

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Arnis LEKTAUERS

**INTEGRĒTAS PIEEJAS IZSTRĀDE
DISKRĒTU NOTIKUMU UN NEPĀRTRAUKTU
SISTĒMU IMITĀCIJAS MODELĒŠANAI UN
VIZUALIZĀCIJAI**

Promocijas darba kopsavilkums

Rīga 2008

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Datorzinātnes un informācijas tehnoloģijas fakultāte
Informācijas tehnoloģijas institūts

Arnis LEKTAUERS

Vadības informācijas tehnoloģijas doktora programmas doktorants

**INTEGRĒTAS PIEEJAS IZSTRĀDE
DISKRĒTU NOTIKUMU UN NEPĀRTRAUKTU
SISTĒMU IMITĀCIJAS MODELĒŠANAI UN
VIZUALIZĀCIJAI**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Dr.habil.sc.ing., profesors
J.MERKURJEVS

RTU Izdevniecība
Rīga 2008

UDK 681.511.017(043.2)

Le 414 i

Lektauers A. Integrētas pieejas izstrāde diskrētu notikumu un nepārtrauktu sistēmu imitācijas modelēšanai un vizualizācijai. Promocijas darba kopsavilkums. - R: RTU Izdevniecība, 2008. - 30 lpp.

Iespiests saskaņā ar DITF ITI Padomes 2008. gada 28. maija sēdes lēmumu, protokols Nr. 08-03.



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu Nacionālās programmas “Atbalsts doktorantūras programmu īstenošanai un pēcdoktorantūras pētījumiem” projekta “Atbalsts RTU doktorantūras attīstībai” ietvaros.

ISBN 978-9984-32-879-9

**PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ
INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2008. gada 8. decembrī plkst. 14.30 Rīgas Tehniskās universitātes Datorzinātnes un informācijas tehnoloģijas fakultātē, Meža ielā 1/3, 202. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors, Dr.habil.sc.ing. Aleksandrs Glazs
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Profesors, Dr.habil.sc.ing. Pēteris Rivža
Latvijas Lauksaimniecības universitāte, Latvija

Profesors, Ph.D.comp.sc. Jerzy W. Rozenblit
Arizonas universitāte, ASV

APSTIPRINĀJUMS

Es apstiprinu, ka esmu izstrādājis doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Arnis Lektuers (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 4 nodaļas, secinājumus, 4 pielikumus, literatūras sarakstu, 66 attēlus un 16 tabulas pamattekstā, kopā 142 lapaspuses. Literatūras sarakstā ir 123 nosaukumi.

SATURS

IEVADS	5
1. INTEGRĒTA PIEEJA IMITĀCIJAS MODELĒŠANĀ UN VIZUALIZĀCIJĀ	9
1.1. Sistēmpieceja imitācijas modelēšanā	9
1.2. Diskrētu notikumu sistēmu specifikācija	9
1.3. Vizualizācija imitācijas modelēšanā	9
1.4. Secinājumi	11
2. V-DEVS FORMĀLISMS	11
2.1. V-DEVS formālisma teorētiskie aspekti	12
2.2. Kvantētu stāvokļu sistēmu imitācijas modelēšana	13
2.3. Modeļvadāma V-DEVS modelēšana	14
2.4. V-DEVS vizualizācijas konvejers	15
2.5. Secinājumi	16
3. V-DEVS FORMĀLISMA PRAKTISKĀ REALIZĀCIJA	17
3.1. Formālisma realizācija programmatūras sistēmas veidā	17
3.2. Vizualizācijas konvejera praktiskā realizācija	19
3.3. V-DEVS simulatora verifikācija un testēšana	19
3.4. Secinājumi	21
4. V-DEVS FORMĀLISMA PRAKTISKAIS PIELIETOJUMS DINAMISKU SISTĒMU IMITĀCIJAS MODELĒŠANĀ	21
4.1. Automatizētās ražošanas sistēmas modelis	22
4.2. Eksperimenti ar ražošanas sistēmas modeli	23
4.3. Secinājumi	26
GALVENIE REZULTĀTI UN SECINĀJUMI	26
LITERATŪRA	28

IEVADS

Tēmas aktualitāte

Promocijas darba tēmas aktualitāte ir saistīta ar pēdējos gados vērojamajiem centieniem padarīt imitācijas modelēšanas sistēmas pieejamākas un draudzīgākas imitācijas modeļu izstrādātājiem un lēmumu pieņēmējiem, jo imitācijas modelēšana līdz šim pārsvarā tiek izmantota tikai šaurā profesionāļu lokā, kuriem jābūt ne tikai ar padziļinātām zināšanām tajā pielietojuma sfērā, kurā tiek izstrādāts imitācijas modelis, bet ir labi jāorientējas arī programmēšanā, varbūtību teorijā un matemātiskajā statistikā. Par nozīmīgu un perspektīvu virzienu imitācijas modelēšanas attīstībā ir uzskatāmas datorgrafikas un vizualizācijas metožu pielietošana un integrācija imitācijas modelēšanas sistēmās [13]. Neraugoties uz vizualizācijas metožu un līdzekļu plašo pielietojumu imitācijas modelēšanas sistēmās, imitācijas modelēšanas un vizualizācijas integrācijā joprojām pastāv vairākas pilnībā neatrisinātas problēmas.

Viena no pastāvošajām problēmām ir tā, ka ir maz teorētisku pētījumu un praktisku rezultātu imitācijas modelēšanas un vizualizācijas interaktīvas mijiedarbības jomā. Lielākā daļa imitācijas modelēšanas programmlīdzekļu nenodrošina pilnvērtīgas iespējas mijiedarboties ar modeli tieši imitācijas izpildes gaitā, bet izmaiņu veikšanai ir nepieciešams apstādināt imitācijas procesu un pēc tam to turpināt.

Otra pastāvošā problēma ir saistīta ar imitācijas modelēšanu diskreto notikumu un nepārtrauktu sistēmu izpētē, izmantojot atšķirīgas pieejas un metodes. Ar to ir izskaidrojams fakts, ka tradicionālajās nepārtrauktu procesu imitācijas modelēšanas sistēmās lielas grūtības sagādā diskreto notikumu apstrāde. Savukārt diskreto notikumu imitācijas modelēšanas sistēmās ir neiespējami vai arī ļoti grūti veikt nepārtrauktu sistēmu modelēšanu. Lai gan pēdējā laikā pieaug izstrādāto programmatūras risinājumu skaits kombinētu diskreto notikumu un nepārtrauktu sistēmu imitācijas modelēšanai, tomēr joprojām pastāv problēma, kas saistīta ar imitācijas modelēšanas un vizualizācijas sinhronizācijas jautājumiem šādu sistēmu izpētē.

Promocijas darba mērķis un uzdevumi

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt integrētu pieeju un metodes diskreto notikumu un nepārtrauktu sistēmu imitācijas modelēšanai un vizualizācijai, tās praktiski realizēt programmatūras sistēmā, un veikt izstrādātās sistēmas eksperimentālu pārbaudi.

Promocijas darba mērķa sasniegšanai ir izvirzīti sekojoši uzdevumi:

- imitācijas modelēšanas un vizualizācijas pieeju, metožu un sistēmu salīdzinošs pētījums ar mērķi identificēt to izstrādē un integrācijā neatrisinātos uzdevumus;
- integrētas vizuālās imitācijas modelēšanas pieejas un metožu izstrāde iepriekš identificēto trūkumu novēršanai;
- diskreto notikumu un nepārtrauktu sistēmu interaktīvas vizuālās imitācijas arhitektūras izstrāde;
- diskreto notikumu un nepārtrauktu sistēmu vizuālās imitācijas modelēšanas sistēmas praktiska realizācija;
- izstrādātās sistēmas eksperimentāla pārbaude, parādot tās praktiskās pielietojšanas iespējas.

Pētījumu objekts un priekšmets

Darba pētījumu objekts ir imitācijas modelēšanas un vizualizācijas mijiedarbības process.

Darba pētījumu priekšmets ir imitācijas modelēšanas un vizualizācijas raksturīgās īpašības, kas nosaka integrētas vizuālās imitācijas modelēšanas vides funkcionalitāti, un metodes, kas nodrošina šo atbilstošo funkcionalitāti.

Pētījumu metodes

Šajā darbā teorētisko pētījumu veikšanai ir izmantota sistēmu teorija un diskrētu notikumu sistēmu specififikācijas elementi, kopu teorija, datorvizualizācijas teorija. Promocijas darba izstrādātā sistēmas prototipa realizācijai ir izmantotas programmatūras inženierijas, imitācijas modelēšanas un datorgrafikas metodes.

Darba zinātniskais jaunieguvums

Izstrādātā promocijas darba galvenais zinātniskais jaunieguvums ir šāds:

- Izstrādāts sistēmteorētisks interaktīvas vizuālās imitācijas modelēšanas formālisms, kas paredzēts integrētu vizuālo imitācijas modelēšanas sistēmu izstrādei, izmantojot kombinētu diskrētu notikumu un nepārtrauktu sistēmu imitācijas pieeju. No tipiskām imitācijas modelēšanas koncepcijām tas atšķiras ar to, ka ir universāli pielietojams un integrē imitācijas modelēšanas un vizualizācijas funkcionalitāti.
- Balstoties uz vizuālās imitācijas modelēšanas formālismu, ir izstrādāta arhitektūra, metodika un algoritmi tā praktiskai realizācijai, kas no tradicionālām imitācijas modelēšanas sistēmām atšķiras ar vienotu modelēšanas, imitācijas, vizualizācijas un interaktīvo elementu traktējumu, kas unificē un vienkāršo imitācijas modeļu izstrādi un izmantošanu.
- Ieviests vizualizācijas ietvara jēdziens integrētas vizuālās imitācijas modelēšanas konteksta definēšanai mijiedarbībā ar imitācijas un modelēšanas ietvaru.
- Realizējot izstrādāto vizuālās imitācijas modelēšanas formālismu, ir konstatēts, ka modeļvadāmā pieeja uzlabo un vienkāršo imitācijas modeļa izstrādes un verifikācijas procesu.
- Izstrādāts algoritms integrētai nepārtrauktu sistēmu kvantētu stāvokļu imitācijas vizualizācijai, kas ļauj būtiski palielināt kvantēšanas soli un tādējādi samazināt nepieciešamo skaitļošanas resursietilpību, nesamazinot iegūto imitācijas rezultātu precizitāti.
- Aprobējot izstrādāto formālismu praktiska programmatūras prototipa veidā, ir izstrādāti divi simulatora varianti un ir pierādīts, ka prioritātes rindu algoritms ir ievērojami efektīvāks par hierarhisko simulatora algoritmu, tādējādi tas ir piemērotāks praktiskas vizuālās imitācijas modelēšanas sistēmas izstrādē un izmantošanā.

Darba praktiskā nozīmība

Darba praktiskā vērtība ir izstrādātā integrētā imitācijas modelēšanas un vizualizācijas pieeja un realizētais sistēmas prototips, kas apvieno diskrētu notikumu un nepārtrauktu sistēmu imitācijas modelēšanas un 2D/3D vizualizācijas metodes. Minēto tehniku apvienojums vienotā integrētā vidē ļauj efektīvi nodrošināt vizuālu interaktīvu imitācijas modelēšanas uzdevumu risināšanu.

Darba aprobācija

Par promocijas darba galvenajiem rezultātiem ir nolasīti referāti 8 starptautiskās zinātniskajās konferencēs. Darba ietvaros veikto pētījumu rezultāti ir atspoguļoti 7 publikācijās starptautiskos Latvijas Zinātnes padomes atzītos zinātniskajos izdevumos:

1. Lektuers A., Merkuryev Y. 3D Visual Framework for Modelling and Simulation of Supply Chain Systems// Scientific Proceedings of the eLOGMAR-M Project. - Riga: JUMI Ltd., 2006. - 141-150 p.
2. Lektuers A. A Mixed Reality Framework for Visualization and Execution of DEVS-based Simulation Models// Proceedings of the 19th European Conference on Modelling and Simulation "Simulation in Wider Europe", ECMS2005. - Riga: Publishing House of Riga Technical University, 2005. - 271-276 p.
3. Lektuers A. Developing a 3D Graphical User Interface for Object-Oriented Simulation Modelling// Rīgas Tehniskās universitātes zinātniskie raksti. 5.sēr., Datorzinātne. - Rīga: RTU, 2003. - 14.sēj., - 36-42 lpp.
4. Lektuers A. A Virtual 3D Environment for Logistics Modelling// Proceedings of the International Workshop on Harbour, Maritime and Multimodal Logistics Modelling & Simulation (HMS2003). - Riga: RTU, 2003. - 242-248 p.
5. Lektuers A. 3D-Projektierung von Simulationsmodellen in einer VR-Umgebung// Proceedings der Tagung "Simulation und Visualisierung '2003" der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg (SimVis 2003). - Magdeburg: SCS Publishing House, 2003. - 313-322 S.
6. Lektuers A. Imitācijas modeļu izveide virtuālā 3D vidē// Rīgas Tehniskās universitātes zinātniskie raksti. 5.sēr., Datorzinātne. - Rīga: RTU, 2002. - 10.sēj., - 107-113 lpp.
7. Lektuers A. Imitācijas modeļu vizualizācijas tehnoloģija// Rīgas Tehniskās universitātes zinātniskie raksti. 5.sēr., Datorzinātne. - Rīga: RTU, 2001. - 5.sēj., - 103-109 lpp.

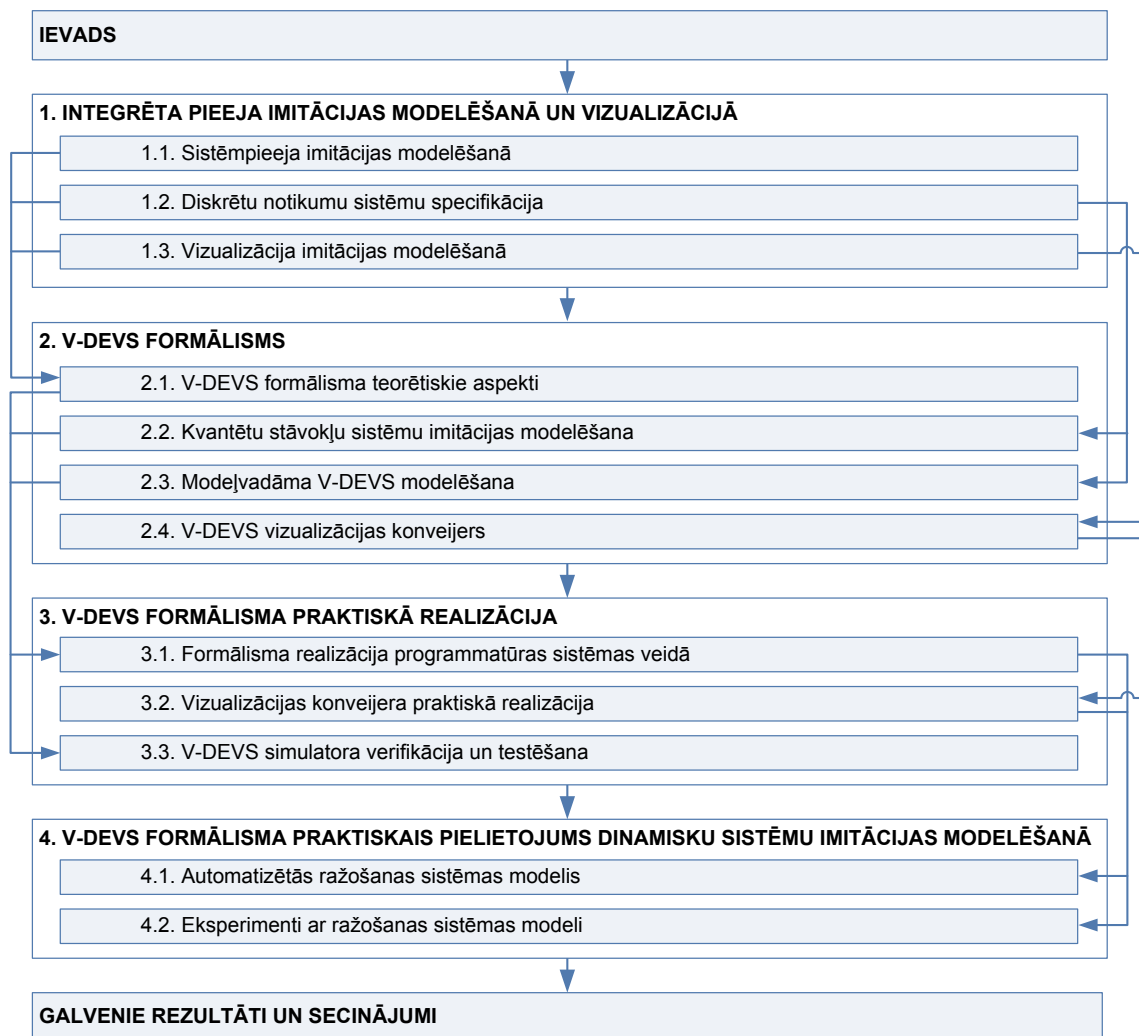
Promocijas darba struktūra

Promocijas darbs sastāv no ievada, četrām nodaļām, secinājumiem, četriem pielikumiem un literatūras avotu saraksta. Promocijas darba uzbūve un loģiskā struktūra ir parādīta 1. attēlā.

Ievadā ir pamatota izvēlētās tēmas aktualitāte, noformulēts pētījumu mērķis un uzdevumi, uzskaitītas promocijas darba izstrādē lietotās zinātniskās metodes, aprakstīts pētījumu zinātniskais jaunieguvums un darba iegūto rezultātu praktiskā vērtība, kā arī ir sniegts darba aprobācijas raksturojums.

Promocijas darba 1. nodaļa "Integrēta pieeja imitācijas modelēšanā un vizualizācijā" ir teorētiska nodaļa, kurā ar mērķi identificēt esošo vizuālo imitācijas modelēšanas sistēmu trūkumus un vispārīgā līmenī definēt prasības integrētai vizuālai interaktīvai diskrētu notikumu un nepārtrauktu sistēmu imitācijas modelēšanas videi ir analizēts un pamatots sistēmpieejā sakņotās diskrētu notikumu sistēmu specifiskācijas lietojums un priekšrocības, kā arī ir veikta vizualizācijas pieeju un metožu salīdzinošā analīze to integrācijai imitācijas modelēšanā.

Darba 2. nodaļā "V-DEVS formālisms" ir piedāvāta integrēta vizuālās imitācijas modelēšanas pieeja, kuru apraksta darba gaitā izstrādātais sistēmteorētisks interaktīvas vizuālās diskrētu notikumu un nepārtrauktu sistēmu imitācijas modelēšanas formālisms V-DEVS. Uz tā pamata ir izstrādāta interpolācijas metode kvantētu stāvokļu sistēmu vizuālajai imitācijai, izpētītas



1. att. Promocijas darba uzbūve un loģiskā struktūra

modelīvadāmās V-DEVS modelēšanas koncepcijas, kā arī izstrādāts V-DEVS vizualizācijas konveijers.

Darba 3. nodaļā “V-DEVS formālisma praktiskā realizācija”, precizējot pirmajā nodaļā definētās vispārējās prasības interaktīvai imitācijas modelēšanas videi, ir aprakstīta V-DEVS formālisma praktiskā realizācija programmatūras sistēmas veidā, kas ietver simulatora, modelīvadāmās pieejas un vizualizācijas konveijera realizācijas elementus. Ar izstrādāto programmatūras prototipu ir veikti praktiski eksperimenti tā pamatā esošo koncepciju un realizācijas detaļu verifikācijai.

Darba 4. nodaļā “V-DEVS formālisma praktiskais pielietojums dinamisku sistēmu imitācijas modelēšanā” ir izklāstīta automatizētās ražošanas sistēmas V-DEVS modeļa realizācija un ir aprakstīti un analizēti iegūtie eksperimentālie rezultāti, parādot izstrādātā formālisma praktiskā pielietojuma iespējas dinamisku sistēmu interaktīvajā imitācijas modelēšanā.

Promocijas darba rezultāti un secinājumi ir apkopoti darba noslēguma daļā.

1. INTEGRĒTA PIEEJA IMITĀCIJAS MODELĒŠANĀ UN VIZUALIZĀCIJĀ

20.gadsimta otrajā pusē daudzās praktiskajās un zinātnes nozarēs plaši sāka pielietot terminu *sarežģītas sistēmas*, šo jēdzienu attiecinot uz sarežģītām dinamisku objektu vadības sistēmām [31, 32], sastāvošām no daudziem atšķirīgas uzbūves, mainīgas funkcionalitātes savstarpēji saistītiem komponentiem. Praktiski jebkura sarežģīta sistēma kopumā ir uzskatāma par kombinētu sistēmu. Ar *kombinētas sistēmas* jēdzienu tiek apzīmētas sistēmas, kurās ir novērojami gan nepārtrauktie, gan diskrētie darbības aspekti [29].

1.1. Sistēmpieeja imitācijas modelēšanā

Sarežģītu (lielu) sistēmu analīzē un sintēzē plaši tiek izmantota sistēmpieeja, kas no klasiskās (induktīvās) pieejas atšķiras ar to, ka šī pieeja izmanto pāreju no vispārīgā uz detalizēto, kuras pamatā ir noteikts mērķis, pētāmo objektu izdalot no apkārtējās vides [30].

Termini “modelis” un “imitācija” bieži vien tiek lietoti kā sinonīmi, kaut gan būtībā tiem ir stingri noteikta un atšķirīga nozīme, ko definē *modelēšanas un imitācijas ietvars* (angļu valodā *Framework for Modelling and Simulation*) [8]. Modelēšanas un imitācijas ietvars, balstoties uz sistēmu teoriju, nodrošina bāzes koncepcijas imitācijas modelēšanas programmatūras vidēm.

1.2. Diskrētu notikumu sistēmu specifiskācija

Lai nodrošinātu sarežģītu sistēmu imitācijas modeļu konceptualizāciju un specifiskāciju, eksistē dažādas paradigmas, formālismi, modelēšanas metodoloģijas un imitācijas metodes. Diskrētu notikumu sistēmu specifiskācija ir vispārīgs universāls formālisms, kas paredzēts diskrēto notikumu sistēmu dinamikas aprakstīšanai un definēšanai, bet to ir iespējams pielietot arī tradicionālo formālismu aprakstīto sistēmu attēlošanā, kā piemēram, diferenciālvienādojumi (nepārtrauktās sistēmas) un diferenču vienādojumi (diskrētā laika sistēmas). DEVS (angļu valodā *Discrete Event System Specification*) formālismu ir izstrādājis amerikāņu zinātnieks Bernards Zeiglers [24, 25, 26] 1970.gadu sākumā ar mērķi nodrošināt diskrēto notikumu imitācijas modeļu izstrādi hierarhiskā un modulārā veidā.

Lai gan DEVS formālisms ir universāls diskrētu dinamisku sistēmu modelēšanas ietvars, eksistē vairāki specializēti DEVS formālisma paveidi, kas pielāgoti noteiktām sistēmu klasēm un problēmu apgabaliem.

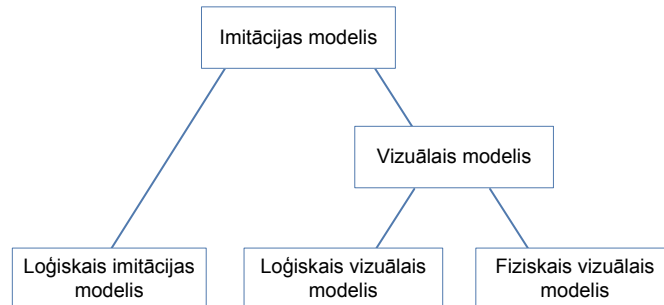
1.3. Vizualizācija imitācijas modelēšanā

Datorgrafikas un vizualizācijas jēdzienu saistībai ar modelēšanas un imitācijas jēdzieniem ir pieminami tādi termini kā “vizuālā interaktīvā imitācijas modelēšana” (angļu valodā *Visual Interactive Simulation*) [2] un “vizuālā interaktīvā modelēšana” (angļu valodā *Visual Interactive Modelling*) [23], taču tie galvenokārt netiek attiecināti uz imitācijas modelēšanu tās klasiskajā izpratnē, bet gan uz tādām informācijas tehnoloģiju jomām kā zinātniskā vizualizācija, datorizētā projektēšana, datorspēles un apmācības sistēmas.

Saskaņā ar [27], vizualizācija ir datu, informācijas un zināšanu transformācijas process grafiskā attēlojumā ar mērķi nodrošināt datu analīzi, informācijas izpēti, informācijas izskaidrošanu, tendenču prognozēšanu, tēlu atpazīšanu u.c.. Savukārt datorgrafika ietver visus grafisko attēlu sintēzes, attēlojuma un manipulācijas aspektus [3].

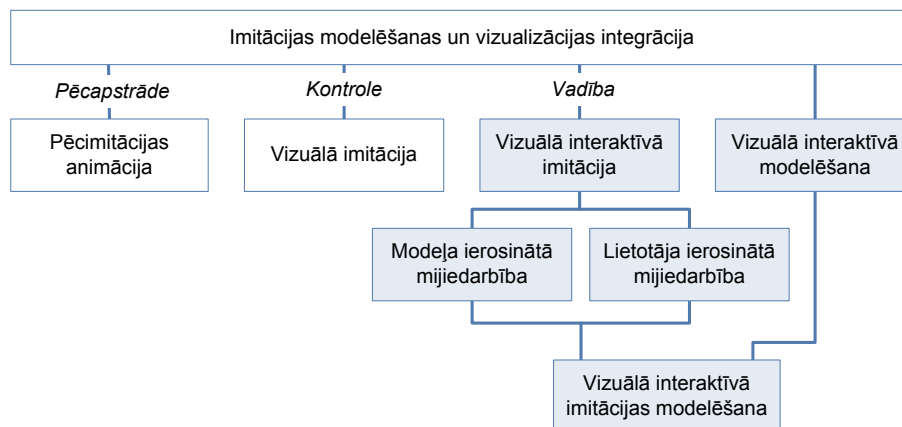
Tā kā terminam “modelis” atkarībā no tā lietošanas konteksta var būt daudzas nozīmes [10], tad integrētā imitācijas modelēšanas un vizualizācijas skatījumā nepieciešams precizēt arī modeļa terminu. Modelis var būt gan modelējamās sistēmas darbības loģikas un dinamikas abstrakcija,

gan arī fizisko īpašību un telpiskā izskata attēlojums divās vai trīs dimensijās, tādēļ darba autors piedāvā klasifikāciju, kurā ir izšķirams loģiskā imitācijas modeļa un vizuālā modeļa jēdziens (1.1. attēls). Savukārt vizuālais modelis, atkarībā no attēlojuma konteksta, ir iedalāms loģiskā vizuālā modeļa un fiziskā vizuālā modeļa apakštipos.



1.1. att. Imitācijas modeļu klasifikācija integrētā skatījumā

Galvenā vizuālās interaktīvās imitācijas motivācija ir vizualizācijas rīku un interaktīvo vadības rīku integrācija, ļaujot lietotājam novērot modeļa darbības gaitu un mijiedarboties ar to eksperimentu laikā. Modeļa, kā arī vizuālā attēlojuma parametrus un mainīgos ir iespējams modificēt eksperimentu veikšanas gaitā ar tūlītēju ietekmi uz imitācijas procesu. Atkarībā no lietotāja un modeļa mijiedarbības pakāpes ir izšķiramas trīs mijiedarbības jeb interakcijas klases: *pēcapstrāde, kontrole un vadība* [17], uz kā pamata iespējams izveidot imitācijas modelēšanas un vizualizācijas integrācijas veidu klasifikāciju (1.2. attēls).



1.2. att. Imitācijas modelēšanas un vizualizācijas integrācijas veidu klasifikācija

Dinamiskā vizualizācija jeb animācija sniedz iespējas lietotājam vizuāli novērot imitācijas modeļa darbības dinamiku un palielina modeļa ticamības efektu, sniedzot pilnīgāku pārskatu par modelējamo sistēmu, tādēļ tā var kalpot kā efektīvs imitācijas modelēšanas palīgīdzeklis dažādās ar imitācijas modelēšanu saistītās jomās un aspektos [21]:

- verifikācija un validācija;
- rezultātu izpratnes gūšana;
- rezultātu apspriešana;
- uzticības iegūšana no skeptiski noskaņotiem cilvēkiem;

- imitācijas ticamības iegūšana.

Interaktīvas mijiedarbības nodrošinājuma esamība imitācijas izpildes gaitā paver būtiskas priekšrocības modeļa lietotājam - iespējas mainīt modeļa parametrus un uzvedību bez nepieciešamības apstādināt imitācijas ciklu un atsākt to atkal no jauna. Šāda iespēja visnoderīgākā ir imitācijas modeļa verifikācijas un validācijas laikā, kad tiek veikta modeļa parametru un struktūras noskaņošana. Tādējādi interaktīvā mijiedarbība ar modeli imitācijas procesa laikā ir uzskatāma par modeļa verifikācijas un validācijas palīgīdzekli.

1.4. Secinājumi

Nodaļas ietvaros iegūtie rezultāti ir šādi:

- ir izstrādāta vizualizācijas klasifikācija, kas orientēta uz pielietojumu vizuālo imitācijas modelēšanas sistēmu teorētiskajā izpētē un praktiskajā realizācijā;
- ir identificētas priekšrocības, ko sniedz lietotāja interaktīvā mijiedarbība imitācijas procesa gaitā;
- vispārīgā līmenī ir formulētas prasības interaktīvai imitācijas modelēšanas sistēmai.

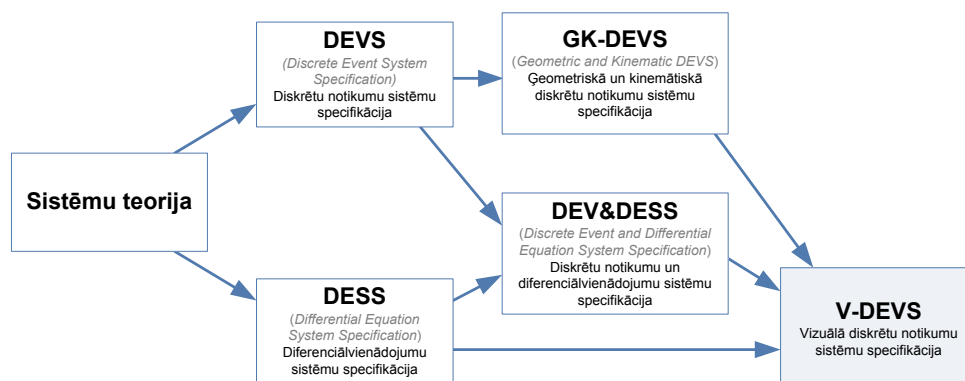
Galvenie secinājumi ir šādi:

- uz sistēmpieeju balstītais DEVS formālisms nodrošina universālu formālu bāzi un multi-formālismu pieeju kombinētu diskrētu notikumu un nepārtrauktu sistēmu modelēšanai;
- vizualizācija, atkarībā no tās izmantošanas mērķa un auditorijas, ir efektīvs palīgīdzeklis dažādos imitācijas modelēšanas etapos:
 - vizualizācija kā informācijas ieguves rīks;
 - imitācijas modeļu verifikācijas palīgīdzeklis modelēšanas procesā;
 - imitācijas modeļu validācijas palīgīdzeklis;
 - analīzes rīks dažādu imitācijas laikā noritošo procesu izskaidrošanai;
 - saziņas līdzeklis imitācijas modelēšanas speciālistiem un plānotājiem vai lietotājiem;
 - reprezentācijas līdzeklis;
 - apmācības līdzeklis.
- interaktīvā vizuālā imitācijas modelēšana rada iespējas lietotājam mainīt modeļa parametrus un ietekmēt tā darbību imitācijas izpildes gaitā, ļaujot paātrināt imitācijas modeļu verifikācijas un validācijas procesu.

2. V-DEVS FORMĀLISMS

Balstoties uz integrētas pieejas iespēju izpēti imitācijas modelēšanā un vizualizācijā, var secināt, ka ir nepieciešams izveidot vienotu sistēmteorētisku ietvaru, kas nodrošina gan imitācijas modelēšanas, gan interaktīvās vizualizācijas prasības. Tādēļ šajā promocijas darbā tiek piedāvāts jauns formālisms - *vizuālā diskrētu notikumu sistēmas specifikācija* (V-DEVS) (angļu valodā *Visual Discrete Event System Specification*), kas paredzēta diskrētu un nepārtrauktu sistēmu imitācijas modelēšanas un 2D/3D vizualizācijas integrācijai. V-DEVS formālisma pamatideja un diskrētu notikumu imitācijas modelēšanas struktūra ir aizgūta no klasiskā DEVS formālisma, bet

nepārtraukto stāvokļu imitācijas elementi aizgūti no DEVS formālisma paplašinājumiem - DESS [26], DEV&DESS [19] un GK-DEVS [12] formālismiem (2.1. attēls).



2.1. att. V-DEVS formālisma saikne ar citiem DEVS formālisma paplašinājumiem

2.1. tabulā ir sniegts V-DEVS formālisma iespēju salīdzinājums ar citiem saistītajiem DEVS formālisma paplašinājumiem.

2.1. tabula

DEVS formālismu salīdzinājums (“+” - iespēja ir nodrošināta, “-” - iespēja nav nodrošināta)

Formālisma iespējas	Klasiskais DEVS	DEV&DESS	DESS	GK-DEVS	V-DEVS
Diskrētu sistēmu modelēšana	+	+	+	+	+
Nepārtrauktu sistēmu modelēšana	-	+	-	-	+
Objektu kinemātikas animācija	-	-	-	+	+
Imitācijas modelēšanas un vizualizācijas integrācija	-	-	-	-	+
Interaktīvā imitācija	-	-	-	-	+

2.1. V-DEVS formālisma teorētiskie aspekti

Līdzīgi kā modelēšanas un imitācijas ietvarā modelējamās sistēmas novērojumu vai eksperimentu nosacījumu uzdošanai ir definēts eksperimentālais ietvars, modelējamās sistēmas eksperimentālo nosacījumu definēšanai attiecībā uz imitācijas modelēšanas grafisko procesu ir nepieciešams ieviest vizualizācijas ietvara jēdzienu. *Vizualizācijas ietvars* ir imitācijas modelēšanas struktūra, kas definē nosacījumus, pie kuriem notiek modelējamās sistēmas vizuālā modeļa izveide, izpilde un lietotāja mijiedarbība imitācijas gaitā. Vizualizācijas ietvara priekšrocība modelēšanas un imitācijas struktūrā ir iespējas nodalīt imitācijas modelēšanas procesu no grafiskā attēlojuma, definējot formālu bāzi vizuālajai interaktīvajai modelēšanai un imitācijai.

Atomārs V-DEVS modelis ir definējams šāda korteža veidā:

$$AM_{V-DEVS} = \langle X, Y, S, \delta_{ext}, \delta_{int}^{discr}, \lambda^{discr}, ta^{discr}, \delta_{int}^{cont}, \lambda^{cont}, ta^{cont} \rangle, \quad (2.1)$$

kur $X = \langle X^{discr}, X^{cont} \rangle$ - diskreto un nepārtraukto ieeju kopa;

$Y = \langle Y^{discr}, Y^{cont} \rangle$ - diskreto un nepārtraukto izeju kopa;

$S = S^{discr} \times S^{cont}$ - secīgu stāvokļu kopa kā diskreto stāvokļu S^{discr} un nepārtrauktu stāvokļu S^{cont} kopu Dekarta reizinājums;

$\delta_{ext} : Q \times X \rightarrow S$ - ārējā pārejas funkcija, kur

$Q = \{(s, e) \mid s \in S, 0 \leq e \leq ta^{discr}(s)\}$ - summārā stāvokļu kopa;

$s \in S$ - stāvoklis, kādā sistēma atrodas kopš pēdējās stāvokļu pārejas;

e - laiks kopš pēdējās diskretās stāvokļu pārejas;

$\delta_{int}^{discr} : S \rightarrow S$ - diskreto notikumu iekšējā pārejas funkcija;

$\lambda^{discr} : S \rightarrow Y^{discr}$ - diskreto notikumu izejas funkcija;

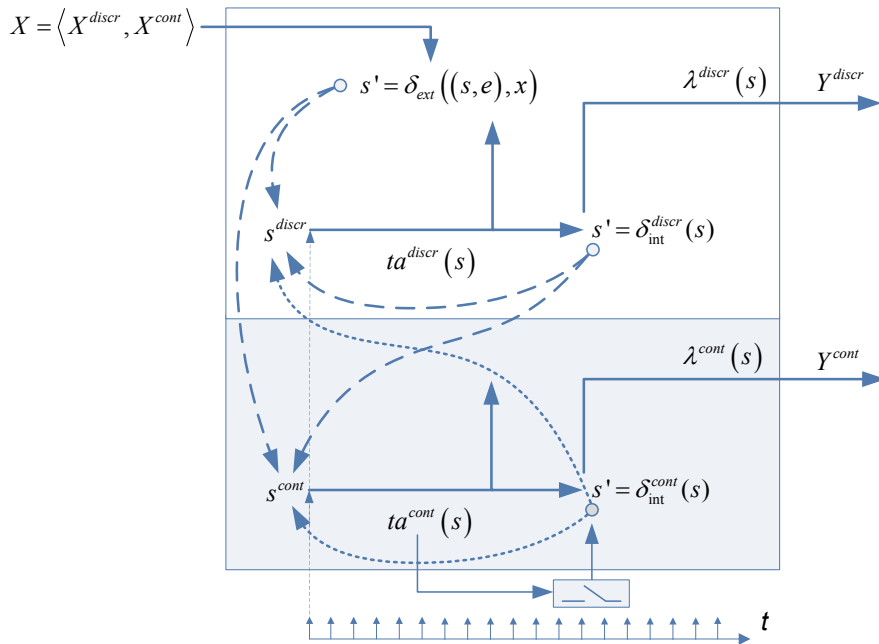
$ta^{discr} : S \rightarrow \mathbb{R}_{0,\infty}^+$ - diskreto notikumu laika ritējuma funkcija;

$\delta_{int}^{cont} : S^{cont} \rightarrow S^{cont}$ - nepārtrauktā iekšējā pārejas funkcija;

$\lambda^{cont} : S \rightarrow Y^{cont}$ - nepārtrauktā izejas funkcija;

$ta^{cont} : S \rightarrow \mathbb{R}_{0,\infty}^+$ - nepārtrauktā laika ritējuma funkcija.

2.2. attēlā ir parādīta vispārēja V-DEVS atomārā modeļa darbības dinamika.



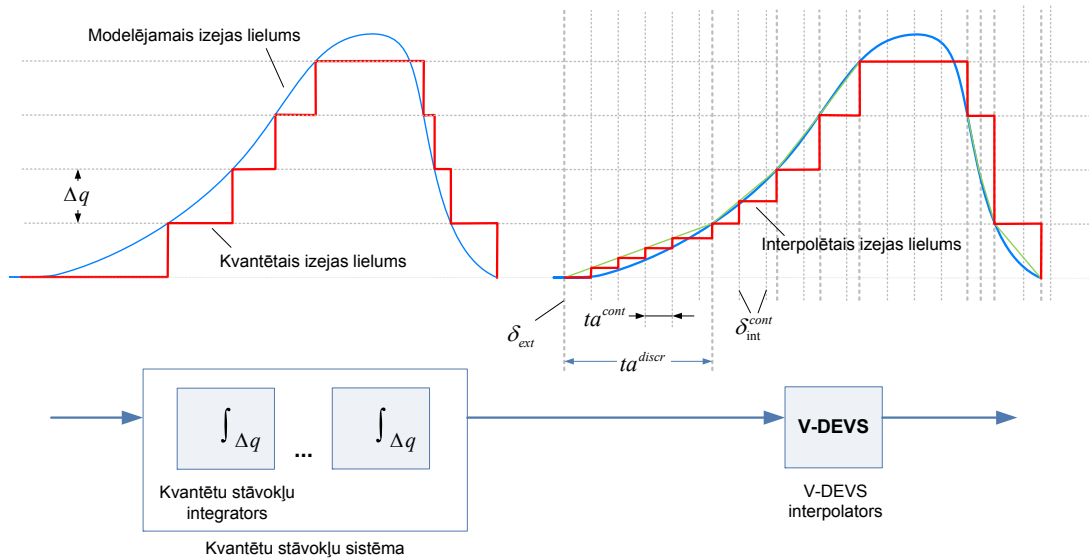
2.2. att. V-DEVS atomārā modeļa darbības dinamika

2.2. Kvantētu stāvokļu sistēmu imitācijas modelēšana

DEVS formālisms nodrošina formālu bāzi nepārtrauktu sistēmu imitācijai ar diskretiem līdzekļiem, pielietojot kvantētu stāvokļu algoritmus [5]. Kvantētu stāvokļu algoritmu izmantošana ļauj samazināt nepieciešamo imitācijas soļu skaitu, vienlaicīgi nodrošinot, ka neviens modelējamajā sistēmā būtiskais notikums netiek palaists garām. Taču darba gaitā, izstrādājot V-DEVS vizualizācijas konveijeru, un veicot praktiskus eksperimentus kvantētu stāvokļu imitācijas modeļu integrācijā ar vizualizāciju ir novērota problēma, ka ne vienmēr tas kvantēšanas solis

Δq , kas ir adekvāts imitācijas eksperimentu vajadzībām, ir vienlīdz piemērots dinamiskās vizualizācijas jeb animācijas izpildei, jo modeļa izejas lielumi var mainīties pa relatīvi lieliem diskrētiem soļiem. Animācijas vajadzībām ir nepieciešams, lai modeļa izejas lielumi mainītos vienmērīgi, radot imitācijas nepārtrauktības efektu. Dotās problēmas risināšanai šajā darbā tiek piedāvāta V-DEVS interpolatora koncepcija, kas efektīvi ļauj sasaistīt kvantētu stāvokļu modelēšanu un vizualizāciju.

2.3. attēlā ir parādīta V-DEVS interpolatora darbības koncepcija, kur kreisajā pusē ir attēlota kvantētu stāvokļu sistēma, bet labajā pusē - šīs sistēmas izejā pievienotais V-DEVS interpolators.



2.3. att. V-DEVS interpolatora darbības shēma

Imitācijas procesa kvantēto stāvokļu sistēmas izejas lielumi mainās ar diskrētu mainīga lieluma soli Δq laikā t_a^{discr} . Interpolatora uzdevums ir šīs diskrētās izmaiņas transformēt vienmērīgā diskrēta laika t_a^{cont} izmaiņu plūsmā.

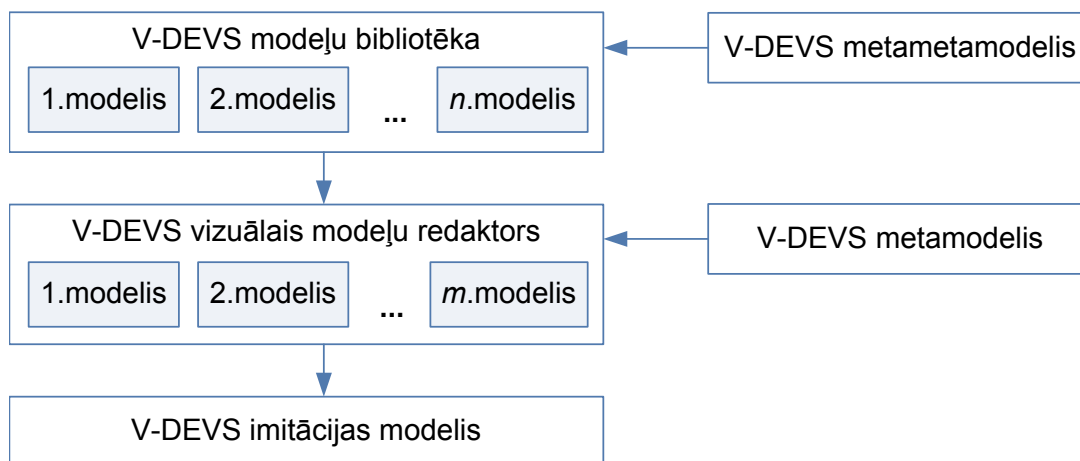
2.3. Modeļvadāma V-DEVS modelēšana

Imitācijas modeļa izveide agrīnā sistēmas izstrādes fāzē ir sarežģīts uzdevums, jo tas prasa padziļinātas modelēšanas metožu, sistēmas problēmu apgabala un modeļa izpildes paradigmu zināšanas. Šim nolūkam ir nepieciešama sadarbība starp sistēmas ekspertiem un modelēšanas ekspertiem, kuriem parasti ir diametrāli pretējas zināšanas un pieredze. Tādēļ ir nepieciešams praktisks un efektīvs veids modelēšanas un imitācijas ietvara pielietošanai sistēmas modelēšanā jau agrīnā izstrādes etapā. Eksistē dažādi paņēmieni un līdzekļi šī jautājuma risināšanā, kur vienas no visplašāk izmantotajām koncepcijām un līdzekļiem ir vienotā modelēšanas valoda UML [20, 28] un modeļvadāmā arhitektūra (angļu valodā *Model-Driven Architecture (MDA)*) [11]. Modeļvadāmās arhitektūras pamatā ir ideja par sistēmas izstrādi, izmantojot augsta līmeņa grafisko notāciju, ļaujot izstrādājam koncentrēties uz problēmas būtību, mazāk uzmanības pievēršot sīkākām detaļām.

Modeļvadāmajai pieejai V-DEVS formālisma vajadzībām ir nosakāmas šādas prasības:

- metamodelim jānodrošina sintaktiska struktūra modelējamās sistēmas aprakstam;
- modelēšanas elementu grafiskā attēlojuma eksistences nepieciešamība;
- piedāvātajam metamodelim jānodrošina pietiekoši elastīgs mehānisms konsistentam modelējamās sistēmas aprakstam.

2.4. attēlā ir parādīta V-DEVS imitācijas metamodelēšanas vispārējā arhitektūra. V-DEVS metamodelis definē izstrādājamā V-DEVS imitācijas modeļa sintaktisko un semantisko struktūru, un ir pamats loģisko un vizuālo imitācijas modeļu aprakstam. V-DEVS metametamodelis definē V-DEVS metamodela sintaksi un semantiku, un ir paredzēts modeļa bibliotēkas elementu aprakstam.



2.4. att. V-DEVS imitācijas metamodelēšanas vispārējā arhitektūra

2.4. V-DEVS vizualizācijas konveijers

Uz darbā piedāvātā V-DEVS formālisma pamata iespējams izstrādāt ne tikai koncepciju diskreto un nepārtrauktu sistēmu imitācijas modelēšanas un vizualizācijas integrācijai, bet šo formālismu iespējams pielietot arī pašu vizualizācijas pamatā esošo datorgrafikas attēlošanas sistēmu realizācijai. Tā kā vizualizācijas konveijera koncepcija balstās uz savstarpēji saistītu hierarhisku strukturētu komponentu sistēmas izmantošanu, tad šeit rodas iespēja pielietot V-DEVS matemātisko aparātu, tādējādi unificējot ne tikai imitācijas modelēšanas, bet arī datorgrafikas aspektus vienotā kontekstā. Darbā tiek piedāvāti divi V-DEVS vizualizācijas konveijera veidi - notikumu vadāms un pieprasījuma vadāms konveijera variants.

Notikumu vadāma vizualizācijas konveijera priekšrocības ir tā relatīvi vienkāršā struktūra (2.5. attēls), taču jebkuras izmaiņas kāda elementa ieejā izsauc visu saistīto elementu stāvokļu atjaunošanu. Notikumu vadāma vizualizācijas konveijera nepieciešamo ieejas/izejas portu skaits N_P informācijas apmaiņai starp konveijera elementiem ir nosakāms pēc sekojošas formulas:

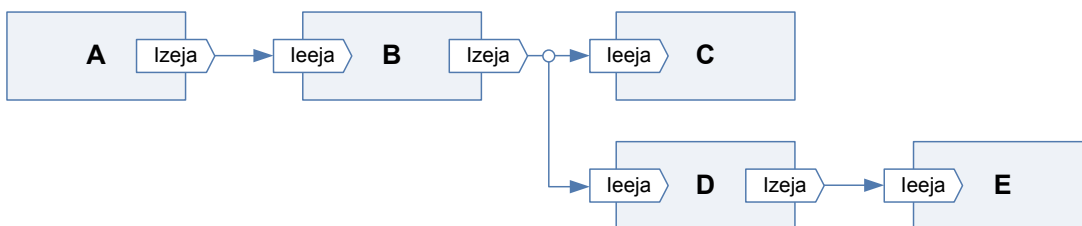
$$N_P = S_O + 2F + S_I, \quad (2.2)$$

kur S_O - avota elementu skaits;

F - filtra elementu skaits;

S_I - izejas elementu skaits.

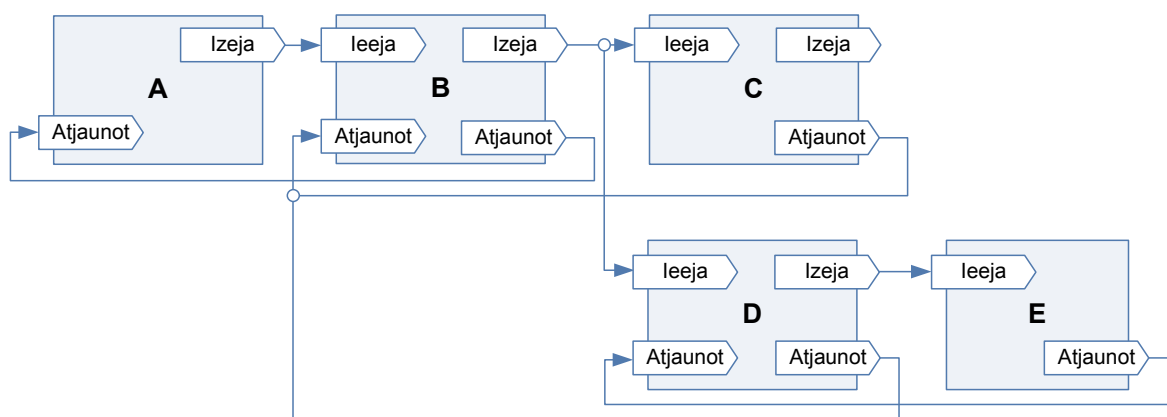
2.6. attēlā ir parādīta vispārēja pieprasījuma vadāma V-DEVS vizualizācijas konveijera struktūra. Šī varianta priekšrocība ir tā, ka apstrādāti tiek tikai tie elementi, kas tieši ietekmē vizualizācijas rezultātu.



2.5. att. Notikumu vadāma V-DEVS konveijera struktūra

Pieprasījuma vadāma vizualizācijas konveijera nepieciešamo ieejas/izejas portu skaits N_P informācijas apmaiņai starp konveijera elementiem ir nosakāms pēc sekojošas formulas:

$$N_P = 2S_O + 4F + 2S_I. \quad (2.3)$$



2.6. att. Pieprasījuma vadāma V-DEVS konveijera struktūra

2.5. Secinājumi

Nodaļas ietvaros sasniegtie rezultāti ir šādi:

- ieviests vizualizācijas ietvara jēdziens integrētas vizuālās imitācijas modelēšanas konteksta definēšanai mijiedarbībā ar modelēšanas un imitācijas ietvaru;
- izstrādāts uz sistēmteoriju balstīts V-DEVS formālisms;
- izveidota metodika imitācijas modelēšanas un vizualizācijas integrācijai kvantētu stāvokļu sistēmu imitācijā, pielietojot kvantētu stāvokļu interpolāciju;
- izstrādāta modeļvadāma modelēšanas pieeja V-DEVS formālisma realizācijai;
- izstrādāts V-DEVS vizualizācijas konveijers imitācijas modelēšanas un vizualizācijas procesu integrēšanai.

Galvenie secinājumi ir šādi:

- izstrādātais V-DEVS formālisms ir kombinēta diskretu notikumu un nepārtraukto sistēmu imitācijas modelēšanas koncepcija, jo satur gan diskretu notikumu, gan nepārtrauktu procesu imitācijas modelēšanas komponentus:
 - diskrētais komponents ir ekvivalents klasiskā DEVS formālisma definētajam atomārajam modelim diskretu notikumu modelēšanai;

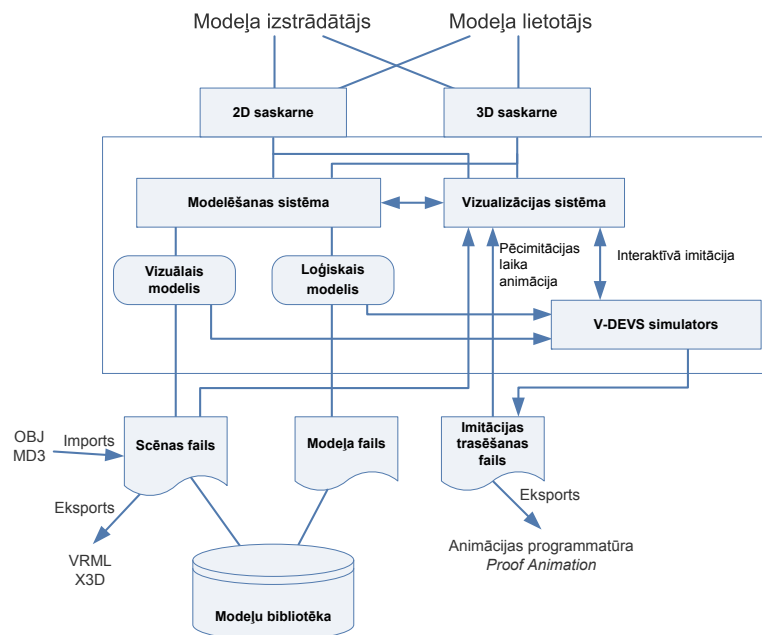
- nepārtrauktais komponents definē nepārtrauktu procesu modelēšanu, un ir universāli pielietojams gan imitācijas modelēšanas, gan vizualizācijas uzdevumiem.
- V-DEVS formālisms nodrošina formālu bāzi interaktīvai vizuālai kombinētu sistēmu modelēšanai;
- V-DEVS vizualizācijas konveijera priekšrocības:
 - sistēmpieceja vizualizācijas procesa nodrošināšanai;
 - ar V-DEVS vienots ieeju un izeju uzbūves, kā arī sinhronizācijas princips;
 - notikumu vai pieprasījuma vadīta vizualizācijas plūsmas apstrāde;
 - datorgrafikā plaši izmantotā scēnas grafa arhitektūras un tradicionālā vizualizācijas konveijera apvienojuma iespējas.

3. V-DEVS FORMĀLISMA PRAKTISKĀ REALIZĀCIJA

Šī nodaļa ir veltīta iepriekšējā nodaļā sniegtā sistēmteorētiskā V-DEVS formālisma praktiskajai realizācijai un ar to saistīto jautājumu risināšanai, iepriekš iegūtos teorētiskos rezultātus praktiski realizējot interaktīvas vizuālās 3D V-DEVS imitācijas modelēšanas sistēmas prototipa veidā.

3.1. Formālisma realizācija programmatūras sistēmas veidā

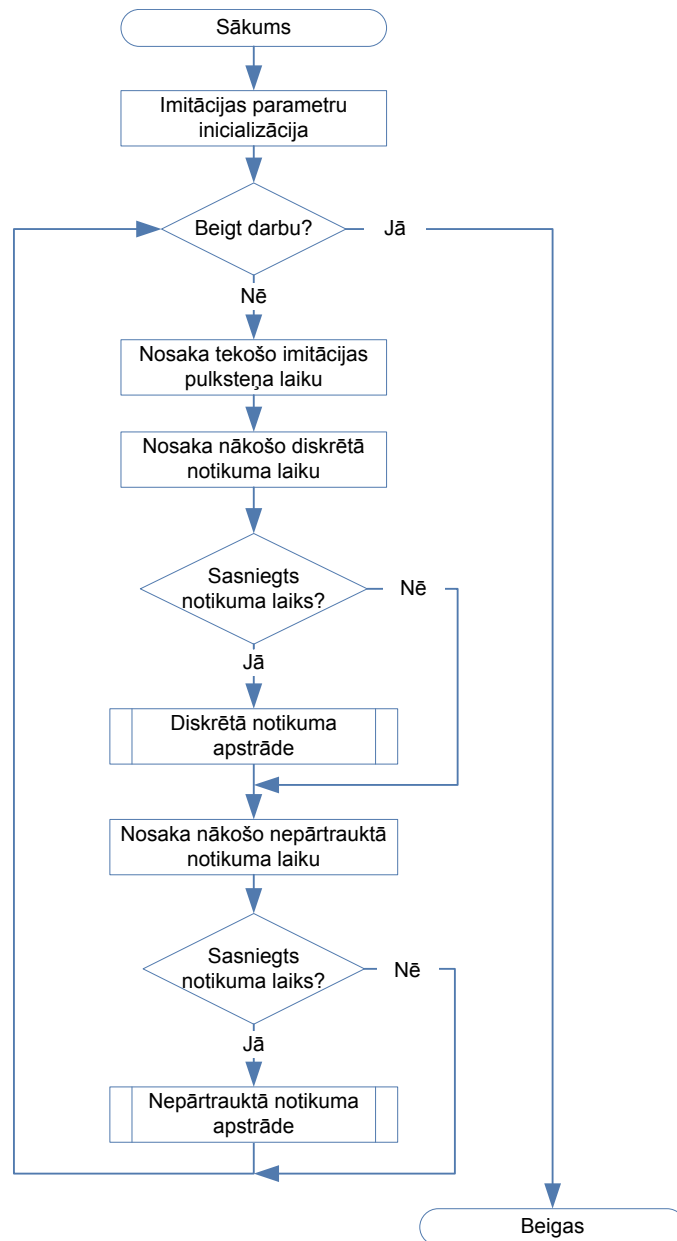
3.1. attēlā ir parādīta darba autora izstrādātā V-DEVS formālisma praktiskās realizācijas prototipa arhitektūra [15, 16], kas sastāv no trim apakšsistēmām - modelēšanas sistēmas, vizualizācijas sistēmas un V-DEVS simulatora.



3.1. att. V-DEVS sistēmas realizācijas arhitektūra

Sistēmas arhitektūras izstrādē ir pielietota pēdējā laikā imitācijas modelēšanas sistēmās arvien plašāk pielietotā integrētā pieceja [9], apvienojot dažādu avotu un veidu ieejas, piemēram, statistiskās un grafiskās informācijas apstrādi vienotā platformā.

Darba ietvaros ir izstrādāti divi V-DEVS simulatora algoritmi - hierarhiskais simulatora algoritms un prioritātes rindu algoritms. Abu algoritmu pamatā ir kopējs bāzes algoritms (3.2. attēls).



3.2. att. V-DEVS simulatora darbības bāzes algoritms

Hierarhiskā un modulārā V-DEVS modeļa struktūra ir balstīta uz DEVS simulatoru klasisko specifikāciju [26]. Katram atomārajam modelim ir piesaistīts simulatora objekts, savukārt katram saistītajam modelim ir piesaistīts koordinators objekts, tādējādi saistīto modeļu skaits ir vienāds ar koordinatoru skaitu, bet atomāro modeļu skaits ir vienāds ar simulatoru skaitu. Simulatori veic atomāro modeļu izpildi, bet koordinators - saistīto modeļu izpildi.

Prioritātes rindu V-DEVS simulatora algoritma realizācija ir veidota tādā veidā, lai tiktu uzlabota imitācijas efektivitāte šādos aspektos:

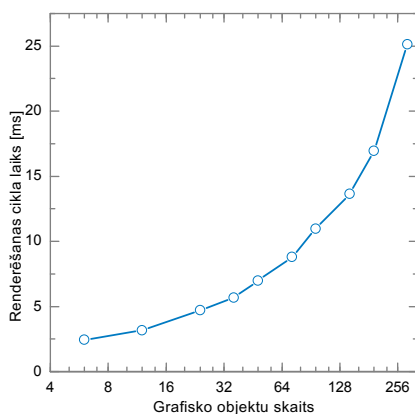
- atteikšanās no nevajadzīgu simulatora un koordinators objektu izmantošanas;
- notikumu plānošanas paātrināšana, apstrādājot tikai aktīvos modeļus;

- atteikšanās no nevajadzīgu iekšējās sinhronizācijas ziņojumu izmantošanas;
- atteikšanās no nevajadzīgu notikumu maršrutēšanas ziņojumu izmantošanas.

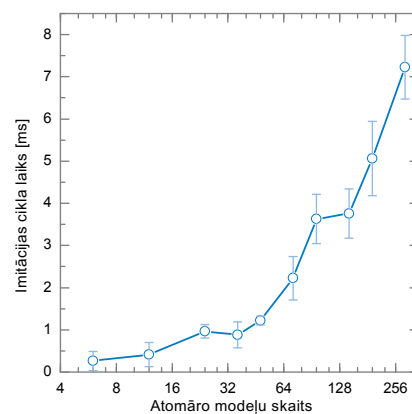
3.2. Vizualizācijas konveijera praktiskā realizācija

V-DEVS vizualizācijas konveijera praktiskā realizācija balstās uz iepriekš aprakstītajām vizualizācijas konveijera teorētiskajām nostādnēm. Darba ietvaros V-DEVS vizualizācijas konveijers ir realizēts, integrējot V-DEVS principus ar eksistējošām datorgrafikas un vizualizācijas programmatūras sistēmām. V-DEVS formālisms kā universāla diskreto notikumu un nepārtrauktu sistēmu modelēšanas paradigma, kas ir neatkarīga no konkrētas realizācijas, ir relatīvi vienkārši integrējams gan ar eksistējošām scēnas grafa, gan ar datu plūsmu vizualizācijas sistēmām. Darba izstrādes gaitā realizētajā prototipā ir veikta V-DEVS simulatora integrācija ar atklātā pirmkoda scēnas grafa bibliotēku JME (JMonkeyEngine) un atklātā pirmkoda vizualizācijas bibliotēku VTK [22].

Lai noskaidrotu V-DEVS simulatora veiktspēju mijiedarbībā ar scēnas grafa sistēmu, programmatūras prototipa izstrādes gaitā ir veikti vairāki eksperimentāli testi, kuri rāda (3.3. attēls), ka simulatora kopējo veiktspēju visbūtiskāk ietekmē tieši pielietotā scēnas grafa un vizualizācijas bibliotēka.



(a) Scēnas grafa renderēšanas laika atkarība no grafisko objektu skaita



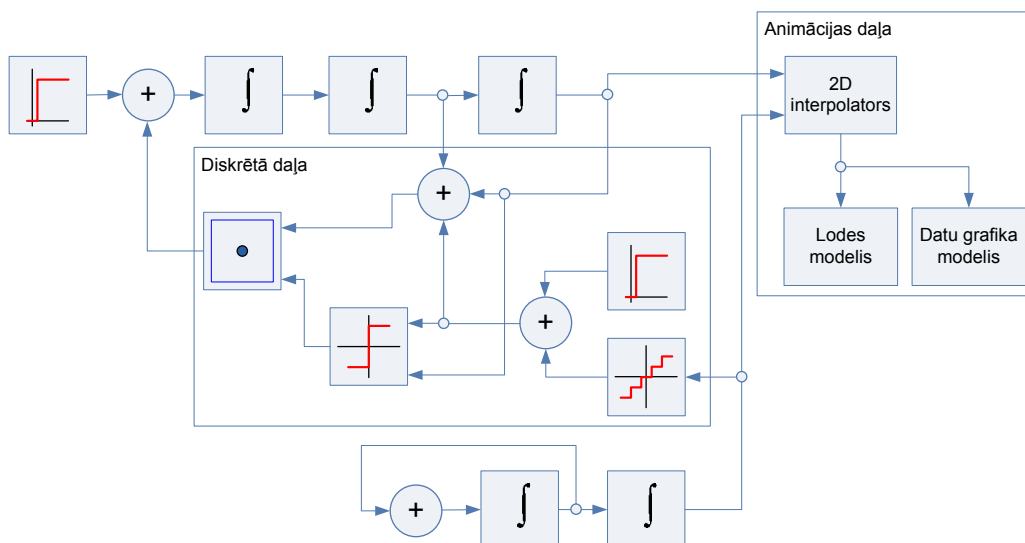
(b) V-DEVS imitācijas cikla laika atkarība no scēnas grafa atomāro modeļu skaita

3.3. att. V-DEVS simulatora veiktspēja mijiedarbībā ar scēnas grafa bibliotēku

3.3. V-DEVS simulatora verifikācija un testēšana

V-DEVS formālismu realizējot praktiskā imitācijas sistēmas prototipā, ir nepieciešams pārliecināties, ka izstrādātās sistēmas pamatā izmantotie algoritmi ir korekti - tātad ir nepieciešams veikt sistēmas darbības verifikāciju un testēšanu.

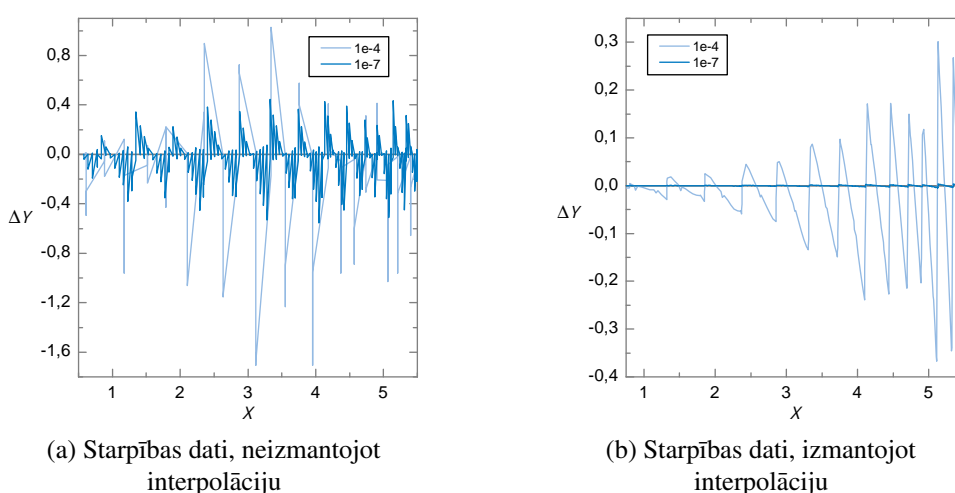
Tipisku kombinētas diskreto notikumu un nepārtrauktas sistēmas imitācijas modelēšanas piemēru raksturo pa kāpnēm lejupriepojošas elastīgas lodes (bumbas) modelis [5, 14]. Dotais modelis ir izstrādāts ar mērķi veikt V-DEVS kvantētu stāvokļu interpolatora praktiskās realizācijas verifikāciju un novērtēt tā darbības efektivitāti imitācijas modelēšanas uzdevumu risināšanā. V-DEVS imitācijas modelis, kura struktūra redzama 3.4. attēlā, realizē pa kāpnēm lejupriepojošas lodes kustības matemātisko formulējumu. Vienmērīgas imitācijas izpildes animācijas procesa nodrošināšanai tiek izmantots V-DEVS 2D kvantētu stāvokļu interpolators.



3.4. att. Pa kāpnēm lejup ripojošas lodes modeļa struktūra

Ripojot lejup pa kāpnēm, lode pārvietojas divās dimensijās, tādējādi ripošanas nosacījumi ir atkarīgi no diviem mainīgajiem (x un y). Pielietojot kvantētu stāvokļu V-DEVS vizuālo imitācijas modelēšanu šī uzdevuma izpildē, rodas problēma, ka pietiekoši precīzu modelēšanas rezultātu iegūšanai izmantojamais kvantēšanas solis Δq nav derīgs vienmērīgas imitācijas animācijas procesa nodrošināšanai. Tādēļ šīs problēmas atrisināšanai tiek izmantots darbā piedāvātais kvantētu stāvokļu interpolators.

Izstrādātā V-DEVS kvantētu stāvokļu interpolatora efektivitātes noteikšanai ar doto imitācijas modeli ir veikta virkne eksperimentu, salīdzinot imitācijas gaitā iegūtos lodes kustības trajektorijas datus ar un bez kvantētu stāvokļu interpolatora izmantošanas. 3.5. attēlā ir parādīti iegūtie starpības dati, salīdzinot etalontrajektorijas ($\Delta q = 1,0 \times 10^{-7}$) datus ar datiem, kas iegūti, imitāciju veicot ar lielāku parametra Δq vērtību.



3.5. att. Imitācijas modeļa darbības precizitāti raksturojoši bumbas kustības trajektorijas starpības dati $\Delta Y = Y_{1,0 \times 10^{-7}} - Y_{\Delta q}$ pie dažādām kvantēšanas soļa Δq vērtībām

Kā redzams, jo mazāka izvēlētā parametra Δq vērtība (lielāka imitācijas modeļa precizitāte), jo mazāks arī iegūtās trajektoriju starpības lielums, un tādējādi, salīdzināmo trajektoriju dati

vairāk tuvinās etalontrajektorijai. No 3.5. attēlā redzamajiem imitācijas modelēšanas rezultātiem var secināt, ka V-DEVS interpolatora izmantošana ļauj aptuveni 5 reizes uzlabot modeļa izejas precizitāti pie nemainīgas precizitātes parametra Δq vērtības.

3.4. Secinājumi

Sasniegtie rezultāti ir šādi:

- izstrādāta praktiska V-DEVS formālisma arhitektūra;
- izstrādāti divi V-DEVS formālisma realizācijas algoritmu varianti; pirmais algoritms balstās uz klasisko DEVS simulatoru specifikāciju, savukārt otrs algoritms ir balstīts uz viena universāla simulatora un prioritātes rindu izmantošanas principiem;
- izstrādāta modeļvadāma pieeja V-DEVS imitācijas modeļu izstrādei;
- izstrādāts V-DEVS vizualizācijas konveijers interaktīvai mijiedarbībai ar imitācijas modeli.

Galvenie secinājumi ir šādi:

- V-DEVS formālisma praktiskā realizācija un veiktās eksperimentālās pārbaudes parāda, ka piedāvātās V-DEVS teorētiskās koncepcijas ir pareizas un uz to bāzes ir iespējams izstrādāt reālu imitācijas modelēšanas sistēmu;
- izstrādāto simulatora algoritmu priekšrocība ir tā, ka tie nav tiešā veidā atkarīgi no izmantotās vizualizācijas sistēmas, jo vizualizācijas uzdevums tiek realizēts atomāro modeļu līmenī.
- izstrādātā kvantētu stāvokļu interpolatora izmantošana nepārtrauktu sistēmu imitācijā ļauj ievērojami palielināt vizualizācijas precizitāti, nepalielinot nepieciešamo skaitļošanas resursus;
- modeļvadāmā pieeja uzlabo un vienkāršo imitācijas modeļu izstrādes un verifikācijas procesus.

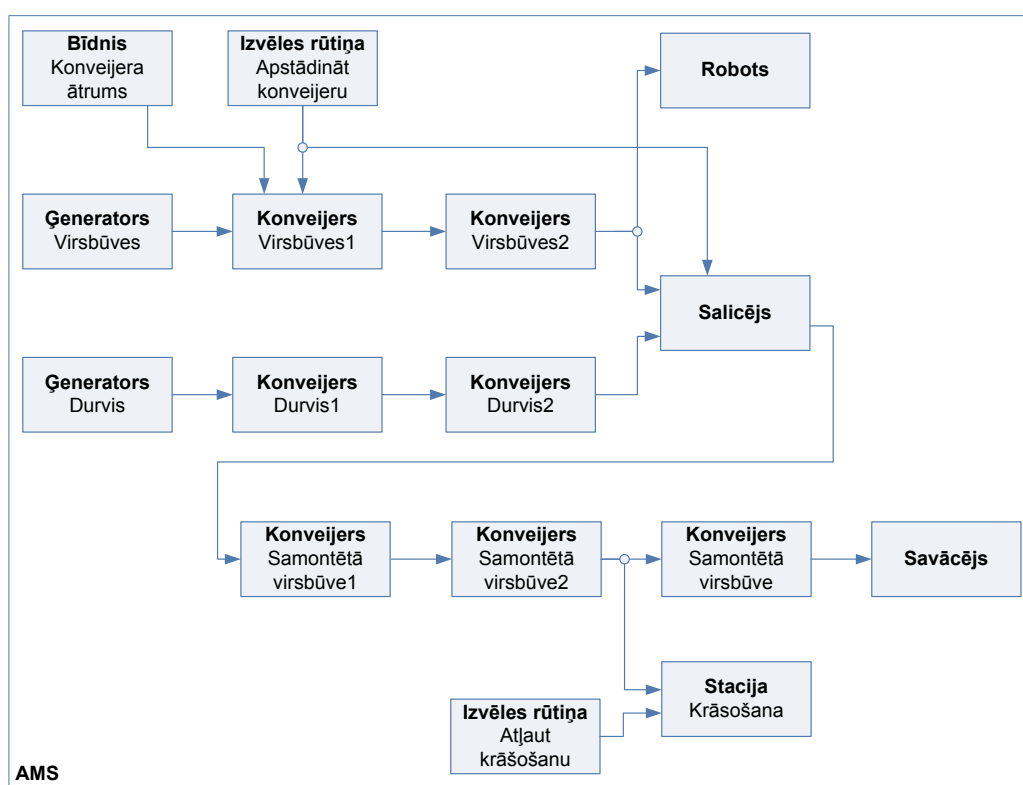
4. V-DEVS FORMĀLISMA PRAKTISKAIS PIELIETOJUMS DINAMISKU SISTĒMU IMITĀCIJAS MODELĒŠANĀ

Šajā nodaļā ir aprakstīts V-DEVS formālisma praktiskais pielietojums dinamisku sistēmu imitācijas modelēšanā, apskatot automatizētās ražošanas sistēmas imitācijas modeli. Galvenais imitācijas modeļa izstrādes mērķis ir parādīt izstrādātā V-DEVS formālisma praktiskā pielietojuma iespējas un eksperimentāli pārbaudīt realizēto algoritmu veikspēju. Apskatāmā ražošanas sistēmas modeļa apraksts un analīze tiek veikta, balstoties uz V-DEVS teoriju un koncepcijām, raksturojot modeļa arhitektūru, identificējot komponentus, to savstarpējo mijiedarbību un ietekmi, kā arī nepieciešamās specifikācijas tipu.

4.1. Automatizētās ražošanas sistēmas modelis

Lai ražošanas uzņēmumi spētu konkurēt globālā tirgus attīstības un konkurences apstākļos, tiem nepārtraukti ir jāattīsta un jāuzlabo savas ražošanas iespējas, ieviešot modernas *automatizētās ražošanas sistēmas* [6]. DEVS bāzētas pieejas pielietojanas pētījumi automatizēto ražošanas sistēmu analīzē ir realizēti arī iepriekš [7], taču V-DEVS formālismā sakņota imitācijas modelēšanas vide ietver gan diskretus, gan nepārtrauktus procesus, kādi neapšaubāmi noris automatizētajās ražošanas sistēmās.

Modeļa pamatstruktūru (4.1. attēls) veido ģeneratori, imitācijas entītiņu savācējs, interaktīvie elementi (bīdnis, izvēles rūtiņa), ražošanas produkcijas montāžas darbstacijas (krāsošanas stacija, montāžas robots, montāžas stacija jeb salicējs) un konveijeri produkcijas transportēšanai starp darbstacijām.

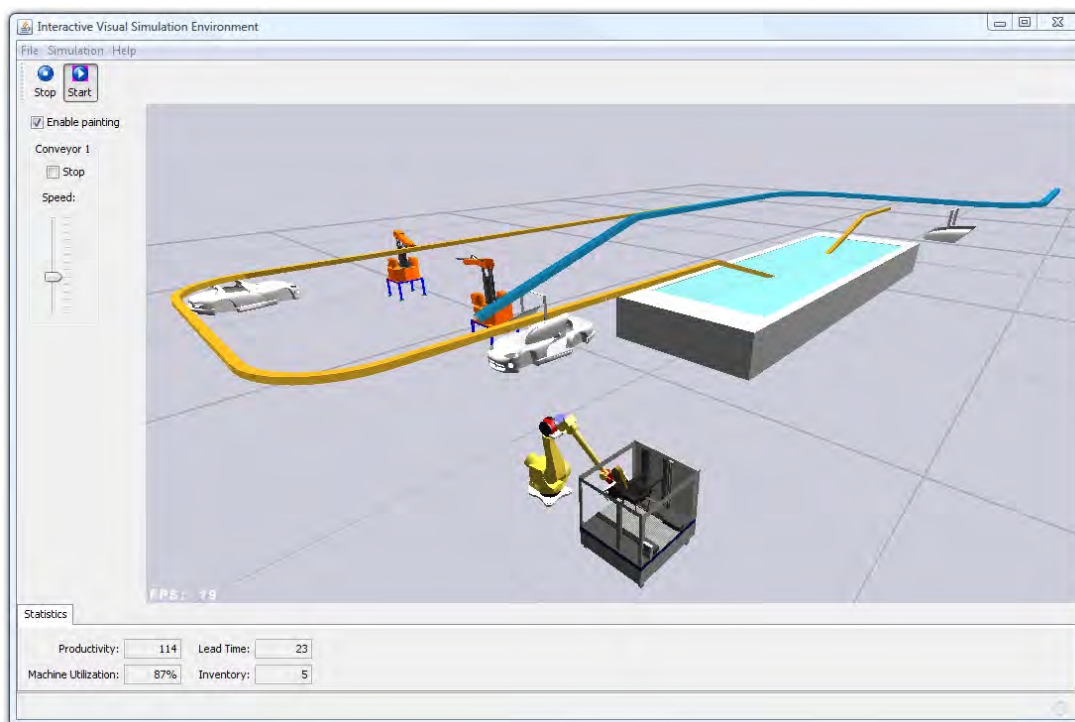


4.1. att. Automatizētās ražošanas sistēmas modeļa struktūra

Ģenerators modeļi ģenerē sistēmā ienākošo materiālu plūsmu - automašīnu virsbūves un durvis. Automašīnu virsbūves un durvis pa diviem dažādiem konveijeriem nonāk līdz salicēja modelim, kas modelē durvju montāžas procesu automašīnas virsbūvē. Tālāk pa citu konveijeru samontētā virsbūve virzās cauri krāsošanas stacijai, līdz nonāk savācējā. Savācēja modelis ir elements, kas veic saņemto entītiņu - samontēto automašīnas virsbūvju iznīcināšanu, kas atbilst materiālu plūsmas iziešanai ārpus modelējamās sistēmas robežām.

Lai pārbaudītu un nodemonstrētu apskatāmās ražošanas sistēmas imitācijas modeļa realizācijas iespējas esošā komerciālā imitācijas sistēmā, kā arī, lai to salīdzinātu ar izstrādāto V-DEVS imitācijas modelēšanas vides prototipu, ir veikta imitācijas modeļa izstrāde un tā eksperimentāla pārbaude Flexsim vidē. Veiktie eksperimenti parāda sistēmas konceptuālā modeļa adekvātumu, taču Flexsim vidi nav tiešā veidā iespējams salīdzināt ar V-DEVS sistēmas prototipa veikto veikspējas eksperimentu rezultātiem, jo Flexsim algoritmiskā realizācija un arhitektūra nav atvērta un pieejama izpētei.

4.2. attēlā parādīts imitācijas modeļa 3D attēls, kas izstrādāts ar V-DEVS imitācijas modelēšanas prototipu. No lietotāja viedokļa galvenās atšķirības un priekšrocības, salīdzinot ar tipiskām komerciālajām imitācijas modelēšanas sistēmām, ir kombinētas diskrētu notikumu un nepārtrauktu procesu imitācijas modelēšanas, kā arī nemodālas mijiedarbības iespējas ar modeli imitācijas procesa gaitā.



4.2. att. Automatizētās ražošanas sistēmas modelis V-DEVS vizuālās imitācijas modelēšanas vidē

4.2. Eksperimenti ar ražošanas sistēmas modeli

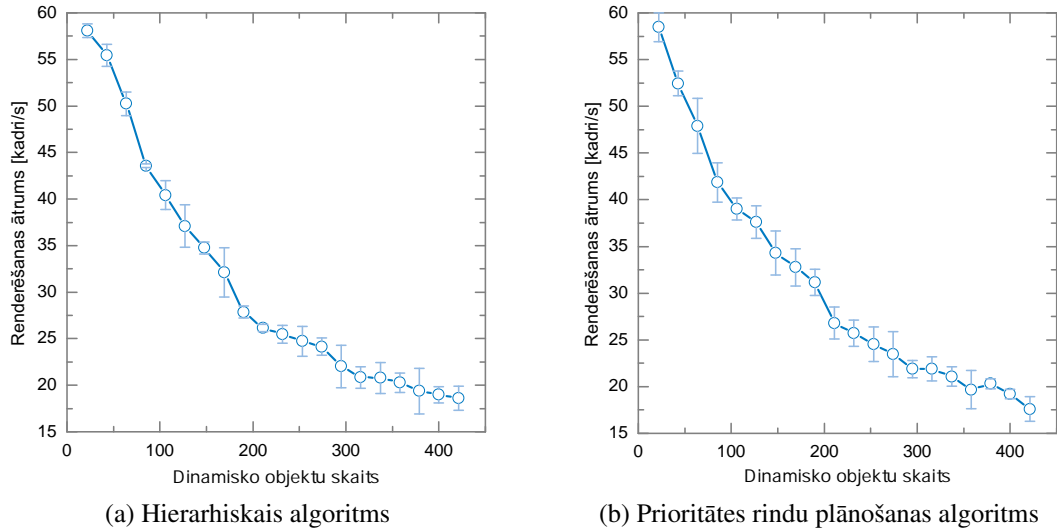
Imitācijas process ir integrēts ar reālā laika vizualizāciju, tādēļ rodas jautājums, kāda ir vizualizācijas ietekme uz imitācijas procesa veiktspēju. Pirmais eksperimentu cikls ir veikts atbildes gūšanai tieši uz šo jautājumu, šim nolūkam mainot konveijeru un ģeneratoru skaitu intervālā [6; 25]. 4.1. tabulā ir parādīta ģenerēto imitācijas entītiņu skaita atkarība no virsbūvju ģeneratoru un konveijeru skaita modelī.

4.1. tabula

Ģenerēto imitācijas entītiņu skaita atkarība no konveijeru skaita sistēmā

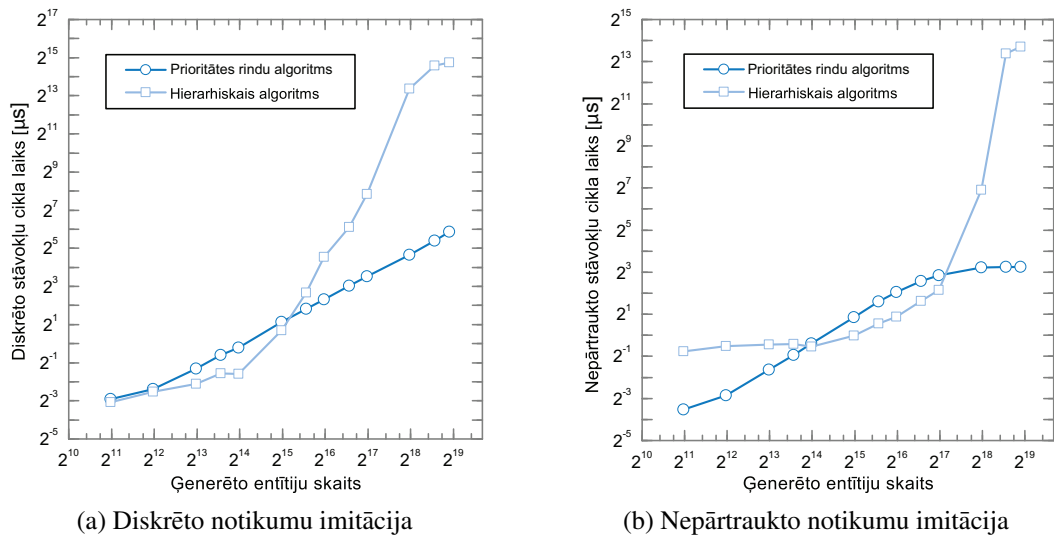
Konveijeru skaits	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Imitācijas entītiņu skaits	22	43	64	85	106	127	148	169	190	211
Konveijeru skaits	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Imitācijas entītiņu skaits	232	253	274	295	316	337	358	379	400	421

4.3. attēlā ir parādīta renderēšanas ātruma atkarība no ģenerēto imitācijas entītiņu jeb dinamisko objektu skaita modelī, pielietojot hierarhisko un prioritātes rindu algoritmus. Palielinot dinamisko objektu skaitu modelī, gan hierarhiskā, gan prioritātes rindu V-DEVS simulatora balstītā renderēšanas veikspēja samazinās, ko pamatā nosaka pielietotā datorgrafikas programmatūra un aparatūra.



4.3. att. Imitācijas modeļa renderēšanas ātruma atkarība no dinamisko objektu skaita modelī

4.4. attēlā ir parādīta diskrēto stāvokļu S^{discr} un nepārtraukto stāvokļu S^{cont} apstrādes cikla laika atkarība no ģenerēto imitācijas entītiņu skaita modelī. Palielinot ģenerēto entītiņu skaitu modelī, hierarhiskā V-DEVS simulatora algoritma veikspēja samazinās straujāk, nekā prioritātes rindu algoritma izmantošanas gadījumā.

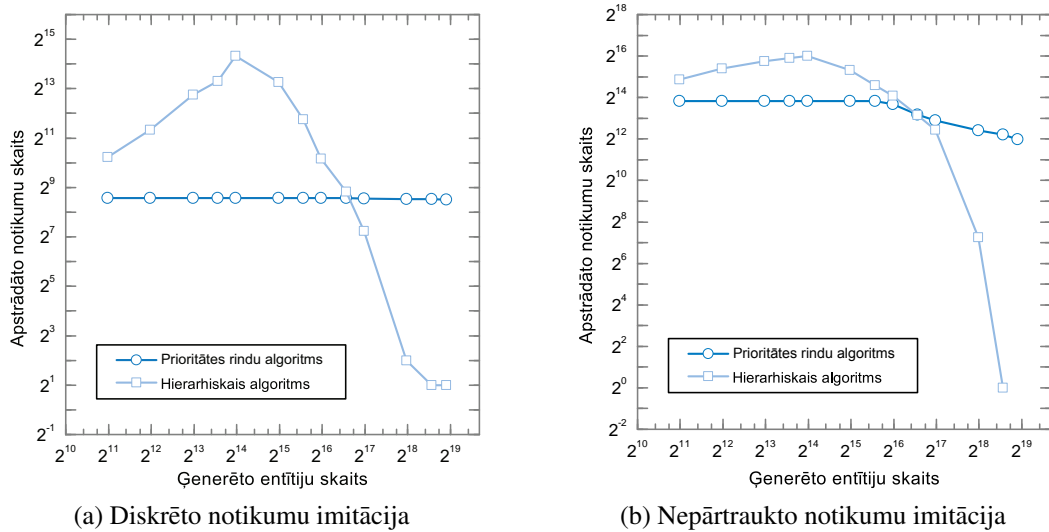


4.4. att. Diskrēto stāvokļu S^{discr} un nepārtraukto S^{cont} stāvokļu apstrādes cikla laika atkarība no ģenerēto imitācijas entītiņu skaita modelī

4.5. attēlā ir parādīta diskrēto un nepārtraukto stāvokļu notikumu skaita atkarība no ģenerēto imitācijas entītiņu skaita modelī. Hierarhiskā simulatora apstrādāto diskrēto un nepārtraukto

stāvokļu notikumu skaits ievērojami palielinās, pieaugot ģenerēto entītiju skaitam, līdz tiek sasniegts piesātinājuma punkts, kad imitācijas izpildes laika sistēma vairs nespēj apstrādāt visu ģenerētos notikumus. 4.5. attēlā šāds hierarhiskā simulatora diskrēto un nepārtraukto stāvokļu notikumu apstrādes piesātinājuma punkts ir pie 2^{14} ģenerēto entītiju skaita, pēc kura sāk samazināties apstrādāto notikumu skaits. Un tas nozīmē, ka šādi iegūtie imitācijas rezultāti vairs nav ticami, jo sistēma nespēj apstrādāt visus notikumus.

Savukārt prioritātes rindu algoritma diskrēto notikumu apstrādes veikspēja veikto eksperimentu ietvaros ir praktiski neatkarīga no ģenerēto entītiju skaita. Bet nepārtraukto stāvokļu apstrādes veikspēja prioritātes rindu algoritmam sāk samazināties pie 2^{16} ģenerēto entītiju skaita. Tas nozīmē, ka nepārtraukto procesu apstrādē prioritātes rindu algoritmam ir aptuveni $2^{16}/2^{14} = 4$ reizes lielāka veikspēja nekā hierarhiskajam simulatora algoritmam.



4.5. att. Diskrēto un nepārtraukto stāvokļu notikumu skaita atkarība no ģenerēto imitācijas entītiju skaita modelī

Apskatāmās automatizētās ražošanas sistēmas veikspējas statistiskie rādītāji tiek noteikti ar mērķi parādīt, ka izstrādātais V-DEVS formālisms un uz tā bāzētais imitācijas vides prototips ir pielietojams praktisku sistēmu imitācijas modelēšanā un ar to iegūtie statistiskie rezultāti ir adekvāti. Ar izstrādāto prototipu iegūto rezultātu adekvātuma pārbaudei tiek veikta to salīdzināšana ar līdzīgiem rezultātiem, kas iegūti ar komerciālu imitācijas modelēšanas līdzekli Flexsim.

Veikspējas statistisko rādītāju iegūšanai ir veikti 5 eksperimenti, mainot konveijeru ātrumu intervālā $[0, 1; 0, 5]$ m/s. Katrs eksperiments ir atkārtots 10 reizes, un katra imitācijas cikla garums ir izvēlēts atbilstošs 720 reālā laika ražošanas stundām jeb 30 dienām. 4.2. tabulā ir parādīti ar interaktīvās vizuālās imitācijas modelēšanas vides prototipu iegūtie ražošanas sistēmas veikspējas vidējie statistiskie rādītāji. Modelējamās automatizētās ražošanas sistēmas veikspējas statistisko rādītāju noteikšanā tiek izmantota darbos [1, 4, 18] aplūkotā metodika.

Ar V-DEVS imitācijas modelēšanas prototipu un Flexsim rīku iegūtie modelēšanas rezultāti ir līdzīgi, kas parāda, ka izstrādātais interaktīvās imitācijas modelēšanas prototips ļauj iegūt adekvātus imitācijas modelēšanas rezultātus.

V-DEVS vizuālās imitācijas modelēšanas vidē iegūtie automatizētās ražošanas sistēmas veikspējas vidējie statistiskie rādītāji

Konveijeru ātrums (m/s)	Samontēto virsbūvju skaits	Ražošanas izpildes laiks	Salicējs	
			Virsbūvju rindas garums	Durvju rindas garums
0,1	18097	68,86	0,38	0,47
0,2	23379	56,25	0,5	0,26
0,3	23294	51,6	0,55	0,23
0,4	22989	49,1	0,58	0,19
0,5	23747	47,83	0,7	0,26

4.3. Secinājumi

Sasniegtie rezultāti ir šādi:

- ir izveidots V-DEVS programmatūras prototipa un komerciālās sistēmas Flexsim salīdzinājums, balstoties uz izstrādāto automatizētās ražošanas sistēmas modeli;
- ir iegūti imitācijas modelēšanas sistēmas prototipa veikspējas mērījumi;
- ir iegūti automatizētās ražošanas sistēmas imitācijas modelēšanas statistiskie rezultāti.

Galvenie secinājumi ir šādi:

- V-DEVS formālismu ir iespējams pielietot praktisku interaktīvu imitācijas modelēšanas sistēmu izveidē, ko pierāda ar imitācijas programmatūras prototipu izstrādātā automatizētās ražošanas sistēmas modeļa eksperimentālie rezultāti;
- uz V-DEVS formālismu balstīta interaktīva vizuālā imitācijas modelēšanas sistēma ir efektīvi pielietojama un var konkurēt ar komerciālām programmatūras sistēmām sarežģītu dinamisku sistēmu imitācijas modelēšanā.
- neraugoties uz hierarhiskā algoritma vienkāršo konceptuālo arhitektūru, tas ir ar ievērojami mazāku veikspēju nekā uzlabotais prioritātes rindu algoritms. No tā izriet, ka, pieaugot imitācijas modeļa elementu un to savstarpējo saišu skaitam, prioritātes rindu V-DEVS simulators ir labāk piemērots nekā hierarhiskais algoritms.

DARBA GALVENIE REZULTĀTI UN SECINĀJUMI

Promocijas darbā tika izvirzīts mērķis, balstoties uz imitācijas modelēšanas un vizualizācijas integrācijas salīdzinošu pētījumu un neatrisināto problēmu identificēšanu, izstrādāt integrētu pieeju un metodes diskrētu notikumu un nepārtrauktu sistēmu imitācijas modelēšanai un vizualizācijai, tās praktiski realizēt programmatūras sistēmā un veikt izstrādātās sistēmas eksperimentālu pārbaudi. Izvirzītā mērķa sasniegšanai ir atrisināti šādi uzdevumi:

- imitācijas modelēšanas un vizualizācijas pieeju, metožu un sistēmu izpēti, kas ir ļāvusi identificēt to izstrādē un integrācijā neatrisinātos uzdevumus, kā arī definēt vispārīgas prasības interaktīvai vizuālai imitācijas modelēšanas videi;

- integrētas vizuālās imitācijas modelēšanas pieejas un metožu izstrāde iepriekš identificēto trūkumu novēršanai;
- uz izstrādātās pieejas balstītas diskrētu notikumu un nepārtrauktu sistēmu interaktīvas vizuālās imitācijas arhitektūras izstrāde un praktiskā realizācija;
- izstrādātās sistēmas eksperimentāla pārbaude tās praktiskās pielietojšanas iespēju noteikšanai.

Promocijas darba izstrāde ir ļāvusi sasniegt šādus galvenos teorētiskos rezultātus:

- pamatota diskrētu notikumu un nepārtrauktu sistēmu imitācijas modelēšanas un vizualizācijas integrācijas nepieciešamība;
- izstrādāts V-DEVS formālisms vizuālai interaktīvai diskrēto notikumu un nepārtrauktu sistēmu modelēšanai;
- ieviests vizualizācijas ietvara jēdziens integrētas vizuālās imitācijas modelēšanas konteksta definēšanai mijiedarbībā ar imitācijas un modelēšanas ietvaru;
- piedāvāta kombinēta pieeja kvantētu stāvokļu sistēmu imitācijas modelēšanas un vizualizācijas integrācijai un sinhronizācijai;
- izstrādāta modeļvadāma pieeja V-DEVS modelēšanai.

Promocijas darbā ir sasniegti šādi praktiskie rezultāti:

- izstrādāta arhitektūra, metodika un algoritmi V-DEVS formālisma praktiskai realizācijai, kas no tradicionālām imitācijas modelēšanas sistēmām atšķiras ar vienotu modelēšanas, imitācijas, vizualizācijas un interaktīvo elementu traktējumu, unificējot un vienkāršojot imitācijas modeļu izstrādi un izmantošanu;
- realizēts V-DEVS vizuālās interaktīvās imitācijas modelēšanas sistēmas prototips, pārbaudītas un nodemonstrētas tā iespējas.

V-DEVS imitācijas modelēšanas vides prototipa izstrāde un eksperimentālās pārbaudes rezultāti ļauj izdarīt šādus secinājumus:

- darbā piedāvātais V-DEVS vizualizācijas konveijers ļauj adaptēt gan scēnas grafa, gan klasiskā vizualizācijas konveijera sistēmas imitācijas modelēšanas uzdevumiem, apvienojot šīs arhitektūras vienotā sistēmā;
- izstrādātajam prioritātes rindu V-DEVS simulatora algoritmam ir lielāka efektivitāte nekā hierarhiskajam V-DEVS simulatoram, kas izstrādāts, balstoties uz klasisko DEVS formālisma imitācijas algoritmu, tādējādi prioritātes rindu algoritms ir labāk piemērots sarežģītu imitācijas modelēšanas uzdevumu risināšanai;
- V-DEVS sistēmas prototipa eksperimentālā pārbaude apliecina kvantētu stāvokļu interpolatora izmantošanas efektivitāti vizualizācijas nolūkiem nepārtrauktu sistēmu kvantētu stāvokļu imitācijas modelēšanā;
- modeļvadāmā pieeja uzlabo un vienkāršo imitācijas modeļa izstrādes un verifikācijas procesu.

Galvenie turpmāko pētījumu iespējamie virzieni ir šādi:

- V-DEVS formālisma pielāgošana dinamiskas struktūras sistēmu modelēšanai, kas ir nepieciešams arī tiešās izpildes V-DEVS vizualizācijas konveijera realizācijai;
- dalītās un paralēlās apstrādes principu realizācija V-DEVS balstītu sistēmu darbības nodrošināšanai daudzprocesoru un/vai tīmekļa vidēs;
- daudzlietotāju režīma atbalsts interaktīvā imitācijas izpildes vidē, nodrošinot dažādas piekļuves tiesības dažādām lietotāju grupām un sinhronizāciju starp lietotājiem;
- V-DEVS simulatora veikspējas uzlabošanas iespēju izpēte nepārtrauktu sistēmu imitācijas modelēšanā;
- kvantētu stāvokļu V-DEVS imitācijas stabilitātes pētījumi nelineāru nepārtrauktu sistēmu imitācijas modelēšanā;
- V-DEVS integrācija ar virtuālās / jauktās realitātes vizualizācijas tehnoloģijām.

LITERATŪRA

- [1] *Discrete-Event System Simulation*, Banks J., Carson J.S., L. N.B., Nicol D.M. - Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2005. - 4th ed. - 624 p.
- [2] Bell P., O'Keefe R. *Visual interactive simulation - history, recent developments, and major issues*// *Simulation*. - 1987. - No. 49. - Vol. 3. - 109–116 p.
- [3] Blundell B.G. *An Introduction to Computer Graphics and Creative 3-D Enviroments*. - London: Springer Verlag, 2008. - 501 p.
- [4] Borenstein D. *A visual interactive multicriteria decision analysis model for FMS design*// *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. - 1998. - No. 11. - Vol. 14. - 848–857 p.
- [5] Cellier F.E., Kofman E. *Continuous System Simulation*. - New York: Springer, 2006. - 643 p.
- [6] Choi B.K., Han K., Park T. *Object-oriented graphical modeling of FMSs*// *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*. - 1996. - Vol. 8. - 159–182 p.
- [7] Choi B.K., Park B.C., Park J.H. *A formal model conversion approach to developing a DEVS-based factory simulator*// *Simulation*. - 2003. - No. 8. - Vol. 79. - 440–461 p.
- [8] Cloud D., Rainer L. *Applied Modelling & Simulation: An Integrated Approach to Development and Operation*. - New York: AIAA American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1998. - 736 p.
- [9] Donald D.L. *A tutorial on ergonomic and process modeling using QUEST and IGRIP*// *WSC '98: Proceedings of the 30th conference on Winter simulation*. - Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society Press, 1998. - 297–302 p.
- [10] Fishwick P.A. *A visual object-oriented multimodeling design for physical modeling*. - Techn. rep., *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, 1997. - 22 p.

- [11] Frankel D.S. *Model Driven Architecture: Applying MDA to Enterprise Computing*. - Indianapolis: Wiley Publishing, 2003. - 352 p.
- [12] Hwang M.H., Choi B.K. *GK-DEVS: Geometric and kinematic DEVS formalism for simulation modeling of 3-dimensional multi-component systems*// Transactions of the Society for Modeling and Simulation International. - 2001. - No. 3. - Vol. 18. - 159–173 p.
- [13] Jain S. *Simulation in the next millenium*// *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference*. - Phoenix, Australia, AZ, 1999. - December 5-8. - 1478–1484 p.
- [14] Kofman E. *Discrete Event Based Simulation and Control of Continuous Systems*. - PhD thesis, Universidad Nacional de Rosario, Argentina, 2003. - 167 p.
- [15] Lektauers A. *A mixed reality framework for visualization and execution of DEVS-based simulation models*// *Proceedings of the 19th European Conference on Modelling and Simulation “Simulation in Wider Europe”, ECMS2005*. - Riga: Publishing House of Riga Technical University, 2005. - June 1-4. - 271–276 p.
- [16] Lektauers A., Merkuryev Y. *3D visual framework for modelling and simulation of supply chain systems*// *Scientific Proceedings of the eLOGMAR-M Project*. - Riga, 2006. - 141–150 p.
- [17] Marshall R., Kempf J., Dyer S., Yen C. *Visualization Methods and Simulation Steering for a 3D Turbulence Model of Lake Erie*// Riesenfeld R., Sequin C. (eds.): *Computer Graphics: 1990 Symposium on Interactive 3D Graphics*, vol. 24. - 1990. - 89–97 p.
- [18] *Sistēmu imitācijas modelēšanas tehnoloģija*, Merkurjevs J., Merkurjeva G., Pečerska J., Tolujevs J. - Rīga: Rīgas Tehniskās universitātes Datorzinātnes un informācijas tehnoloģijas fakultātes Informācijas tehnoloģijas institūts, 2008. - 120 p.
- [19] Praehofer H. *System Theoretic Foundation for Combined Discrete-Continuous System Simulation*. - PhD thesis, Department of Systems Theory, University of Linz, Austria, 1991. - 173 p.
- [20] Risco-Martín J.L., Mittal S., Zeigler B.P., de la Cruz J.M. *From UML state charts to DEVS state machines using XML*// *Proceedings of the Workshop on Multi-Paradigm Modeling: Concepts and Tools*, vol. 1 of *BME-DAAI Tech. Rep. Series*. - Budapest Univ. of Tech. and Economics Dep. Automation and Applied Informatics, 2007. - 35–48 p.
- [21] Rohrer M.W. *Seeing is believing: the importance of visualization in manufacturing simulation*// *WSC '00: Proceedings of the 32nd conference on Winter simulation*, vol. 2. - San Diego, CA, USA: Society for Computer Simulation International, 2000. - 1211–1216 p.
- [22] Schroeder W., Martin K., Lorensen B. *The Visualization Toolkit: An Object-Oriented Approach to 3D Graphics*. - Upper Saddle River, N.J.: Pearson Education, Inc., 2004. - 3rd ed. - 474 p.
- [23] Wagner P., Freitas C., Wagner F. *A new paradigm for visual interactive modeling and simulation*// *8th European Simulation Symposium - ESS'96*, vol. 1. - Genova, Italy: Society for Computer Simulation, 1996. - October 24-26. - 142–145 p.
- [24] Zeigler B.P. *Theory of Modelling and Simulation*. - New York: John Wiley & Sons, 1976. - 435 p.

- [25] Zeigler B.P. *Multifaceted Modelling and Discrete Event Simulation*. - London: Academic Press, 1984. - 372 p.
- [26] Zeigler B.P., Praehofer H., Kim T.G. *Theory of Modeling and Simulation: Integrating Discrete Event and Continuous Complex Dynamic Systems*. - San Diego, California: Academic Press, 2000. - 2nd ed. - 510 p.
- [27] Zhang J. *Visualization for Information Retrieval*. The Informational Retrieval Series. - Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. - 292 p.
- [28] Zinoviev D. *Mapping DEVS models onto UML models// Proceedings of the 2005 DEVS Integrative M&S Symposium*. - San Diego, CA, 2005. - April. - 101–106 p.
- [29] Бенкович Е., Колесов Ю., Сениченков Ю. *Практическое моделирование динамических систем*. - Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2002. - 464 стр.
- [30] Советов Б.Я., Яковлев С.А. *Моделирование систем*. - Москва: Высшая школа, 2001. - 343 стр.
- [31] Бусленко, Н.П. *Моделирование сложных систем*. - Москва: Наука, 1978. - 400 стр.
- [32] Растрингин, Л.А. *Адаптация сложных систем: методы и приложения*. - Рига: Зинатне, 1981. - 375 стр.