Work To Queue Vagoni_formēšanai , F_Lokomotives1_gaidisana
'Plānojam nākamā pieprasījuma apkalpošanu pēc noteiktā laika
Schedule Event on Simulation Object Pieprasījumi1 On Entry Logic , Pieprasījumi1 ,
F_Laiks_lidz_pārbaudei
End
End
ELSE
Begin
IF F_Sastāva_Garums_UC2+Sastāva_Garums < 57
Begin
SET Galapunkts = 2
SET F_Sastāva_Garums_UC2 = F_Sastāva_Garums_UC2+Sastāva_Garums
SET F_StatussU2 = 1
SET F_StatussKontrolsumma = F_StatussU1+F_StatussU2
Move Work Item To F_Lokomotives1_gaidisana , -1
End
End
ELSE
Begin
'Vagonu ir vairāk. Pabeigt vilciena formēšanu, noteikt vagonu atlikumu
SET F_Skaititajs2 = 2
SET F_Daļējais_Garums = 57-F_Sastāva_Garums_UC2
SET Sastāva_Garums = Sastāva_Garums-F_Daļējais_Garums
SET Formēšanas_Tips = Sastāva_Tips
SET Formēšanas_Garums = F_Daļējais_Garums
SET Formēšanas_Laiks = Sastāva_Laiks
SET F_Sastāva_Garums_UC2 = 57
SET F_StatussU2 = 2
SET F_StatussKontrolsumma = F_StatussU1+F_StatussU2
Add Work To Queue Vagoni_formēšanai , F_Lokomotives1_gaidisana
'Plānojam nākamā pieprasījuma apkalpošanu pēc noteiktā laika
Schedule Event on Simulation Object Pieprasījumi1 On Entry Logic , Pieprasījumi1 ,
F_Laiks_lidz_pārbaudei
End
End
End
End
End
End

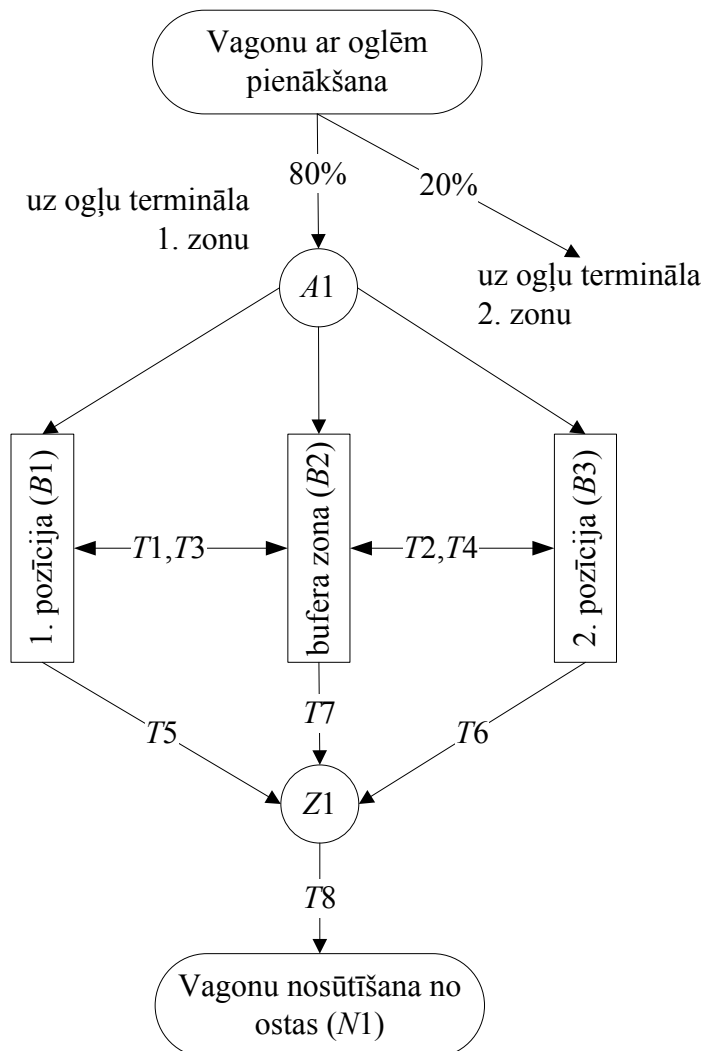
```

```

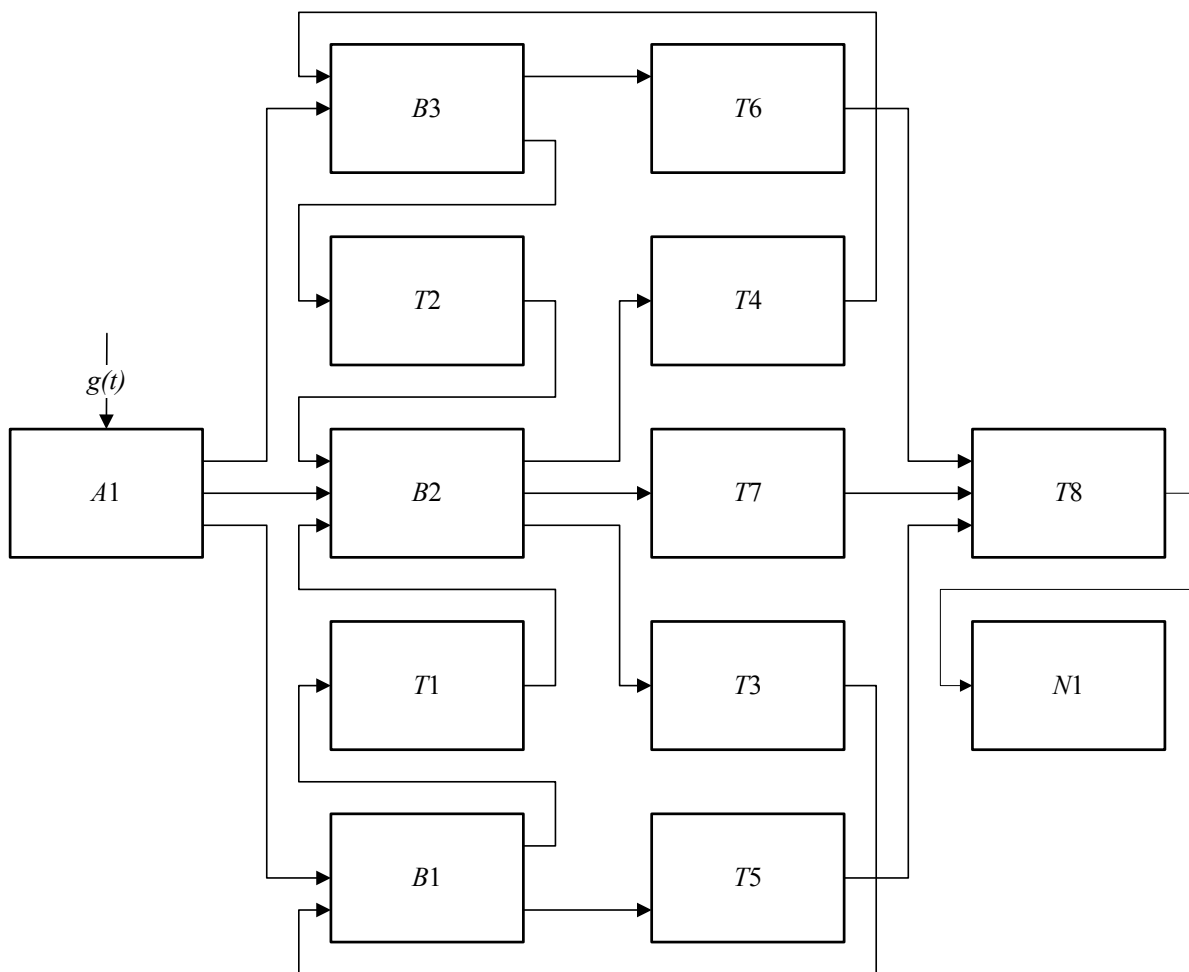
ELSE
Begin
  'Nav neviena uzsākta sastāva, uzsākt vilciena formēšanu
  SET Galapunkts = TRUNC[[RANDOM[0]*2]+1]
  IF Galapunkts = 1
  Begin
    SET F_Sastāva_Garums_UC1 = F_Sastāva_Garums_UC1+Sastāva_Garums
    SET F_StatussU1 = 1
    SET F_StatussKontrolsumma = F_StatussU1+F_StatussU2
  End
  ELSE
  Begin
    SET F_Sastāva_Garums_UC2 = F_Sastāva_Garums_UC2+Sastāva_Garums
    SET F_StatussU2 = 1
    SET F_StatussKontrolsumma = F_StatussU1+F_StatussU2
  End
  Move Work Item To F_Lokomotives1_gaidīšana , -1
  End
End
ELSE
Begin
  Schedule Event on Simulation Object Pieprasījumi1 On Entry Logic , Pieprasījumi1 , 60
  End
End
ELSE
Begin
  'Lokomotīve1 nav pieejama
  Schedule Event on Simulation Object Pieprasījumi1 On Entry Logic , Pieprasījumi1 , 60
  End
End
ELSE
Begin
  'Pieprasījumu nav
  End
End
End

```

### Kombinētā modeļa procesa diagramma, shēma un skripta fragments



P7.1. att. Ogļu termināla 1. zonas procesa vienkāršota diagramma



**P7.2. att. Oglu termināla 1. zonas kombinētā modeļa shēma**

```

System Dynamics Time Slice Logic
  IF A1.Current Level > 0
    IF B1.Current Level+B3.Current Level = 0
      IF B1_accumulated > B3_accumulated
        SET B3.Current Level = A1.Current Level
        SET B3_accumulated = B3_accumulated+B3.Current Level
        SET B3_Time1 = Simulation Time
        SET A1.Current Level = 0
      ELSE
        SET B1.Current Level = A1.Current Level
        SET B1_accumulated = B1_accumulated+B1.Current Level
        SET B1_Time1 = Simulation Time
        SET A1.Current Level = 0
    ELSE
      IF B1.Current Level = 0
        SET B1.Current Level = A1.Current Level
        SET B1_accumulated = B1_accumulated+B1.Current Level
        SET B1_Time1 = Simulation Time
        SET A1.Current Level = 0
      ELSE
        IF B3.Current Level = 0
          SET B3.Current Level = A1.Current Level
          SET B3_accumulated = B3_accumulated+B3.Current Level
          SET B3_Time1 = Simulation Time
          SET A1.Current Level = 0
        ELSE
          IF B2_1.Current Level = 0
            SET B2_1.Current Level = A1.Current Level
            SET A1.Current Level = 0
          ELSE
            SET F1.Current Level = A1.Current Level+F1.Current Level
            SET A1.Current Level = 0
        ELSE
          Ierašanās notikumi
    ELSE
      -Citi notikumi
      SET T6_2.Current Level = [[T6_1.Current Level*DeltaT]*DeltaT]+T6_2.Current Level
      SET T5_2.Current Level = [[T5_1.Current Level*DeltaT]*DeltaT]+T5_2.Current Level
      SET N1.Current Level = [[N1_1.Current Level*DeltaT]*DeltaT]+N1.Current Level
      SET N1_1.Current Level = 0
      SET T6_1.Current Level = 0
      SET T5_1.Current Level = 0
      SET Izejas_posmā_kombined = Z1.Fall Through Level
  
```

P7.3. att. Ogļu termināla 1. zonas kombinētā modeļa skripta fragments

## 8. pielikums

### Modelēšanas rezultāti (diskrētu notikumu modelis, kombinētais modelis)

Darba gaitā tika veikti 100 modelēšanas mēģinājumi katram modelim. Modelēšanas laiks  $T = 2000$  min. Rezultātā iegūti dažādi termināla funkcionēšanas raksturojumi, tai skaitā iekrauto un izkrauto vagonu skaits termināla 1. zonā. Modelēšanas rezultāti ir apkopoti P8.1 un P8.2 tabulās.

Turpmāk pielikumā diskrētu notikumu modeļa 8.1. tabulas dati tiek minēti kā 1. izlase, kombinētā modeļa 8.2. tabulas dati – kā 2. izlase. Gan 1., gan 2. izlases dati ir gadījuma lielumu vērtības.

Dati rezultātu tabulās P8.1 un P8.2 ir saistīti: katrai  $i$ -tai ( $i = \overline{1,100}$ ) P8.1 tabulas vērtībai

P8.1. tabula

#### Apstrādāto vagonu skaits posmā pēc termināla robežas (100 mēģinājumi, diskrētu notikumu modeļa novērtējums)

703	739	369	739	375	499	410	742	621	540
853	615	538	416	374	702	578	496	662	538
495	652	573	414	618	698	780	578	575	579
417	534	620	656	619	657	661	620	454	610
492	570	537	615	621	536	490	577	774	662
660	538	622	375	535	411	700	456	615	576
415	414	453	779	533	578	657	620	538	457
453	538	696	661	824	498	574	577	694	453
575	619	542	740	617	653	494	576	376	658
576	619	658	572	622	612	495	497	659	581

P8.2. tabula

#### Apstrādāto vagonu skaits posmā pēc termināla robežas (100 mēģinājumi, kombinētā modeļa novērtējums)

702,99	763,11	369,00	738,99	386,90	499,00	419,91	741,98	620,98	549,40
852,98	606,67	548,77	415,99	373,99	702,00	577,98	508,70	661,99	538,00
505,50	656,60	593,93	413,99	617,98	693,63	781,39	577,98	595,03	578,99
417,00	529,39	640,53	682,80	605,89	648,44	651,13	611,36	453,99	610,00
491,98	573,36	549,46	623,64	644,07	549,53	489,98	583,55	773,99	661,31
652,43	556,08	609,24	375,00	534,99	410,99	694,79	471,33	614,98	590,72
406,09	411,65	470,73	778,98	549,53	577,98	659,66	619,99	538,00	453,95
471,15	537,98	714,25	661,16	823,98	522,60	592,78	572,63	687,69	465,66
575,40	618,99	542,00	734,73	616,99	666,19	493,98	575,98	385,58	662,67
575,99	619,00	657,98	585,71	622,00	611,99	509,11	496,98	658,99	580,99

atbilst  $i$ -tā ( $i = \overline{1,100}$ ) P8.2 tabulas vērtība.

Modelēšanas rezultātu novērtējumam jāsalīdzina abu izlašu vidējas vērtības, ņemot vērā izlašu datu savstarpējo atkarīgumu un iespējamo korelāciju. Modelēšanas rezultātu sadalījuma likuma tipa meklēšanai izmantots datu analīzes rīks – *Stat::Fit*.

P8.1, P8.2 un P8.3. attēlā redzami 1. izlases sadalījuma atbilstības meklēšanas rezultāti, kas ļauj pieņemt hipotēzi par modelēšanas rezultātu sadalījuma atbilstību normālam sadalījumam.

P8.4, P8.5 un P8.6. attēlā ir aplūkojami 2. izlases sadalījuma atbilstības meklēšanas rezultāti, kas arī ļauj pieņemt hipotēzi par modelēšanas rezultātu sadalījuma atbilstību normālam sadalījumam.

*Gregory A. Kimble* grāmatā „Kā pareizi (un nepareizi) pielietot statistiku” – „*How to use (and misuse) Statistics. Prentice Hall, 1978.* – tiek piedāvāta universāla pieeja vidējo vērtību salīdzināšanai ar  $t$  kritēriju, t.sk. lielumiem, kuri ir korelēti. Konkrētā gadījumā šī pieeja ļauj izvirzīt nulles hipotēzi par abu izlašu vidējo vērtību starpību:  $H_0 : \bar{x}_1 - \bar{x}_2 = 0$ .  $t$  koeficienta aprēķināšanai jāizmanto šāds standartklūdas aprēķins:

$$S_{starp} = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 - 2rS_1S_2}, \quad (P8.1)$$

kur  $S_{starp}$  - izlašu vērtību starpību standartklūda,

$r$  - izlašu korelācijas koeficients,

$S_1$  - 1. izlases standartklūda,

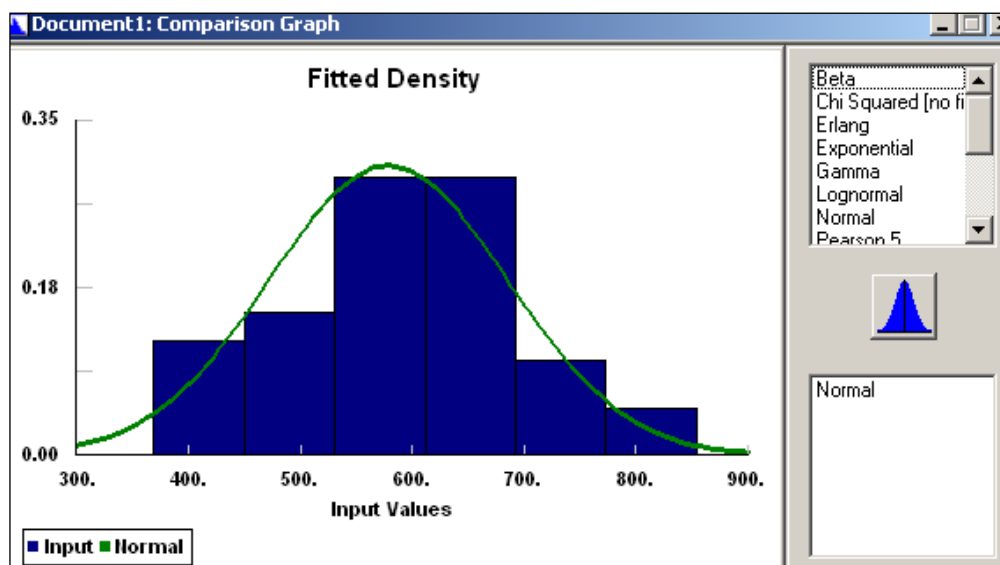
$S_2$  - 2. izlases standartklūda.

Auto::Fit of Distributions		
distribution	rank	acceptance
Normal(578, 106)	100	do not reject
Beta(179, 998, 6.67, 7.01)	85.1	do not reject
Lognormal[-2.7e+003, 8.1, 3.24e-002]	75.2	do not reject
Weibull(283, 3.07, 331)	67.3	do not reject
Erlang[-8.16e+003, 5.15e+003, 1.7]	35.8	do not reject
Gamma[-8.16e+003, 5.14e+003, 1.7]	34.	do not reject
Triangular(324, 863, 576)	15.9	do not reject
Rayleigh(350, 178)	0.882	reject
Pearson 6(369, 3.82e+004, 2.45, 443)	1.32e-002	reject
Uniform(369, 853)	0.	reject
Exponential(369, 209)	0.	reject
Power Function(369, 855, 0.874)	0.	reject
Pearson 5(253, 6.75, 1.84e+003)	0.	reject
Chi Squared	no fit	reject

P8.1. att. 1. izlases sadalījuma atbilstība dažiem teorētiskiem sadalījumiem

goodness of fit		
data points	100	
estimates	maximum likelihood estimates	
accuracy of fit	3.e-004	
level of significance	5.e-002	
summary		
distribution	Kolmogorov Smirnov	Anderson Darling
Beta	8.23e-002	0.639
Chi Squared	no fit	no fit
Erlang	9.54e-002	0.909
Exponential	0.273	10.7
Gamma	9.68e-002	0.909
Lognormal	8.52e-002	0.659
Normal	7.87e-002	0.606
Pearson 5	0.21	4.94
Pearson 6	0.165	3.57
Power Function	0.207	5.11
Rayleigh	0.144	1.88
Triangular	0.111	1.01
Uniform	0.245	7.02
Weibull	8.71e-002	0.69

P8.2. att. 1. izlases sadalījuma atbilstības dažiem teorētiskiem sadalījumiem kvalitāte



**P8.3. att. 1. izlases sadalījuma blīvuma funkcijas salīdzinājums ar normāla sadalījuma blīvuma funkciju**

Auto::Fit of Distributions		
distribution	rank	acceptance
Normal[582, 105]	100	do not reject
Beta[135, 1.03e+003, 8.52, 8.5]	91.7	do not reject
Lognormal[-4.55e+003, 8.54, 2.05e-002]	84.9	do not reject
Weibull[278, 3.2, 340]	76.1	do not reject
Triangular[326, 866, 578]	25.5	do not reject
Pearson 5[-44.7, 30.6, 1.86e+004]	4.9	do not reject
Rayleigh[353, 178]	0.624	reject
Uniform[369, 853]	0.	reject
Power Function[369, 855, 0.906]	0.	reject

**P8.4. att. 2. izlases sadalījuma atbilstība dažiem teorētiskiem sadalījumiem**

Korelācijas koeficienta vērtība tiek aprēķināta

$$r = \frac{\sum X_1 X_2 / N \cdot \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2}{N}, \quad (\text{P8.2})$$

kur  $\sum X_1 X_2$  - 1. un 2. izlašu vērtību pāru summa,

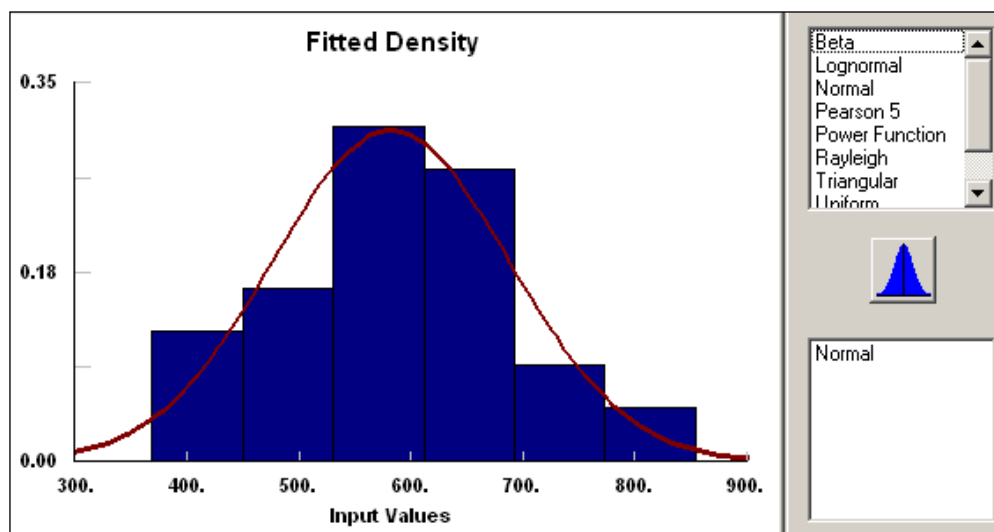
$N$  - izlašu apjoms, kas ir vienāds ar mēģinājumu skaitu,  $N = 100$ ,

$\bar{x}_1$  - 1. izlases vidējā vērtība,

$\bar{x}_2$  - 2. izlases vidējā vērtība.

goodness of fit		
data points	100	
estimates	maximum likelihood estimates	
accuracy of fit	3.e-004	
level of significance	5.e-002	
summary		
distribution	Kolmogorov Smirnov	Anderson Darling
Beta	7.55e-002	0.468
Lognormal	7.85e-002	0.461
Normal	7.44e-002	0.424
Pearson 5	0.119	1.32
Power Function	0.199	5.25
Rayleigh	0.142	1.94
Triangular	9.74e-002	0.833
Uniform	0.226	6.71
Weibull	8.01e-002	0.506

P8.5. att. 2. izlases sadalījuma atbilstības dažiem teorētiskiem sadalījumiem kvalitāte



P8.5. att. 2. izlases sadalījuma blīvuma funkcijas salīdzinājums ar normāla sadalījuma blīvuma funkciju

Izlašu standartklūdas tiek aprēķinātas pēc formulas

$$S_i = \frac{s_i}{\sqrt{N}} \quad (\text{P8.3})$$

kur  $S_i$  -  $i$ -tās izlases standartklūda,

$s_i$  -  $i$ -tās izlases standartnovirzes novērtējums.

Aprēķinos ir iegūtās šādas vērtības:

$$S_1 = 10,58,$$

$$S_2 = 10,69,$$

$$r = 0,99,$$

$$S = 10,71.$$

Empīriskā  $t$  koeficienta aprēķins

$$t = \frac{\sum_{i=1}^N (x_{1i} - x_{2i}) / N}{S}, \quad (\text{P8.4})$$

kur  $x_{1i}$  - 1. izlases  $i$ -tā vērtība,

$x_{2i}$  - 2. izlases  $i$ -tā vērtība.

Aprēķināts  $t$  koeficients

$$t = 0,3456$$

tiek salīdzināts ar  $t_{\text{krit}}$  vērtību. Ja izvēlētā ticamības varbūtība 0,95, brīvības pakāpju skaits (ņemot vērā mēģinājumu skaitu) testam ir

$$\nu = N - 1 = 99.$$

Tad

$$t_{\text{krit}}(\alpha = 0,05; \nu = 99) \approx 1,9842 \text{ un } t \ll t_{\text{krit}}$$

un ir iespējams konstatēt, ka nulles hipotēzi ar prasīto varbūtību nevar noraidīt. Tā paliek spēkā: vidējo vērtību atšķirība nav statistiski nozīmīga.