

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Ieva ZELTMATE

**INTELEKTUĀLAS SISTĒMAS IZSTRĀDE SAREŽĢĪTU SISTĒMU
STRUKTŪRMODELĒŠANAI**

Promocijas darba kopsavilkums

Rīga 2012

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Datorzinātnes un informācijas tehnoloģijas fakultāte
Lietišķo datorsistēmu institūts

Ieva ZELTMATE
Doktora studiju programmas „Datorsistēmas” doktorante

**INTELEKTUĀLAS SISTĒMAS IZSTRĀDE SAREŽĢĪTU SISTĒMU
STRUKTŪRMODELĒŠANAI**

Promocijas darba kopsavilkums

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

Rīga 2012

UDK 004.8(043.2)

Ze 500 i

Zeltmate Ieva. Intelektuālas sistēmas izstrāde sarežģītu sistēmu struktūrmodelēšanai. Promocijas darba kopsavilkums. RTU, 2012. – 49 lpp.

Iespiests saskaņā ar DITF LDI padomes 2012. gada 31. augusta lēmumu, protokols Nr. 78.



EIROPAS SAVIENĪBA

Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā „Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai”

ISBN 978-9934-507-07-6

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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2012.gada 10. decembrī Rīgas Tehniskās universitātes Datorzinātnes un informācijas tehnoloģijas fakultātē, Meža ielā 1/3, 202. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI:

Profesors, Dr.habil.sc.ing. Zigurds Markovičs
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

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

Asociētais profesors, PhD (datorzinātne) Dmitry Zinoviev
Safolkas universitāte, ASV

APSTIPRINĀJUMS

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

Ieva Zeltmate..... (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā un sastāv no ievada, 4 nodaļām un secinājumiem. Promocijas darbā ir 102 attēli un pamatteiksts ir 168 lappuses. Bibliogrāfiskais saraksts satur 153 nosaukumus. Darbam atsevišķā sējumā pievienoti 3 pielikumi.

SATURS

IEVADS	5
1. SAREŽĢĪTAS SISTĒMAS UN STRUKTŪRMODELĒŠANA	12
1.1. Problēmsfēras jēdzieni un to interpretācija	12
1.2. Sarežģītu sistēmu modelēšana	14
1.3. Intelektuālas sistēmas un to īpašības	16
1. nodaļas kopsavilkums un secinājumi	18
2. STRUKTŪRMODELĒŠANAS PIEEJAS APRAKSTS	18
2.1. Struktūras modeļu sintakse un semantika.....	19
2.2. Transformācijas starp struktūras modeļiem.....	25
2. nodaļas kopsavilkums un secinājumi	27
3. FREIMU KOPAS LIETOJUMS STRUKTŪRMODELĒŠANĀ UN SISTĒMAS I4S DARBĪBAS PRINCIPI.....	28
3.1. Freimu kopas apraksts un lietojums	28
3.2. Sistēma I4S un transformācijas no freimu kopas	31
3. nodaļas kopsavilkums un secinājumi	33
4. PRAKTISKA PIEMĒRA REALIZĀCIJA SISTĒMĀ I4S	33
4.1. Zināšanu iegūšana un atspoguļošana sistēmā I4S	34
4.2. Robota AGR8 struktūrmodelēšana un analīze ar I4S.....	36
4. nodaļas kopsavilkums un secinājumi	39
DARBA KOPĒJIE REZULTĀTI UN SECINĀJUMI.....	40
BIBLIOGRĀFISKAIS SARAKSTS.....	41

IEVADS

Sistēmas, ar ko cilvēki mūsdienās sastopas ikdienā, raksturo sarežģīta struktūra un darbības principi. Strādājot ar sistēmām, kā arī pētot un risinot ar tām saistītās situācijas, cilvēkiem pastāvīgi ir nepieciešams izdarīt izvēli un pieņemt lēmumus. Sarežģītība kļūst aktuāla brīdī, kad ir jāizprot sarežģītas sistēmas [HOR 1995, VIC 2002, ASH 2004, JOH 2009], lai veiktu adekvātu lēmumu pieņemšanu. Ar izpratni tiek domāta situācija, kad cilvēkam ir pieejams sistēmas modelis (iespējams domās), kurā ir skaidra sistēmas struktūra un funkcionēšanas mehānismi, kas ļauj loģiski un objektīvi spriest par sistēmu [SIM 1987, ASH 2007, SOK 2010]. Augot sistēmu sarežģītībai, arvien aktuālāka kļūst sistēmu un ar tām saistīto problēmu un situāciju iezīmju izpēte un likumsakarību analīze, kas ir būtiska lēmumu pieņemšanas procesā [CAR 2004]. Analīze tiek veikta, balstoties uz indivīda zināšanām, pieredzi un izpratnes spējām, tomēr cilvēka spējas uztvert un izprast ir ierobežotas, jo vidēji indivīds vienlaicīgi var apskatīt līdz septiņām neatkarīgām informācijas daļām [BAR 1997, YOU 2007]. Ja sistēmas sarežģītība pārsniedz cilvēka prāta uztveres spēju robežu, tad, veicot sistēmas struktūras un likumsakarību izpēti, nav iespējams sasaistīt (organizēt) sistēmas elementus, kā arī nav iespējams sasaistīt cēloņus ar sekām. Līdz ar to cilvēks sistēmu vairs nespēj uztvert kā vienu veselu un izprast [BAR 1997, RIC 2000, ASH 2007]. Modelēšanas teorija ir attīstījusies, ņemot par pamatu jēdzienu „organizētība” [KRI 1986]. Lai analizētu sarežģītas sistēmas, izmanto sistēmu modelēšanu un imitāciju ar datoru, lietojot piemērotus rīkus [JOS 2000, WEA 2004, VAZ 2009], kas veicina izpratni par pētāmo objektu un atbalsta lēmumu pieņemšanu [RIC 2000].

Mūsdienās informācijas un komunikācijas tehnoloģijas (IKT) nodrošina pamata infrastruktūru sociālos un ekonomiskos procesos un ir būtiskas, lai veicinātu inovāciju rūpniecības nozarēs. IKT ir kļuvušas par pamatnosacījumu dažādu problēmsfēru izpētē, attīstībā un inovācijā [NGU 2010, INF 2011]. Pieaugot IKT lietojumam un aktualitātei atbilstoši pieaug arī nepieciešamība pēc esošo tehnisko risinājumu novērtēšanas un jaunu risinājumu izstrādes. Šajos procesos būtiska loma ir sarežģītu tehnisku sistēmu izpētei [INF 2011, PEI 2011]. Prasības pret rīku un pieeju, kas ļauj īstenot sistēmas modelēšanu, dotajā gadījumā nosaka sarežģītu tehnisku sistēmu specifika un par tām pieejamā informācija [GRU 1997a, KHA 2010]. Galvenās sarežģītu tehnisku sistēmu īpašības ir: daudzveidīgas komponentes un mijiedarbības starp tām, grūti analizējama hierarhiska struktūra un sarežģīta uzvedība. Zināšanas par šādām sistēmām bieži vien ir vairākiem ekspertiem nevis tikai vienam [GRU 2002, KHA 2010].

Rīgas Tehniskajā universitātē ir izstrādāta struktūrmodelēšanas pieeja, kas ir piemērota sarežģītu tehnisku sistēmu struktūrmodelēšanai un analīzei normālos funkcionēšanas apstākļos, kā arī kļūdu gadījumā. Pieejai ir dažādas priekšrocības: tā ir piemērota struktūru modelēšanai nepilnīgas informācijas apstākļos, modelēšanā tiek izmantota grafiskā notācija un tā ļauj pētīt dažādus sistēmas morfoloģiskos un funkcionālos aspektus. Tomēr pieeja nav implementēta atbilstošā datorsistēmā, kas ļautu veikt automatizētu modeļu izveidi. Lai sarežģītu sistēmu struktūrmodelēšanu varētu veikt ar datoru, pieeja ir jāimplementē intelektuālā sistēmā [GRU 1997a, GRU 2002]. Tas ir būtisks priekšnosacījums, lai iegūtu, atspoguļotu un rezultatīvi apstrādātu zināšanas par sarežģītām sistēmām, kas piemīt dažādiem indivīdiem un dažādos laikos, un īstenotu automatizētu sistēmas struktūras modeļu izveidi. Lai izveidotu atbilstošu intelektuālu sistēmu, ir jānosaka kopsakarības starp sarežģītām sistēmām, to modelēšanas principiem un izvēlētajās pieejas aspektiem.

Tēmas aktualitāte

Promocijas darba tēmas aktualitāte ir saistīta ar strauji augošu sistēmu sarežģītību un šādu sistēmu lomu informācijas un komunikācijas tehnoloģiju (IKT) pielietojumā. IKT ir būtiskas, lai uzlabotu produktivitāti un veicināti attīstību rūpniecības nozarēs un zinātnē, kā arī apmierinātu sabiedrības prasības, attiecībā uz publiskiem pakalpojumiem (piemēram, veselību, izglītību un transportu). Līdz ar to IKT izpēte ir viena no Eiropas savienības septītās ietvarprogrammas (FP7) prioritātēm 2013.gadā [EUR 2012]. Sarežģītu tehnisku sistēmu izmantošana ir izplatīta gan sabiedrībā, gan rūpniecības nozarēs un zinātnē, lietojot dažādas IKT. Lai šādas sistēmas veidotu, pārvaldītu un pilnveidotu, ir jāveic to izpēte, izmantojot atbilstošas pieejas un rīkus. Modelis ir galvenais izpētes līdzeklis sarežģītu sistēmu gadījumā [SKY 2006, YOU 2007, SOK 2010]. Sarežģītām sistēmām piemīt specifiskas īpašības, kas ierobežo modelēšanas pieeju izvēli. Attīstot IKT, aug modelēšanas iespējas. Lai gan ir izstrādātas daudzas pieejas un rīki, sarežģītu sistēmu uzbūves un funkcionēšanas, kā arī uzvedības modelēšana nav pilnībā atrisināta, jo parasti katra aspekta modelēšanai lieto savu matemātisko aparātu. Lai šo trūkumu novērstu, pagājušā gadsimta 70. gados tika radīta struktūrmodelēšanas pieeja. Pieejā tika izstrādāti sarežģītu sistēmu uzbūves un funkcionēšanas modeļu pamatprincipi un struktūras analīzes metodes. Struktūrmodelēšanā piedāvātās metodes un algoritmi, ļauj risināt ar sarežģītību saistītās problēmas, attiecībā uz tehniskām sistēmām ar fiziski daudzveidīgiem elementiem [GRU 1997b]. Tomēr pieejā aprakstītās iespējas nebija implementētas rīkā, kā arī nebija izstrādāti algoritmi modeļu automātiskai ģenerēšanai ar datoru (modeļus veidoja manuāli). Papildus no

struktūrmodelēšanas pirmsākumiem ir parādījušies jauni sarežģītu sistēmu aspekti, kas jāmodelē. Minētās problēmas ir risinātas šajā promocijas darbā.

Promocijas darba mērķis

Darba mērķis ir izstrādāt zināšanu izgūšanas un atspoguļošanas shēmu un ieviest to intelektuālā datorsistēmā, kas nodrošina sarežģītu tehnisku sistēmu ar heterogēniem elementiem struktūrmodelēšanu, īstenojot modeļu automātisku ģenerēšanu, kā arī aprobēt intelektuālu sistēmu, kā piemēru lietojot konkrētu sarežģītu sistēmu.

Darba uzdevumi

Promocijas darba mērķa sasniegšanai ir izvirzīti šādi uzdevumi:

- Izpētīt sarežģītu un intelektuālu sistēmu uzbūves un darbības principus un identificēt īpašības, kas ir jāņem vērā, veicot sistēmas modelēšanu;
- Izanalizēt struktūrmodelēšanas pieejas pašreizējās iespējas un noteikt tās trūkumus, kas ir būtiski intelektuālas datorsistēmas izstrādē;
- Pilnveidot struktūras modeļu sintaksi un semantiku, kā arī modeļu transformācijas algoritmus;
- Izstrādāt zināšanu izgūšanas un atspoguļošanas shēmu sarežģītu sistēmu struktūrmodelēšanas nodrošināšanai, ko var implementēt intelektuālā datorsistēmā;
- Izstrādāt transformācijas algoritmus, lai automatizētu struktūras modeļu izveidi;
- Izstrādāt intelektuālas datorsistēmas arhitektūru un veikt tās praktisko realizāciju, iekļaujot tajā struktūras modelēšanas un analīzes metodes;
- Pārbaudīt izstrādātās datorsistēmas iebūvēto funkcionalitāti un tās piemērotību struktūrmodelēšanas mērķu īstenošanai, realizējot tajā reālās pasaules sistēmas struktūras modelēšanu.

Pētījuma objekts

Darba pētījumu objekts ir struktūrmodelēšanas pieeja, kas piemērota sarežģītu tehnisku sistēmu ar heterogēniem elementiem modelēšanai.

Pētījuma priekšmets

Promocijas darba pētījuma priekšmets ir intelektuālas datorsistēmas arhitektūra un tās realizācija, kas ļauj īstenot sarežģītu sistēmu struktūrmodelēšanu un analīzi.

Zinātniskais jaunieguvums

Darba zinātniskais jaunieguvums ir šāds:

- Ir izstrādāta zināšanu izgūšanas un atspoguļošanas shēma – freimu kopa, kas ir implementēta intelektuālā sistēmā un nodrošina ekspertu zināšanu izgūšanu un atspoguļošanu par sarežģītām sistēmām, kā arī ļauj īstenot iegūto zināšanu saglabāšanu un apstrādi;
- Ir izstrādāti astoņi transformācijas algoritmi no freimu kopas uz morfoloģiskās un funkcionālās struktūras modeļiem, kas ir implementēti intelektuālā sistēmā sarežģītu sistēmu struktūrmodelēšanai (I4S) un nodrošina struktūrmodelēšanā aprakstīto struktūras modeļu automatizētu izveidi un vizualizāciju;
- Ir izstrādāta intelektuālas sistēmas arhitektūra sarežģītu sistēmu struktūrmodelēšanai, kas realizēta I4S un nodrošina izpētes sistēmas struktūras modeļu automatizētu izveidi, kā arī struktūras topoloģisko un kvalitatīvo analīzi.

Teorētiskā vērtība

Darba teorētiskā vērtība ir šāda:

- Struktūras modeļiem ir izstrādāti jauni pamatelementi (loģiskie operatori), izveidots to apraksts un vizualizēts attēlojums, kā arī pārbaudītas loģisko operatoru pielietošanas iespējas;
- Izstrādāts papildus morfoloģiskā struktūras modeļa pamatelementa apzīmējums, kas ļauj noteikt vai atspoguļotais sistēmas objekts ir elements vai komponente;
- Izveidota notācija jaunam funkcionālās struktūras modelim uzvedības telpā;
- Pilnveidota struktūras modeļu sintakse un semantika un transformācijas algoritmi starp struktūras modeļiem;
- Izstrādāta zināšanu izgūšanas un atspoguļošanas shēma un transformācijas algoritmi no freimu kopas uz struktūras modeļiem;
- Izstrādāta intelektuālas sistēmas arhitektūra sarežģītu sistēmu struktūrmodelēšanai.

Praktiskā nozīmība

Pētījumu praktiskā nozīmība ir šāda:

- Zināšanu izgūšanas un atspoguļošanas shēma – freimu kopa ir implementēta intelektuālas sistēmas arhitektūrā, kas ļauj netikai izgūt un atspoguļot eksperta zināšanas, bet arī saglabāt tās tā, lai zināšanas var koplietot, atkārtoti pielietot, kā arī izmantot automatizētai struktūras modeļu konstruēšanai un struktūras analīzei;

- Izveidotā intelektuālas sistēmas I4S arhitektūra ir praktiski īstenota programmatūras veidā, tādējādi pirmo reizi praktiski realizējot intelektuālu sistēmu, kas sevī ietver visus struktūmodelēšanas pieejas aspektus – gan struktūras modeļu izveidi un attēlošanu, gan struktūras analīzi;
- Pārbaudīta izstrādātās sistēmas I4S darbība un atbilstība struktūmodelēšanas mērķiem, atspoguļojot tajā zināšanas par sarežģītu tehnisku sistēmu – robots AGR8 un veicot izpētes sistēmas struktūras modeļu ģenerēšanu, kā arī struktūras analīzi.

Darba aprobācija

Par promocijas darba galvenajiem rezultātiem referēts 4 starptautiskās konferencēs:

- 1) 2011. gada 12.–14. septembris. The 10th International Conference on Modeling and Applied Simulation. Roma, Itālija.
- 2) 2010. gada 6.–9. aprīlis. International multi-conference on complexity, informatics and cybernetics (IMCIC 2010). Orlando, Amerikas Savienotās Valstis.
- 3) 2008. gada 13.–15. oktobris. IADIS International Conference on Cognition and Exploratory Learning in Digital Age (CELDA 2008). Freiburga, Vācija.
- 4) 2008. gada 17.–19. septembris. The 5th International Mediterranean Modelling and Latin American Modeling Multiconference, The international Workshop on Modelling & Applied Simulation. Amantea, Itālija.

Turklāt par atsevišķiem ar promocijas darbu saistītiem rezultātiem ir referēts konferencēs:

- 5) 2005. gada 16.–17. jūnijs. The 6th International Conference on Computer Systems and Technologies (CompSysTech 2005). Varna, Bulgārija.
- 6) 2005. gada 1.–4. jūnijs. The 19th European Conference on Modelling and Simulation (ECMS 2005). Rīga, Latvija

Promocijas darba ietvaros veikto pētījumu rezultāti ir atspoguļoti 5 publikācijās starptautiskos zinātniskos izdevumos:

- 1) Zeltmate I. Logical Operator Usage in Structural Modelling, In: Proceedings of the 10th International Conference on Modeling and Applied Simulation, 2011, Rome, Italy, pp. 338-346.
- 2) Zeltmate I., Grundspenkis J. An extension of frame-based knowledge representation schema, In: Proceedings of International Multi-conference on Complexity, Informatics

and Cybernetics (IMCIC 2010), Vol I, 2010, Orlando, USA, pp. 401-406. (indeksēts: IIS, KGCM 2010, Google scholar).

- 3) Zeltmate I., Grundspenkis J., Kirikova M., Prototype for the Knowledge Representation Supporting Inter-institutional Knowledge Flow Analysis, Chapter 6, Learning and Instruction in the Digital Age, Springer, 2010, pp. 87-99. (indeksēts: SpringerLink, Google scholar).
- 4) Zeltmate I., Grundspenkis J. Formal Method of Functional Model Building Based on Graph Transformations. In: Proceedings of the 5th International Mediterranean and Latin American Modeling Multiconference, The international Workshop on Modelling & Applied Simulation, 2008, Amantea, Italy, pp. 140-147.
- 5) Zeltmate I., Grundspenkis J., Kirikova M., The Challenges in Knowledge Representation for Analysis of Inter - Institutional Knowledge Flows. In: Proceedings of the IADIS International Conference on Cognition and Exploratory Learning in Digital Age (CELDA 2008), 2008, Freiburg, Germany, pp. 145-152. (indeksēts: IADIS, Google scholar).

Papildus promocijas darba galveno rezultātu publicēšanai darba autorei vēl ir šādas ar promocijas darba tematiku saistītas publikācijas:

- 6) Valkovska I., Grundspenkis J. Development of Frame Systems Shell for Learning of Knowledge Representation Issues. In: Proceedings of the 6th International Conference on Computer Systems and Technologies (CompSysTech 2005), pp. IV.11.-1 – IV.11.-6. (indeksēts: ECET).
- 7) Valkovska I., Grundspenkis J. Representation of Complex Agents by Frames for Simulation of Internal Relationships in Structural Modelling. In: Proceedings of the 19th European Conference on Modelling and Simulation (ECMS 2005), 2005, pp. 151-157. (indeksēts: ECMS).
- 8) Graudina V., Grundspenkis J., Valkovska I. Usage of Frame System for Modelling of Intelligent Tutoring System Architecture. In: Annual Proceedings of Vidzeme University College. ICTE in Regional Development. Valmiera, 2005, pp. 105-109 (indeksēts: EBSCO HOST).

Promocijas darba rezultāti ir iekļauti arī 2 zinātnisko projektu atskaitēs. Šie projekti ir:

- 1) „Jaunas informācijas tehnoloģijas balstītas uz ontoloģijām un modeļu transformācijām” (projekta vadītājs J.Bārzdiņš (Latvijas Universitātes

Matemātikas un informātikas institūts), 2010.-2013.gads, Valsts Pētījumu programmas „Inovatīvu daudzfunkcionālu materiālu, signālapstrādes un informātikas tehnoloģiju izstrāde konkurētspējīgiem zinātņu ietilpīgiem produktiem” projekts).

- 2) Rīgas Tehniskās universitātes pētniecības projekts (projekta vadītāja M.Kirikova), „Starpinstitucionālas zināšanu plūsmas atbalsta sistēmas prototipa izstrāde”, 2007.-2008. gads.

Darba struktūra

Promocijas darbs sastāv no ievada, 4 nodaļām, secinājumiem, bibliogrāfiskā saraksta un 3 pielikumiem. Promocijas darba pamatteksts satur 168 lappuses un 102 attēlus. Bibliogrāfiskajā sarakstā ir 153 nosaukumu informācijas avoti.

Ievadā ir aprakstīta sarežģītu sistēmu izpētes nozīmība un pamatota veikto pētījumu aktualitāte, formulēts darba mērķis un uzdevumi, aprakstīta pētījumu zinātniskā novitāte, iegūtie teorētiskie rezultāti un to praktiskā nozīmība.

Darba *1. nodaļā* ir izanalizētas sarežģītas sistēmas un identificētas to galvenās īpašības, kas ir būtiskas šādu sistēmu modelēšanā. Ir aprakstītas struktūrmodelēšanas iespējas un ierobežojumi un konstatēts, ka, lai atbalstītu pieejas mērķu īstenošanu, to ir nepieciešams implementēt intelektuālā sistēmā. Tālāk ir izanalizēta intelektuālu sistēmu uzbūve un tās darbības mehānismi.

Darba *2. nodaļa* ir veltīta struktūrmodelēšanas pieejas detalizētam aprakstam. Tajā ir aplūkota struktūras modeļu notācija un aprakstīta esošo un jaunizveidoto pamatelementu sintakse un semantika. Nodaļā ir aprakstītas transformācijas starp struktūras modeļiem, ievērojot loģisko operatoru lietojumu.

Darba *3. nodaļā* ir skaidrots freima jēdziens, dota tā struktūras un pielietojuma analīze, ar mērķi izstrādāt zināšanu izgūšanas un atspoguļošanas shēmu. Balstoties uz veikto analīzi, ir izveidota freimu kopa, kas ir implementēta intelektuālā sistēmā I4S un atbalsta struktūras modeļu automātisku konstruēšanu. Ir aprakstīti izstrādātās sistēmas I4S uzbūves un darbības pamatprincipi, kā arī transformācijas no freimu kopas uz struktūras modeļiem.

Darba *4. nodaļā* ir izpētīta sarežģītas tehniskas sistēmas – robota AGR8 uzbūve un darbības principi un veikta dotās sistēmas struktūras modelēšana, lai pārbaudītu izveidotās sistēma I4S funkcionalitāti. Praktiskā piemēra realizācija apstiprina sarežģītu tehnisku sistēmu struktūrmodelēšanas un analīzes iespējas izstrādātajā sistēmā I4S.

Darba *noslēguma daļā* ir izklāstīti promocijas darba galvenie rezultāti un secinājumi, kā arī doti iespējamie turpmāko pētījumu virzieni.

Darbam ir pievienoti 3 *pielikumi*: 1. Freimi un to interpretācija dažādos literatūras avotos; 2. Loģiskie operatori un struktūras modeļi; 3. Sistēmas I4S datu bāzes un lietojuma apraksts.

1. SAREŽĢĪTAS SISTĒMAS UN STRUKTŪRMODELĒŠANA

Apstākļu kopums, kas ietekmē cilvēku dzīvi un darbības, kļūst arvien daudzveidīgāks un plašāks. Cilvēki izstrādā, vada un uztur arvien sarežģītākas sistēmas, tas ir, sastopas ar strauji augošu sarežģītību. Pirmā nodaļa ir veltīta problēmsfēras jēdzienu identificēšanai, sarežģītu sistēmu īpašību un to modelēšanas iespēju analīzei, kā arī intelektuālu sistēmu darbības principu izpētei, ar mērķi noteikt prasības, kas ir jāievēro intelektuālas sistēmas sarežģītu sistēmu struktūrmodelēšanai izstrādē.

1.1. Problēmsfēras jēdzieni un to interpretācija

Sistēmu definē kā elementu un attieksmju kopu, kas nosaka sistēmas eksistenci [BER 1969, ACK 1971, ROS 1979, CHU 1979, BEE 1995, AMA 2004, SKY 2006, BOP 2008, SOK 2010]. Neskatoties uz to, kādā abstrakcijas līmenī sistēmu pēta, to var aplūkot kā sastāvošu no objektiem [HAL 1968, AMA 2004, WEI 2009] vai daļām [KRI 1986, BAR 1997, AST 1996]. Daļa ir elements vai komponente, kas ir būtiska apskatītajam objektam [OXF 2009]. Jēdziens „elements” attiecas uz sistēmas primitīviem (sastāvdaļām) jeb pamatelementiem; monolītām daļām vai daļām, kurām neveic dekompozīciju [YOU 2007, OXF 2009, AST 1996]. Jēdzienu „komponente” attiecina uz saliktu sastāvdaļu (apakšsistēmu), kurai var veikt dekompozīciju [OXF 2009]. Dekompozīcija ir konceptuāla vai fiziska metode, kas ļauj izpētes objektu sadalīt mazākās sastāvdaļās [BRO 1998, HAK 2006] un tādējādi vienkāršot skatījumu uz sistēmu un izprast katru izvēlēto sistēmas līmeni.

Sistēmai un tās daļām ir noteikta struktūra [YOU 2007], kas raksturo uzbūvi [BEE 1995, GRU 1999]. Sistēmas daļām var būt atšķirīgi izmēri un, tās var būt gan viendabīgas (homogēnas) – tādas, kurām nav atšķirīgu iezīmju, gan neviendabīgas (heterogēnas) – ar atšķirīgām elementu un/vai struktūras iezīmēm. Struktūra ir saistība starp daļām, kas līdz ar daļu identitāti, veido vienotu veselu, ņemot vērā to, ka starp daļām pastāv noteikta kārtība [MAT 1974, OXF 2009]. Mijiedarbības un saites starp sistēmas daļām ir tikpat būtiskas kā pašas daļas [ROS 1979]. Mijiedarbības veido noteiktu organizētību sistēmā. Organizētību definē kā sistēmas iezīmi, kuru raksturo struktūra, kas ir mērķtiecīgi izveidota, lai realizētu

noteiktu funkcionalitāti [MAT 1974, HEY 2001, YOU 2007]. Tiek minēts, ka sistēmas struktūra ir relatīvi nemainīga laikā [GRU 1997a, GRU 1997b, MOU 2009], ar to ir domāta struktūra, kas atbilst sistēmas organizētībai [MAT 1974, GRU 1997a, BAR 1997, SKY 2006, APP 2011]. Ja veids, kā sistēma ir organizēta, paliek nemainīgs, kad sistēmas struktūra mainās (piemēram, sistēmai attīstoties un mācoties), tad sistēma paliek tā pati, nezaudējot savu identitāti [MAT 1974, GRU 1997a, BAR 1997, SKY 2006]. Veids, kā sistēma ir organizēta, atspoguļo to kā vienotu veselu jebkurā telpā, bet struktūra veido konkrētu vienumu sistēmas komponentu telpā [MAT 1974].

Cilvēki saskaras ar sarežģītām sistēmām dažādos veidos: tās projektējot, izstrādājot, analizējot, pilnveidojot, kā arī ekspluatējot un pārvaldot. Jēdziens „sarežģīts” ir multidimensionāls un multidisciplinārs [SIM 1962, HOR 1995, MCC 2000, RIC 2001, WOO 2004, HEY 2008, JOH 2009], un to skaidro, izmantojot tādas iezīmes kā: „sastāvošs no savstarpēji saistītām vai savītām daļām” un „grūti izprotams vai analizējams” [BAR 1997, HEY 2008, OXF 2009]. Jēdzienu „sarežģīts” attiecina uz sistēmas stāvokli, kad daļas ir savstarpēji integrētas, veidojot vienu veselu, bet daļu daudzums un/vai daudzveidība ir pārāk liela, lai šādu sistēmu varētu skaidrot un izprast vienkāršos, vispārpieņemtos veidos [MCC 2000]. Sarežģītu sistēmu izpēti un ar to saistīto pieeju attīstības mērķis ir izprast un atspoguļot esošās sistēmas tā, lai tās varētu mainīt, tādējādi radot jaunas sistēmas, kurām ir pielietojums dažādās dzīves sfērās [BAR 1997, HEY 2008].

Jēdzienam „sarežģīta sistēma” nav vienotas definīcijas [SIM 1962, HOR 1995, BAR 1997, VIC 2002, HAK 2006, SKY 2006], tomēr pastāv dažādi skaidrojumi:

- Sarežģīta sistēma sastāv no daudzām un dažādām savstarpēji saistītām daļām, kas dinamiski mijiedarbojas dažādos veidos [SIM 1962, MAT 1974, GRU 1972, ROS 1979, ASH 1981, BAR 1997, WHI 1999, EDM 1999, RIC 2000, GLO 2002, HAK 2006, SKY 2006, JOH 2009].
- Sarežģītu sistēmu raksturo grūti analizējama struktūra, saites un daudzpusīgi funkcionalitātes kritēriji [ROS 1979, BOU 2004].
- Sarežģītai sistēmai ir daudzveidīga (tīklveida un hierarhiska) [HOR 1995, BAR 1997] un sadalāma (var veikt dekompozīciju) struktūra [HOR 1995].
- Sarežģītas sistēmas daļas ir organizētas dažādos hierarhijas līmeņos, un pastāv daudzveidīgas saites gan starp atsevišķiem elementiem, gan starp dažādiem hierarhijas līmeņiem [SIM 1962, ROS 1979, BAR 1997, VIC 2002, SKY 2006,

YOU 2007, HEY 2008]. Katrā hierarhijas līmenī var saskatīt specifiska veida organizētību un/vai struktūru [HAK 2006, SKY 2006].

- Sarežģītai sistēmai piemīt viena vai vairākas sistēmīpašības, kā arī šāda sistēma realizē noteiktas funkcijas un, neskatoties uz daļu daudzveidību, demonstrē vienotu uzvedību – sistēmuzvedību, kas kvalitatīvi atšķiras no atsevišķu daļu funkcijām un uzvedības [SIM 1962, HAL 1968, ACK 1971, GRU 1972, ROS 1979, BAR 1997, JOS 2000, RIC 2000, MCC 2000, GLO 2002, VIC 2002, SKY 2006, YOU 2007, HEY 2008].
- Sarežģīta sistēma tiek raksturota kā spējīga pašorganizēties, adaptēties, attīstīties un mācīties [HAL 1968, BAR 1997, MCC 2000, RIC 2000, GLO 2002, WOO 2004, SKY 2006, HEY 2008]. Sarežģītai sistēmai eksistē daudz dažādu stāvokļu, kuros tā spēj realizēt funkcionalitāti [MCC 2000, HEY 2008].

Rezumējot jēdziena „sarežģīta sistēma” skaidrojumu, promocijas darbā ir piemērots šāds jēdziena formulējums:

„Sarežģīta sistēma ir atvērta sistēma, kas ir organizēta noteiktā veidā, kurai ir struktūra, un kas sastāv vismaz no divām daļām, starp kurām eksistē daudzveidīgas saites, turklāt daļas savstarpēji mijiedarbojas, kā rezultātā sistēmai piemīt sistēmiezīmes (tādas kā sistēmīpašības un sistēmuzvedība).”

1.2. Sarežģītu sistēmu modelēšana

Ja sistēma ir sarežģīta, tad galvenais izpētes līdzeklis ir sistēmas modelis [GRU 1972, BAR 1997, SKY 2006, IOP 2007, YOU 2007, SOK 2010]. Modelēšana ir process, kurā konstruē izpētes objekta atspoguļojumu jeb modeli. Veidojot modeli, izmanto abstrakciju, kurā ir vispārinātas, idealizētas reālās sistēmas būtiskās iezīmes, ignorējot nebūtiskās [AMA 2004, SKY 2006, YOU 2007]. Modeļi ir balstīti uz novērojumiem, kā arī uz pieejamās informācijas izvērtēšanu un spriedumiem [HOR 1995, SOK 2010]. Modeļi ir abstrakti [HEY 1990, STA 2006], un to izveidē piemēro dekompozīcijas, abstrakcijas un hierarhijas principus [YOU 2007, WEI 2009].

Sistēmas modelis apraksta un atspoguļo sistēmu no dažādiem skatu punktiem, ļauj izprast un analizēt tās uzbūvi, funkcionēšanu un uzvedību, kā arī izvērtēt un pieņemt piemērotus risinājumus attiecībā uz reālās pasaules sistēmu un tās darbību [MIN 1975a, BAR 1997, GRU 1997b, RIC 2000, VIC 2002, SKY 2006, YOU 2007, SOK 2010]. Neskatoties uz to, ka jebkura sarežģīta sistēma ir cieši saistīta ar noteiktu problēmsfēru, sistēmu pētījumos izmanto informācijas tehnoloģiju risinājumus [HOR 1995], veic datorizētu sistēmu analīzi,

projektēšanu un modelēšanu [VIC 2002]. Lai izveidotu lietderīgu un atbilstošu sistēmas modeli, ir nepieciešami rīki, kuros ir implementētas modelēšanas metodes un tehnikas, kas ļauj tikt galā ar sarežģītības radītajām problēmām un ierobežojumiem un izgūt un sistematizēt pieejamās zināšanas [ROS 1979, GRU 1999, RIC 2000, MCC 2000, AMA 2004, SOK 2010]. Lietderīgs modelis ir tāds, kas ļauj īstenot izvirzītos mērķus [EDM 1999, SKY 2006, STA 2006]. Ņemot vērā jēdziena „modelis” interpretācijas [KRI 1986, SIM 1987, EDM 1999, SKY 2006, STA 2006, ASH 2007, BOP 2008, OXF 2009, SOK 2010] turpmāk darbā izmanto šādu formulējumu:

„**Sistēmas modelis** ir izpētes objekta **apraksts** un/vai **atspoguļojums** no specifiskas **perspektīvas**, kas attēlo sistēmas morfoloģiju, funkcionalitāti, uzvedību vai citus modelēšanas mērķim būtiskus aspektus.”

Sarežģītu tehnisku sistēmu izmantošana ir būtiska, lietojot dažādas informācijas un komunikācijas tehnoloģijas, kā arī veicot to izpēti [INF 2011, PEI 2011]. Attīstoties IKT izpētei, modelēšanas iespējas paplašinās, tomēr sarežģītu sistēmu īpašības ierobežo modelēšanas pieeju un rīku izvēli. Eksistējošie rīki un pieejas parasti ir izveidotas tikai noteiktai problēmsfērai [GAR 2001]. Nav piemērota rīka, kas vienlaicīgi atbalstītu dziļu cēloņseku zināšanu izgūšanu un spriešanu par sarežģītām tehniskām sistēmām, vienotu zināšanu atspoguļošanu no morfoloģiskiem un funkcionāliem aspektiem, zināšanu bāzes uzturēšanu un zināšanu koplietošanu starp vairākiem lietotājiem [UEN 1991, GRU 1997b, GRU 2002, ZEL 2008a, ZEL 2010a, ZEL 2010b]. Lai realizētu sarežģītu tehnisku sistēmu modelēšanu datorsistēmā, ir jāizmanto pieeja, kas ļauj īstenot prasības attiecībā uz sarežģītām sistēmām un to modelēšanu. Sarežģītu sistēmu specifika un pieejamais informācijas apjoms apgrūtina kopēja matemātiska apraksta izveidi un ir noteicošie faktori pieejas izvēlē. Tāpēc ir izvēlēta struktūrmodelēšanas pieeja, kas atbalsta sarežģītu tehnisku sistēmu modeļu izveidi, kvalitatīvu un kvantitatīvu sistēmu analīzi, un kuru var izmantot arī diagnostikai [GRU 1997a, GRU 1997b, GRU 2002].

Struktūrmodelēšana (SM) ir sistemātiska, daļēji formāla pieeja, kas sakņota struktūras modeļos un freimos, un ir izveidota ar mērķi izgūt, atspoguļot un apstrādāt zināšanas par sarežģītām tehniskām sistēmām ar daudzveidīgiem elementiem un saitēm nepilnīgas informācijas apstākļos, kā arī automatizēt zināšanu bāzes izstrādi [GRU 1993, GRU 1997a, GRU 1997b, GRU 1999, GRU 2002, ZEL 2010a]. SM ir izstrādāta Rīgas Tehniskajā universitātē pagājušā gadsimta 70. gadu sākumā, izmantojot topoloģiskā modeļa [OSI 1969] koncepciju un pieejas autors ir J.Grundspenķis [GRU 1972, GRU 1993, GRU 1997a, GRU 1999]. Struktūrmodelēšanā ņem vērā četrus dažādus aspektus: struktūru, funkcijas, uzvedību

un dziļas cēloņseku zināšanas [GRU 1999, GRU 2002], un pieejā ir integrētas divas dažādas paradigmas: morfoloģiskā un funkcionālā [GRU 1997b, ZEL 2011]. Lai atspoguļotu zināšanas par sistēmas uzbūvi, veido morfoloģiskās struktūras modeli (MSM), bet, lai aprakstītu sistēmas funkcionālās īpašības, konstruē funkcionālās struktūras modeļus (FSM). FSM tiek veidots funkciju, uzvedības un parametru telpās [GRU 1997a, GRU 1999, ZEL 2011]. Tā kā struktūras modeļus atspoguļo grafa veidā, tad tiem var izveidot atbilstošas matricas [SIM 1962, GRU 1993] (piemēram, blakusvirsotņu). Struktūras modeļus izmanto, lai atbalstītu secīgu analīzi, projektēšanu, spriešanu un lēmumu pieņemšanu attiecībā uz pētīto sistēmu, lai izgūtu jaunas zināšanas par to, kā arī diagnostikas problēmu risināšanā [GRU 1997a, GRU 1999, GRU 2002, GRU 2004, ZEL 2008b, ZEL 2011].

Struktūrmodelēšana ir piemērota sarežģītu tehnisku sistēmu izpētei, bet, lai varētu atspoguļotās zināšanas rezultātīvi apstrādāt un analizēt (vienkopus par daudz un dažādiem elementiem, saitēm un īpašībām) un automātiski iegūt dažādus aprēķinus, spriedumus, kas atbilst aprakstītajai sistēmai, pieeja ir jārealizē datorsistēmā. Ir jāveido intelektuāla datorsistēma, kas ietver ekspertu sistēmu un zināšanās sakņotu sistēmu iezīmes un ļautu iegūt jaunas zināšanas par sistēmu no eksperta atspoguļotajām zināšanām. Intelektuāla sistēma, kurā implementēta struktūrmodelēšanas pieeja, salīdzinājumā ar diagnostikas ekspertu sistēmām, ļauj izgūt no eksperta „dziļas” zināšanas par sistēmu. Izgūtās zināšanas, ļauj saskatīt likumsakarības attiecībā uz sistēmu no dažādiem skatupunktiem un dažādos laika momentos, un tās var pielietot, lai spriestu par sistēmas uzbūvi un skaidrotu tās darbības un uzvedību [GRU 1999].

1.3. Intelektuālas sistēmas un to īpašības

Jēdzienu „intelektuāla sistēma” plaši lieto mākslīgā intelekta (MI) jomā attiecībā uz sistēmām, kurās izmanto MI tehnikas un metodes. Intelektuālas sistēmas ir kļuvušas nozīmīgas dažādās cilvēku darbības sfērās, kurās ir nepieciešams atbalsts zināšanu apstrādei, apmācībai, problēmu risināšanai un lēmumu pieņemšanai, izmantojot zināšanas par izpētes objektu [NEG 2004, YOU 2007, RUS 2010]. Sistēma var būt intelektuāla tikai saistībā ar tās mērķi [ASH 1981, POL 2002]. Intelektuālas sistēmas ir paredzētas, lai atvieglotu lēmumu pieņemšanu, bet gala slēdzienu parasti pieņem sistēmas lietotājs. Intelektuālas sistēmas parasti izmanto dažādu uzdevumu veikšanai, kas atbalsta lietotāja lēmumu pieņemšanu [DUR 1994, BRO 1998, NEG 2004, BOP 2008]. Intelektuāla sistēma ļauj izgūt zināšanas no eksperta par izpētes objektu, tās organizēt, izmantot un uzturēt (atjaunināt atbilstoši reālajai situācijai) [NEG 2004, YOU 2007, BOP 2008]. Lai izveidotu intelektuālu sistēmu, ir jānosaka tās

īpašības, kas ir saistītas ar intelektuālas sistēmas uzbūvi un darbības mehānismiem, un ir būtiskas šādas sistēmas projektēšanā un izstrādē.

Intelektuālas sistēmas uzbūvi veido un tās funkcionalitāti nodrošina četras komponentes: zināšanu bāze, izvedumu mašīna, datu bāze un lietojums [BIE 1991, DUR 1994, LIE 1997, PEA 2002, NEG 2004, BOP 2008]. Intelektuālās sistēmās starp zināšanu un datu bāzi pastāv cieša saistība [UEN 1991]. Zināšanu bāze (ZB) satur zināšanas, ko iegūst no eksperta, par pasauli un/vai noteiktu izpētes objektu, un saglabā kā faktu, likumu, konceptu un starp tiem esošo saistību kopumu/kolekciju, kas ir lietderīga noteiktu problēmu risināšanai [UEN 1991, DUR 1994, LIE 1997, PEA 2002, NEG 2004, BOP 2008]. Zināšanu bāzi apstrādā ar izvedumu mašīnas palīdzību, kas ļauj secināt, izgūt zināšanas par izpētes objektu un tā īpašībām, kaut gan tiešā veidā šādas zināšanas ZB nepastāv [PEA 2002, BOP 2008]. Izvedumu mašīna darbojas ar pieejamo informāciju, kas glabājas datu bāzē un zināšanām, kas glabājas ZB, brīdī, kad sistēmas lietotājs veic darbības ar sistēmu [DUR 1994, LIE 1997, PEA 2002, NEG 2004]. Datu bāzē glabājas strukturētu un indeksētu datu kolekcijas – faktu kopas, pierādījumi, dokumenti, hipotēzes, mērķi [UEN 1991, NEG 2004]. Zināšanas no datu bāzes var iegūt netieši, veicot procedūras un lietojot dažādas tehnikas [PEA 2002, BOP 2008]. Zināšanas izgūst no datu bāzēm, izmantojot arī datizraces (angl. val. data mining) metodes [FAY 1996, POD 2012]. Lai nodrošinātu mijiedarbības starp lietotāju (ekspertu) un intelektuālu sistēmu, lai izgūtu, atspoguļotu, saglabātu un apstrādātu zināšanas lietotājam uzskatamā un saprotamā veidā, lieto lietojumu jeb saskarni [DUR 1994, LIE 1997, NEG 2004, BOP 2008].

Lai nodrošinātu intelektuālas sistēmas darbību, izmanto dažādas mākslīgā intelekta tehnikas un metodes [DUR 1994, LIE 1997, BRO 1998, NEG 2004, BOP 2008, RUS 2010, HOP 2012]. Ja intelektuālā sistēmā ir kombinētas dažādas tehnikas un metodes, tad to sauc par hibrīdu intelektuālu sistēmu [LIE 1997, NEG 2004, RUD 2008]. Kā būtiskākās no intelektuālo sistēmu tehnikām tiek minētas [DUR 1994, BRO 1998, NEG 2004, RUS 2010]:

- dabīgās un mākslīgās valodas apstrāde;
- zināšanu izgūšana un atspoguļošana;
- mašīnāpmācība, kas ir adaptīvu sistēmu pamatā;
- automatizēta spriešana un secināšana, lietojot likumus, pārmeklēšanu, lai skaidrotu secinājumu iegūšanas ceļus. Īsteno divas spriešanas stratēģijas: no mērķa virzīta, no datiem virzīta;

- meklēšana/ pārmeklēšana, ko veic, lai paplašinātu esošās zināšanas. Meklēšanu veic, nezinot kāds precīzi būs iegūtais rezultāts, jo ir zināmi tikai sākuma kritēriji. Pārmeklēšana ir metode, ko lieto, lai pārmeklētu stāvokļu telpu un iegūtu/ atrastu mērķa stāvokli, atrodot atrisinājuma ceļu no sākuma uz mērķa stāvokli.

Ņemot vērā intelektuālas sistēmas īpašības un tās mērķi, jēdzienu „intelektuāla sistēma” promocijas darbā definē šādi:

„**Intelektuāla sistēma** ir zināšanās sakņota datorizēta sistēma, (1) kas operē ar organizētām zināšanām, (2) izmanto vienu vai vairākas mākslīgā intelekta tehnikas un metodes, un (3) to var lietot sarežģītu sistēmu struktūrmodelēšanas mērķiem.”

1. nodaļas kopsavilkums un secinājumi

- Sarežģītām sistēmām ir daudz savstarpēji saistītu iezīmju un, lai realizētu prasības, ko izvirza sarežģītu sistēmu struktūru modelēšana, ir jāizvēlas piemērota pieeja, kas ļauj izveidot lietderīgus modeļus.
- Struktūrmodelēšana ir piemērota sarežģītu tehnisku sistēmu struktūru modelēšanai, tomēr, lai īstenotu pieejas iespējas un automatizētu zināšanu izgūšanu un apstrādi, ir nepieciešama intelektuālas sistēmas izstrāde.
- Sistēmai, kurā ir implementēta struktūrmodelēšanas pieeja, ir jābūt hibrīdai intelektuālai sistēmai, un ir nepieciešams izmantot dažādas tehnikas, jo tas sistēmai sniedz priekšrocības gan zināšanu atspoguļošanā (var atspoguļot dažādos veidos: freimos, modeļos, kā arī dažādās hierarhijās), gan to apstrādē (zināšanas var saglabāt, pārveidot un izmantot modelēšanai un analīzei).

2. STRUKTŪRMODELĒŠANAS PIEEJAS APRAKSTS

Struktūrmodelēšana (SM) atbalsta problēmsfērā sakņota, daļēji formāla sistēmas atspoguļojuma izveidi. SM ļauj izveidot vizuālus, viegli izprotamus struktūras modeļus, kas apraksta gan izpētes sistēmas morfoloģiskos, gan funkcionālos aspektus. SM **modeļu izstrādes procesa atbalsts** ir formālās transformācijas un detalizēti aprakstītie spriešanas mehānismi. Piemērojot SM formālās metodes, morfoloģiskās struktūras modeli transformē funkcionālās struktūras modelī izvēlētajā telpā, un to veic daļēji automatizēti. Transformācijas ļauj izveidot atbilstīgus (nepretrunīgus) modeļus un nodrošina nepārtrauktu sistēmas atspoguļojumu. Struktūras modeļi tiek veidoti manuāli [GRU 1972, GRU 1993, GRU 1997a, GRU 1997b, GRU 2002, ZEL 2008b, ZEL 2011].

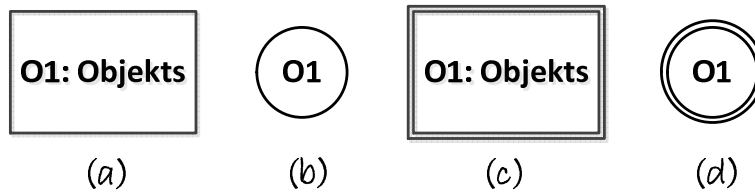
Lai SM varētu pilnvērtīgāk izmantot sarežģītu tehnisku sistēmu modelēšanā, promocijas darbā ir pilnveidoti pieejā izmantotie pamatelementi, kā arī ir pievienoti papildus elementi. Pamatelementu un modeļu vizualizācija ir veidota, ņemot vērā struktūrmodelēšanas aspektus (struktūru, funkcijas, uzvedību un dziļas cēloņseku zināšanas) un modelēšanas mērķi. Otrajā nodaļā ir detalizēti aprakstīta struktūras modeļu sintakse un semantika, skaidrojot un vizuāli atspoguļojot modeļu elementus, kā arī ir aplūkotas izveidotās struktūras modeļu transformācijas.

2.1. Struktūras modeļu sintakse un semantika

Struktūras modeļi pamatojas uz topoloģiskās telpas jēdzienu $T(X,Q)$, kur X ir elementu kopa, bet Q ir topoloģija, ko veido loku kopa [OSI 1969, GRU 1993, GRU 1997a, GRU 1999]. Katram sistēmas dekompozīcijas līmenim var izveidot struktūras modeļus. Struktūras modeļus iesaka konstruēt sistemātiski, lai nodrošinātu topoloģisko telpu nepārtrauktu atspoguļojumu. Modeļu skaitu un tipus nosaka sistēmas pētījuma mērķis un detalizācijas līmenis [GRU 1972, GRU 1993]. Struktūras modeļus vizualizē kā orientētus grafus, kur virsotnes atspoguļo objektus, funkcijas, uzvedības stāvokļus vai parametrus, bet saites starp virsotnēm attēlo plūsmas vai cēloņseku saistības. Katram no modeļiem ir definēta noteikta sintakse un semantika [GRU 1997a, ZEL 2011].

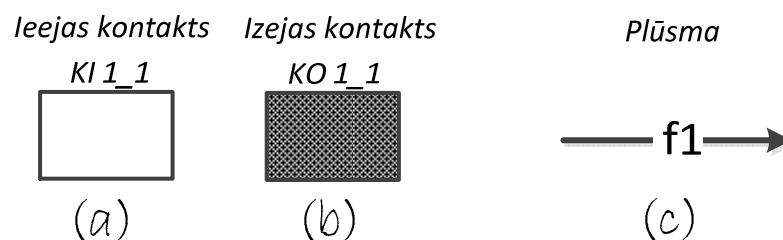
Struktūras modeļu izveide sākas ar morfoloģiskās struktūras modeļa (**MSM**) konstruēšanu, atspoguļojot iegūtās zināšanas par pētāmās sistēmas uzbūvi. MSM attēlo sistēmas iekšējo struktūru izvēlētajā dekompozīcijas līmenī, sistēmas daļas un saites starp tām, un strukturālās jeb cēloņseku attiecības. MSM atbalsta tā saucamo strukturālo spriešanu, kas balstās uz sistēmas daļu tiešo un netiešo saistību izpēti [GRU 1993, GRU 1997a, GRU 1999]. MSM ir definēts kā orientēts grafs $G(X,Q)$, kur katra virsotne $x \in X$ atbilst sistēmas daļai, reālam fiziskam elementam, ko apraksta, izmantojot objektus. Saistības starp objektiem atbilst plūsmām, ko modelī attēlo ar orientēta grafa lokiem Q . Struktūrmodelēšanā objektus apskata no statiskā viedokļa, jo sistēmas atspoguļojumu veido attiecībā uz noteiktu laika momentu [GRU 1993, GRU 1997a, GRU 1997b, GRU 1999].

Struktūrmodelēšanā objektu apskata kā pamatvienību, ko pieņemts attēlot divos dažādos veidos (skatīt 2.1. att. (a) un (b) gadījumi) [GRU 1997a, ZEL 2008b]. Lai SM varētu atspoguļot gan elementus, gan komponentes, darba autore SM ir ieviesusi papildus objekta apzīmējumus ar dubultlīniju (skatīt 2.1. att. (c) un (d) gadījumus). Ja objektu attēlo ar vienu līniju (2.1. att. (a) un (b)), tas nozīmē, ka ir apskatīts sistēmas elements, bet ja ar dubultlīniju (2.1. att. (c) un (d)), tad sistēmas komponente.



2.1. att. Objekta atspoguļojums

Lai norādītu kā objekti ir savstarpēji saistīti, MSM izmanto elementus: *kontakts* un *plūsma* [GRU 1997a, GRU 1997b]. Kontakti atbilst objekta ieejām un izejām jeb ievadei un izvadei. Caur viena objekta izeju un cita objekta (vai tā paša objekta) ieeju pastāv saistība, kas ļauj realizēt kādu objekta darbību (aktivitāti, procesu). Katram objektam struktūmodelēšanā apraksta divu veidu kontaktus [GRU 1997a, GRU 1997b, ZEL 2007]. Ieejas kontaktā uztver informācijas/enerģijas/materiāla plūsmu (kustību), kas nāk no cita vai apskatītā objekta (skatīt 2.2. att. (a)). Izejas kontaktā plūsmu nodod no viena objekta uz citu vai uz to pašu objektu sistēmā (skatīt 2.2. att. (b)). Kontaktus atspoguļo, izmantojot identifikatorus, kur: a) KI atbilst ieejas kontaktam, bet KO izejas kontaktam; b) kārtas skaitlis „1” norāda objekta numuru, kuram pievienots kontakts; c) simbols „_” atdala objekta numuru un kontakta numuru; d) kārtas skaitlis „1” norāda kontakta numuru. MSM saistību, ko atspoguļo starp kontaktiem, sauc par plūsmu. MSM plūsmu attēlo kā līniju ar bultu jeb orientētu loku (skatīt 2.2. att. (c)) uz tā norādot plūsmas identifikatoru. Šeit kā arī turpmāk identifikators sastāv no burtu un skaitļu kombinācijas. Ņemot vērā to, ko plūsma pārnes, struktūmodelēšanā izdala trīs dažādas plūsmas: enerģijas, matērijas un informācijas. Plūsmas veidu norāda, izmantojot krāsas: enerģijai – sarkanu; matērijai – zaļu; informācijai - zilu [GRU 1997b].

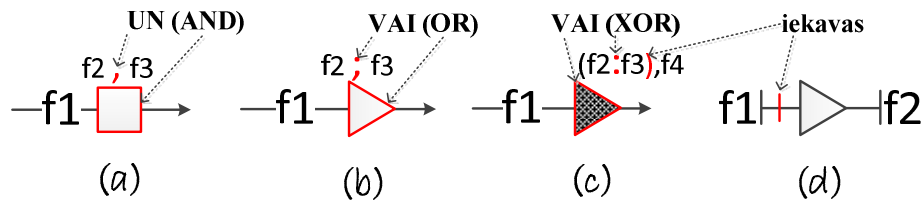


2.2. att. Kontaktu un plūsmas atspoguļojums

Lai varētu attēlot organizētību un likumsakarības sistēmā, veidojot sistēmas atspoguļojumu, starp objektiem norāda plūsmas, bet starp plūsmām norāda loģiskos operatorus [GRU 1997b, GRU 1999, ZEL 2011]. Struktūmodelēšanas pieejā loģiskos operatorus izmantoja arī iepriekš FSM funkciju telpā un notikumu kokos [GRU 1999]. Tomēr nebija izveidoti loģisko operatoru vizualizēti apzīmējumi un detalizēti skaidrojumi.

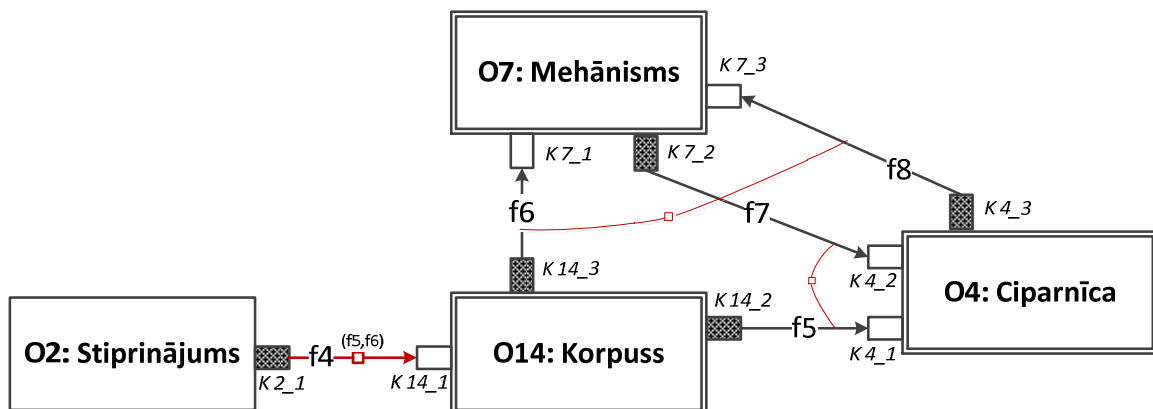
Struktūrmodelēšanas pieeju darba autore papildināja ar vizualizētiem loģiskiem operatoriem, pievienojot tos jau MSM notācijā [ZEL 2008b, ZEL 2011].

Lai atspoguļotu loģisko operatoru UN, izmanto kvadrātu un/vai komatu (skatīt 2.3. att. (a)). Operators UN starp plūsmām nozīmē to, ka visas ar šo loģisko operatoru saistītās plūsmas ir nepieciešamas objekta funkcionalitātes īstenošanai. Lai atspoguļotu VAI, izmanto trīsstūri un/vai semikolu (skatīt 2.3. att. (b)). Izmantojot operatoru VAI, norāda, ka ir nepieciešama kāda no saistītām plūsmām, bet ne obligāti visas. Saistītas plūsmas ir plūsmas, kuras vieno noteiktas funkcionalitātes nodrošināšana sistēmā. Lai atspoguļotu izslēdzošo VAI, izmanto kolu un pildītu trīsstūri (skatīt 2.3. att. (c)). Izslēdzošā loģiskā operatora VAI gadījumā īsteno tikai vienu no saistītajām plūsmām. Iekavas izmanto, lai veidotu sarežģītākas izteiksmes (iekļaujot vairāku plūsmu kombinācijas), vai lai norādītu loģisko operatoru secību (skatīt 2.3. att. (d)).

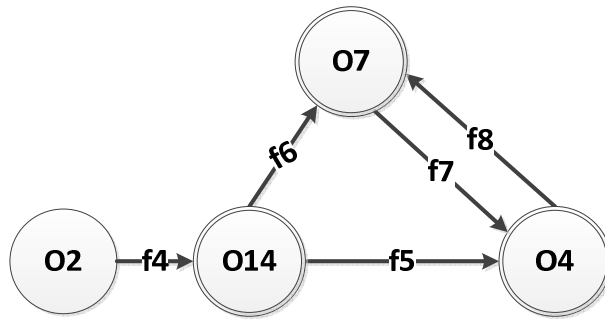


2.3. att. Loģiskā operatoru atspoguļojums struktūras modeļos

Visbiežāk, veicot modeļu manuālu izveidi, MSM atspoguļo kā diagrammu, kas līdzīga blokshēmai. Šādā gadījumā pie objekta pievieno ieejas un izejas kontaktus (skatīt 2.4. att.) vai uzvedības stāvokļus. Vai arī MSM attēlo vienkāršoti, kā orientētu grafu (orgrafs) – norādot tikai objektus un plūsmas starp tiem (skatīt 2.5. att.) [GRU 1997a, GRU 1999]. To, kā tiks atspoguļots modelis, nosaka eksperts, ņemot vērā modelēšanas mērķim nepieciešamo informāciju [GRU 1997a, GRU 1997b, GRU 1999].

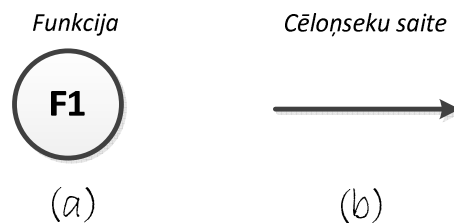


2.4. att. MSM atspoguļojums diagrammas veidā



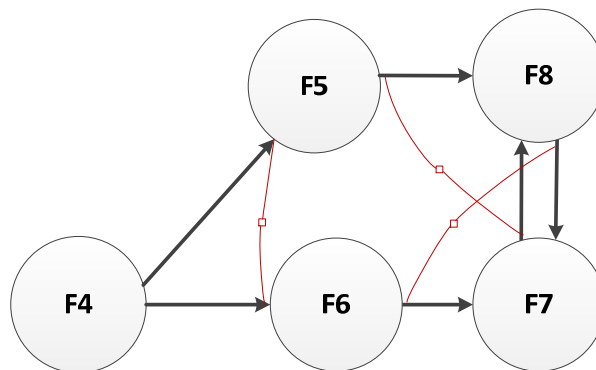
2.5. att. MSM atspoguļojums grafa veidā

Lai atbalstītu spriešanu par darbībām, kas norisinās sistēmā, pieejā ir ieviests funkcionālā modeļa jēdziens un izveidoti algoritmi, kas transformāciju rezultātā no MSM ļauj iegūt funkcionālās struktūras modeļus [GRU 1997a, GRU 1999]. Funkcionālās struktūras modeļi funkciju telpā (FSM FT), līdzīgi kā MSM, attēlo kā orientētu grafu [GRU 1997a]. FSM FT virsotnes ir funkcijas un loki attēlo cēloņseku saites (binārās attiecības) starp funkcijām [GRU 1997b, GRU 1999, ZEL 2008b]. FSM FT funkciju atspoguļo izmantojot apli un norādot tajā identifikatoru (skatīt 2.6. att. (a)). Starp funkcijām norāda cēloņseku saites, ko attēlo ar bultiņu (skatīt 2.6. att. (b)). Starp cēloņseku saitēm norāda loģiskās saistības, izmantojot vizualizētus loģisko operatoru apzīmējumus (skatīt 2.7. att.).



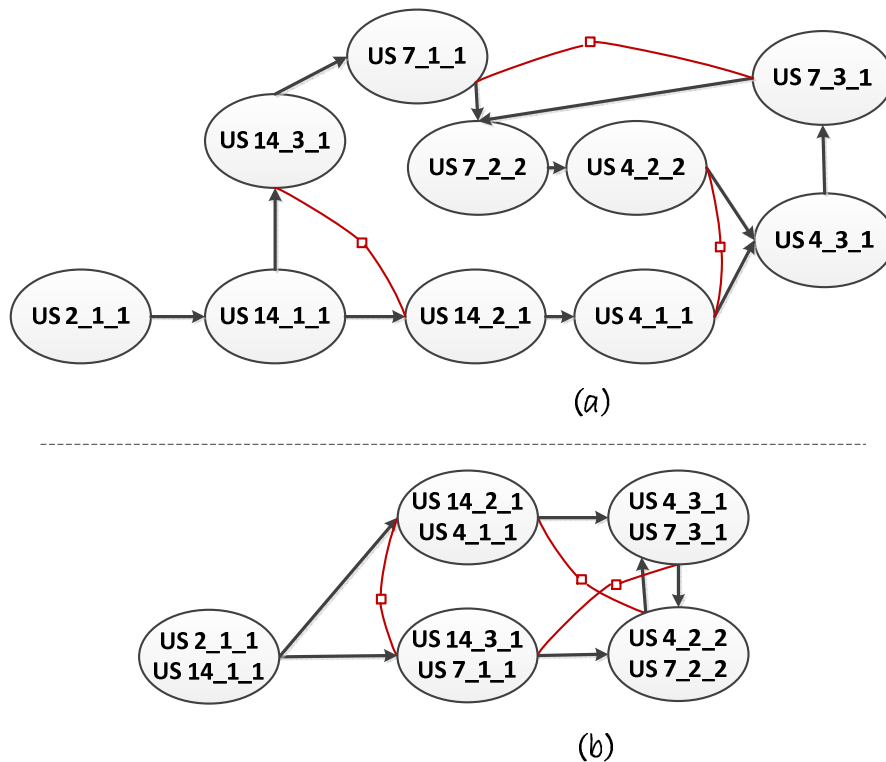
2.6. att. Funkcijas un cēloņseku saites atspoguļojums

FSM FT piemērs (2.7. att.) atbilst 2.4. att. attēlā parādītajam MSM.

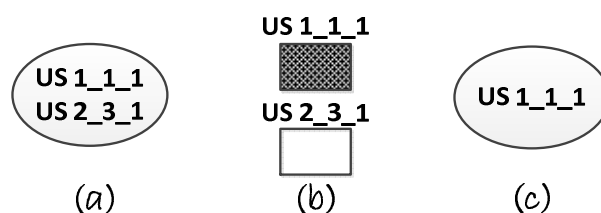


2.7. att. FSM FT atspoguļojums

Funkcionālās struktūras modelis uzvedības telpā (FSM UT) jeb uzvedības stāvokļu modelis atspoguļo sistēmas daļu uzvedības stāvokļus un to saistības, kas norāda, kādā veidā sistēmai ir jādarbojas, lai tā funkcionētu atbilstoši mērķiem [GAR 2001, GRU 1997a]. Lai gan uzvedības stāvokļi tika apskatīti arī iepriekš struktūrmodelēšanā, atsevišķs uzvedības modelis netika izdalīts. Pētījuma rezultātā tika konstatēts, ka abi modeļi (FSM FT un FSM UT) atspoguļo funkcionālās iezīmes, tomēr modeļiem ir atšķirīga virsotņu semantika, un tāpēc tika izveidots FSM UT [ZEL 2011]. Uzvedības modelis atspoguļo nevis mērķus, kas jāsasniedz, bet kādā veidā ir jāīsteno darbības, lai mērķus sasniegtu. FSM UT attēlo uzvedības stāvokļus, kas atbilst sistēmas objektu funkciju izpildei normālas funkcionēšanas, kā arī kļūdu gadījumā. Noteiktā detalizācijas līmenī sistēmai atbilst viens vai vairāki FSM UT. Ņemot vērā virsotņu semantiku, FSM UT attēlo divējādi (skatīt 2.8. att.) [GRU 1993, GRU 1997a, GRU 1997b, ZEL 2011].



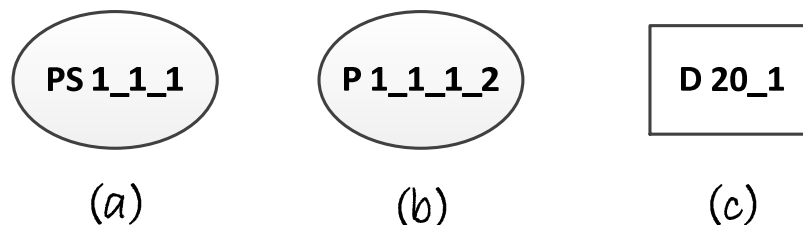
2.8. att. FSM UT atspoguļojums



2.9. att. Uzvedības stāvokļu atspoguļojums

Uzvedību atspoguļo, izmantojot ovālu, kurā norāda divus secīgus uzvedības stāvokļus, kas atbilst vienai plūsmai. Pirmais uzvedības stāvoklis atbilst plūsmas izejai, bet otrais – plūsmas ieejai (skatīt 2.8. att. (b) un 2.9. att. (a) gadījumu). Lai pētītu uzvedības stāvokļus un to ietekmi atsevišķi, veido FSM UT, kur katru uzvedības stāvokli attēlo izmantojot ovālu un norādot identifikatoru (skatīt 2.9. att. (c) gadījumu). Cēloņseku saites starp virsotnēm attēlo tieši tāpat kā FSM FT (skatīt 2.6. att. (b)). Uzvedības stāvokļus atspoguļo gan FSM UT, gan MSM, lai izprastu kāda uzvedība ir īstenota, objektam realizējot noteiktu plūsmu [GRU 1997a, GRU 1997b, GRU 1999]. MSM uzvedības stāvokļus attēlo līdzīgi kā kontaktus, norādot identifikatoru (skatīt 2.9. att. (b) gadījumu).

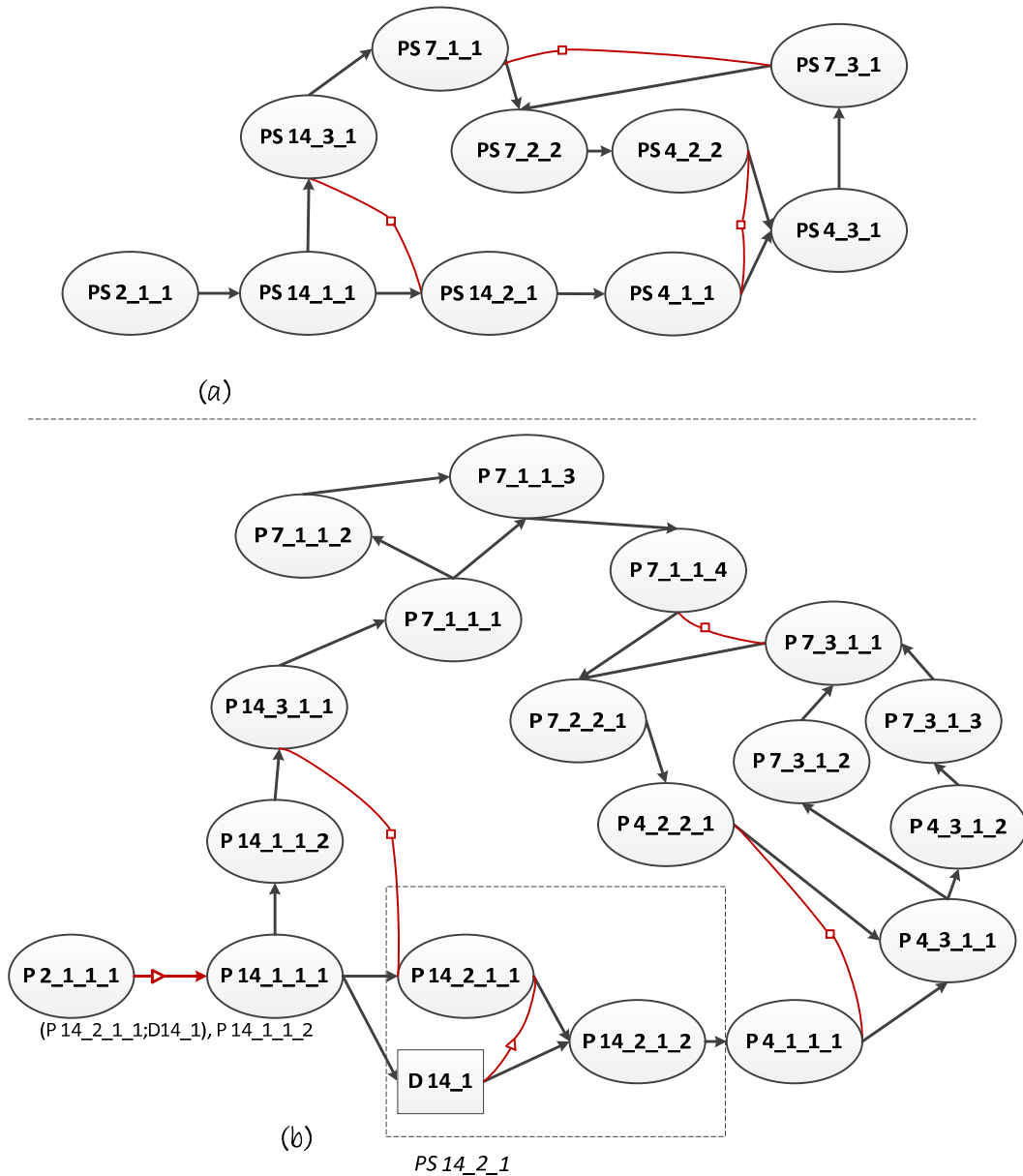
Uzvedības stāvokļi tāpat kā funkcijas ir kvalitatīvas iezīmes, kas ļauj spriest par sistēmas darbību, bet nav lietderīgas diagnostikai un detalizētai uzvedības izpētei [GRU 1993, GRU 1997a, GRU 1997b]. Lai aprakstītu noteiktu uzvedību, uzvedības stāvokļos ir jālieto parametri vai mainīgie, kas raksturo objekta funkciju realizācijas efektivitāti. Funkcionālās struktūras modelis parametru telpā (FSM PT) jeb parametru modelis ļauj atspoguļot sistēmas dinamiku un īstenot diagnostisko spriešanu. FSM PT konstruē, aizstājot uzvedības stāvokļus ar atbilstošām parametru kopām vai parametriem, izmantojot eksperta zināšanas par parametru savstarpējām saitēm parametru kopā [GRU 1993, GRU 1997a, ZEL 2011]. FSM parametru kopu un parametru attēlo, izmantojot ovālu un identifikatoru (skatīt attiecīgi 2.10. att. (a) un (b)).



2.10. att. Parametru kopas un parametru atspoguļojums

Ja kopā ir vairāki parametri, tad starp tiem nosaka saites un loģiskos operatorus. Daļu no loģiskiem operatoriem iegūst automātiski, veicot transformāciju no MSM uz FST PT, bet citus, veicot parametru kopas detalizāciju un izmantojot eksperta zināšanas par parametru saistībām (skatīt 2.11. att. (b)). Saites starp virsotnēm attēlo tāpat kā FSM UT. Ja sistēmas funkcionēšanā ir kļūdas, veido FSM PT paplašināto modeli [GRU 1997a], kurā iekļauj visus iespējamus defektus. Neatkarīgi no sistēmas dekompozīcijas līmeņa izvēles un atspoguļojumam izvēlētā struktūras modeļa, defektus attēlo, izmantojot taisnstūri un identifikatoru (skatīt 2.10. att. (c)).

Modeli, kurā atspoguļoti parametri, iegūst, detalizējot parametru kopas (piemēram, skatīt 2.11. att. (b) gadījumu parametru kopu *PS 14_2_1* un tai atbilstošos parametrus). Parametru modelis (2.11. att. (a)) atbilst 2.8. att. (a) attēlā parādītajam sistēmas funkcionālās struktūras modelim uzvedības telpā.



2.11. att. FSM PT atspoguļojums

2.2. Transformācijas starp struktūras modeļiem

Struktūrmodelēšanā iekļautās formālās metodes un algoritmi veido modeļu topoloģiju, nepārtrauktu un vienotu skatījumu uz sistēmu. Topoloģija nodrošina atbilstību starp dažādiem modeļiem un MSM granularitāti, kad turpina modeļu izveidi citos sistēmas detalizācijas līmeņos. Tā kā starp struktūras modeļiem pastāv līdzības, ir iespējams veikt modeļu

transformācijas [GRU 1997a]. SM transformācija ir pāreja jeb zināšanu pārnese no vienas topoloģiskās telpas uz citu, vai no viena atspoguļošanas veida uz citu, ko realizē, izmantojot algoritmus. Modeļu transformācijas ir izveidotas, ņemot vērā formālu metodi no grafu teorijas [TUT 2001, MEN 2010], kas paredzēta neorientētiem grafiem.

SM pieejā, lai no MSM iegūtu FSM topoloģiju funkciju telpā (FSM FT), iepriekš izmantoja transformācijas algoritmu, kas sastāv no 3 soļiem [GRU 1997a]: 1) MSM apskata kā neorientētu grafu; 2) Iegūst loku grafa virsotnes; 3) Savieno loku grafa virsotnes. Tomēr izmaiņas MSM notācijā, konkrēti, loģisko operatoru ieviešana, radīja nepieciešamību mainīt arī transformācijas algoritmu. Autores pilnveidotais transformācijas algoritms ļauj loģiskos operatorus automatizēti pārnest uz funkcionālās struktūras modeļiem. Algoritms sastāv no 3 soļiem: 1) MSM, kurā ir norādīti loģiskie operatori, apskata kā neorientētu grafu; 2) Iegūst loku grafa virsotnes; 3) Savieno loku grafa virsotnes, ievērojot 3 likumus:

- 1) secīgi pārbauda visas virsotnes MSM, sākot no izvēlētās,
- 2) ja vienas virsotnes diviem gadījuma lokiem ir pretēji virzieni, tad atbilstošās virsotnes loku grafā nesavieno;
- 3) ja vienas virsotnes diviem gadījuma lokiem MSM orientētajā grafā ir viens virziens, tad pārbauda loģiskos operatorus un nosacījumus, kas atspoguļoti uz lokiem, kas ieiet apskatītajā virsotnē un FSM savieno virsotnes ar lokiem.

Veicot soļus, kas aprakstīti jaunajā transformācijas algoritmā, pirmkārt iegūst atšķirīgu saišu skaitu, otrkārt modelī ir norādīti loģiskie operatori. Līdz ar to iegūst pareizu loku kopu, un netiek pieļauta nesavienojamu saišu parādīšanās modelī.

Ņemot vērā dažādos loģiskos operatorus un plūsmu kombināciju variantus, pastāv dažādi funkciju saistību varianti FSM, ko iegūst transformācijas rezultātā. Darba ietvaros ir aprakstīti 5 dažādi plūsmu kombināciju varianti MSM un struktūras modeļu transformācijas gadījumi, izmantojot loģiskos operatorus [ZEL 2008b, ZEL 2011]:

- 1) viena ieejas plūsma un viena izejas plūsma;
- 2) viena ieejas plūsma un vairākas izejas plūsmas;
- 3) vairākas ieejas plūsmas un viena izejas plūsma;
- 4) vairākas ieejas plūsmas un vairākas izejas plūsmas;
- 5) viena vai vairākas ieejas plūsmas un neviena izejas plūsma vai neviena ieejas plūsma un viena vai vairākas izejas plūsmas.

Ievērojot plūsmu kombināciju variantus un loģiskos operatorus, no struktūras modeļiem iegūst arī produkciju likumus, kas atbalsta dažādus spriešanas mehānismus (strukturālo, diagnostikas, kauzālo) [GRU 1997a, GRU 1997b, ZEL 2008b]. FSM UT

topoloģiju, tāpat kā FSM FT, iegūst no morfoloģiskās struktūras modeļa, veicot transformāciju [GRU 1993, GRU 1997a]. Tomēr iepriekš SM nebija izveidots formāls algoritms transformācijai no MSM uz FSM UT, jo nebija atsevišķi definēts un aprakstīts uzvedības modelis. Darba ietvaros ir izveidots transformācijas algoritms, kas sastāv no 3 soļiem: 1) izvēlas FSM UT veidu: attēlot uzvedību vai uzvedības stāvokļus; 2) no MSM iegūst uzvedības stāvokļu pārus, kurus saista noteiktas plūsmas un attēlo virsotnēs; 3) savieno grafa virsotnes, ievērojot loģisko operatoru lietojumu. FSM PT iegūst no uzvedības modeļa, veicot transformāciju [ZEL 2011], un virsotnēs var būt attēlotas parametru kopas vai parametri. Lai iegūtu FSM PT (kurā ir tiek izdalīti atsevišķi parametri), veic šādus soļus:

- 1) Apskata FSM PT, kurā norādītas parametru kopas;
- 2) Izmantojot eksperta zināšanas, detalizē katru virsotni un iegūst parametrus, kā arī defektus, kas ietilpst virsotnē attēlotajā parametru kopā;
- 3) Izmantojot eksperta zināšanas, pievieno loģiskos operatorus.

Transformācijas rezultātā iegūto funkcionālās struktūras modeli parametru telpā lieto, lai novērtētu elementu atteikumu un defektu izraisītās sekas un konstruētu notikumu koku, kas paplašina FSM PT izmantošanas iespējas [GRU 1993].

2. nodaļas kopsavilkums un secinājumi

- Loģiskos operatorus ir nepieciešams atspoguļot jau pirmajā sistēmas struktūras modelī, lai radītu izpratni par sistēmas uzbūvi, funkcionēšanu, kā arī samazinātu darbu, kas ekspertam ir jāiegulda, veidojot funkcionālās struktūras modeļus.
- Sistēmā esošo ieejas un izejas plūsmu kombināciju un plūsmu loģisko secību (konkrēti kādas ieejas plūsmas ietekmē kādas izejas plūsmas) analīze ļāva iegūt iespējamās plūsmu saistību gadījumus.
- SM modeļu transformācija, kas eksistēja iepriekš, nodrošināja nepārtrauktu sistēmas atspoguļojumu, bet, lai iegūtu FSM, kuros ir norādīti loģiskie operatori, ir jāievēro papildus nosacījumi attiecībā uz loģisko operatoru lietojumu MSM (atbilstošs loģisko operatoru pieraksta veids un uz ieejas plūsmām norādītās izejas plūsmas).
- Struktūras modeļiem, ko iegūst, izmantojot darba ietvaros izveidoto transformācijas algoritmu no MSM uz FSM FT, ir atšķirīga sintakse, kā arī saišu skaits starp virsotnēm (netiek pieļauta nesavienojamu saišu parādīšanās modelī).
- Struktūras modeļus veido manuāli, zīmējot tos vizuālās apstrādes rīkos, tomēr modeļu manuāla izveide ir darbietilpīgs process, tāpēc to nepieciešams automatizēt.

3. FREIMU KOPAS LIETOJUMS STRUKTŪRMODELĒŠANĀ UN SISTĒMAS I4S DARBĪBAS PRINCIPI

Iepriekš SM pieejā dziļas zināšanas par sistēmas morfoloģiju, funkcionalitāti un uzvedību normālas funkcionēšanas apstākļos, kā arī gadījumos, kad sistēma funkcionē kļūdaini, ieguva no problēmsfēras eksperta, izmantojot modeļus un struktūrmodelēšanas pieejas metodes [GRU 2002]. Pēc tam iegūtās zināšanas saglabāja freimu hierarhijā [GRU 1997a, GRU 1997b], bet tā bija pārāk vienkārša (nebija izdalīti dažādi slotu veidi un ieviesti īpašību un alternatīvu freimi) un nebija piemērota, lai to izmantotu intelektuālā sistēmā [ZEL 2007, ZEL 2010a]. Tāpēc promocijas darba ietvaros, implementējot SM pieeju intelektuālā sistēmā (turpmāk I4S), lai veiktu sarežģītu sistēmu struktūrmodelēšanu, tika mainīta SM koncepcija, zināšanu izgūšanas un atspoguļošanas pamatprincipi.

Pamatojoties uz SM pieejā iepriekš integrēto freimu hierarhiju un citās pieejās lietoto freimos sakņotu zināšanu atspoguļošanas shēmu analīzi, darba autore ir izstrādājusi freimu kopu [VAL 2005a, ZEL 2007, ZEL 2010a], lai varētu automatizēt struktūras modeļu konstruēšanu. Jaunizveidoto zināšanu atspoguļošanas shēmu lieto intelektuālas sistēmas zināšanu bāzē, kā arī lietojumā, lai no eksperta iegūtu un vienuviet atspoguļotu zināšanas par izpētes objektu. Implementējot SM pieeju sistēmā I4S, darba autore ir izstrādājusi transformācijas algoritmus no freimu kopas uz struktūras modeļiem, lai īstenotu automatizētu modeļu izveidi, izvēlētajam izpētes sistēmas detalizācijas līmenim. Trešajā nodaļā ir apskatīts freima un freimu kopas lietojums SM pieejā, skaidroti sistēmas I4S darbības principi un jaunizveidotās transformācijas no freimu kopas uz struktūras modeļiem.

3.1. Freimu kopas apraksts un lietojums

Freimu kopa ir izveidota struktūrmodelēšanas mērķiem, lai izgūtu, atspoguļotu un saglabātu zināšanas par pētāmo sistēmu kā arī atsevišķiem objektiem [ZEL 2007, ZEL 2010a]. Freimu kopa ir specifiska zināšanu atspoguļošanas shēma, kura sastāv no saistītiem dažādas nozīmes freimiem, kur katram no tiem ir noteikts pielietojums [VAL 2005a, VAL 2005b, ZEL 2007, ZEL 2010a].

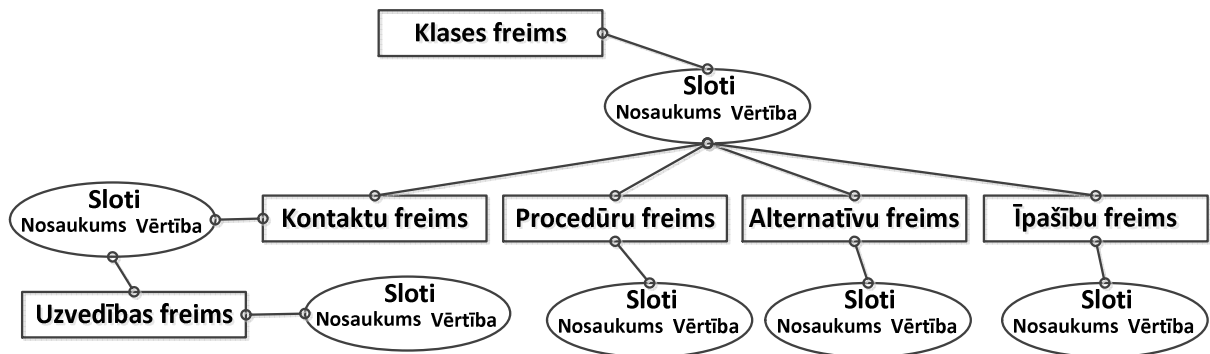
Freimus izmanto, lai atspoguļotu nelielas zināšanu vienības (piemēram, par objektu, funkciju, uzvedību) vienuviet un pēc vienotas shēmas [MIN 1975a, KAR 1993, WHE 1993, BRO 1999, BOP 2008]. Freims ir datu struktūra, kas paredzēta zināšanu atspoguļošanai par stereotipisku situāciju [MIN 1975a, MIN 1975b, CZO 1991, MAR 2006]. Freimi ir zināšanu atspoguļošanas formalisms, kas ļauj izgūt zināšanas strukturizētā veidā un organizēt tās

hierarhijās [NEG 2004, MAR 2006]. Freimi ir izmantoti daudzu intelektuālu sistēmu izveidē [GRU 1999, YOU 2007].

Freims sastāv no nosaukuma, kas ir unikāls freimu sistēmā, un termināļiem jeb slotiem. Freima nosaukums apraksta objektu, ko tas atspoguļo. Savukārt freima slotus lieto, lai aprakstītu objekta īpašības [MIN 1975a, CZO 1991, KAR 1993]. Freimu sistēma sastāv no radniecīgu freimu kolekcijām/kopām, kas ir savstarpēji saistītas ar saitēm, tādējādi veidojot tīklu, kas vienkāršā un strukturālā veidā atspoguļo izvēlēto pētījuma objektu no dažādām perspektīvām [MIN 1975b]. Šādu zināšanu atspoguļošanas veidu lieto, lai konstruētu sistēmas modeļi vai vairākus savstarpēji saistītus sistēmu modeļus [MIN 1975b, KAR 1993], kas ir būtiski struktūmodelēšanas pieejā. Katrs slots sastāv no slotu nosaukuma un vērtības [MIN 1975b] vai vērtību saraksta [ROB 1977, GRE 1980, SHA 2003], vai fasetes. Fasete vai fasešu saraksts principā aizvieto slotu vērtību – tās sauc arī par slotu īpašībām [FIK 1985, CZO 1991, KUS 1997, COR 2003, NEG 2004, MAR 2006]. Freima un slotu nosaukumā un/vai vērtībā var būt arī vairāk kā viens vārds, kas apraksta objektu. Slotu vērtība var būt: cits freims, aprakstošs mainīgais vai procedūra [GRU 1997a, FIK 1985, KAR 1993, MIN 1975a, ROB 1977, VAL 2005c, WHE 1993, SHA 2003, MER 2003, COO 2001, LEE 1999, NEG 2004]. Atbilstoši slotu mērķim vai lomai freimā un tajā atspoguļotajai informācijai, slotus var sadalīt dažādos tipos [FIK 1985, MIN 1975a, GRU 1997a, KAR 1993, WHE 1993, COO 2001, MAR 2006, LEE 1999], ko, savukārt, var apvienot kopās. Freimos sakņotās atspoguļošanas pieejās norāda uz slotu iespējamām atšķirībām, dažādām lomām, ierobežojumiem, bet uzskatāmi neizdala slotu tipus [CZO 1991, GRE 1980, KUS 1997, OKA 2007]. Struktūmodelēšanā slotus pēc to lomas freimā sadala dažādos tipos, piemēram, īpašības, kontakti, utt. [ZEL 2007, ZEL 2010a]. Slotos var būt norādes, kas sasaista tajos attēloto informāciju ar citiem freimiem [MIN 1975b]. Norādes tāpat kā citu ar freimu saistīto informāciju atspoguļo apskatītā freima slotos vai pat atsevišķos freimos [MIN 1975a, MIN 1975b, KAR 1993, KAR 1995, GRU 1999, MAR 2006, ZEL 2010a].

Dažkārt freimos iekļauj netikai freima nosaukumu, bet arī virsklases (priekštecis) vai apakšklases (pēctecis) freima nosaukumu. Dažādi freimi sistēmā var koplietot vienus un tos pašus slotus. Iezīmes iekļaušana un koplietošanas iespējas ļauj organizēt freimus taksonomijās jeb mantošanas hierarhijās [ROB 1977, WHE 1993, GRE 1980, SPE 2004, GAN 1993, KAR 1993, GRU 1997a], kurās katrs freims ir saistīts ar vienu (dažās sistēmās ar vairāk kā vienu) priekšteci. Freimi atbalsta hierarhisku atspoguļojumu un zināšanu organizēšanu. Svarīgākās freimu īpašības ir specifiska atspoguļošanas forma, mantošana un klases–apakšklases hierarhija [GRU 1997a, ZEL 2010a].

Dažādos literatūras avotos minētās uz freimiem balstītās zināšanu atspoguļošanas shēmās definē tikai viena veida freimu, turpretim citās izšķir divus vai vairākus freimu tipus (piemēram, klases freims un eksemplāra freims) [KAR 1993]. Atbilstoši SM pieejas aspektiem freimu kopā izdala vienu klases freimu un vienu vai vairākus kontaktu, procedūru (likumu), īpašību (kontekstuālie), alternatīvu un uzvedības freimus (skatīt 3.1. att.).



3.1. att. Freimu kopa

Darba ietvaros izstrādātajā jaunajā freimu kopā pielietojumu un specifiskās iezīmes katram freimam nosaka slots, kuram tas ir piesaistīts. Freimu kopā, freimi ir ne tikai saistīti ar norādēm caur slotiem, bet arī organizēti hierarhijā, kas ļauj īstenot mantošanu freimu kopas ietvaros [GRU 1997a, VAL 2005b, ZEL 2010a]. Klases freimi un atbilstošā freimu kopa, kurā tie ir iekļauti, ir sakārtoti taksonomiskā hierarhijā, un katrs klases freims ir saistīts ar vienu priekšteča freimu. Sarežģītu sistēmu gadījumā sistēmas noteiktu detalizācijas līmeni var veidot ne tikai viens, bet dažādi freimu hierarhijas līmeņi. Tāpēc, veidojot struktūras modeļus, būtiskas ir tieši saistības, ko īsteno ar kontaktu freimiem. Freimu kopā norāda objekta nosaukumu, objekta īpašības (to nosaukumus un vērtības), funkcijas, uzvedību, likumus, kontaktus un saites, kas atspoguļo objekta saistību ar citiem objektiem, un citas objektam būtiskās īpašības [GRU 1997a, ZEL 2008b, ZEL 2008b]. Darba autore katram freimam, kas ir iekļauts freimu kopā ir izveidojusi vizualizētu attēlojumu, kas ir implementēts I4S lietojumā. Freimu kopas izmantošanai sistēmā I4S ir vairākas priekšrocības:

- 1) Zināšanu bāzē un lietotājam redzamajā saskarnē freimu kopu lieto kā zināšanu atspoguļošanas shēmu [GRU 1997a, VAL 2005b]. Vienas un tās pašas datu struktūras izmantošana nodrošina vienotu un viennozīmīgu atspoguļojumu. Freimu kopas ļauj sistematizēt izgūtās zināšanas;
- 2) Freimu kopā ir iespējams vienlaikus atspoguļot: a) sistēmas kopējo struktūru un sistēmas komponentu izkārtojumu dažādos hierarhijas līmeņos; b) organizētību un tai atbilstošo sistēmas struktūru atsevišķā hierarhijas līmenī;

- 3) Freimu kopā apraksta jebkuru sistēmas daļu: gan sistēmas komponentes, gan elementus, gan arī elementu un komponentu alternatīvas;
- 4) Freimu kopā norāda mijiedarbības starp sistēmas daļām, kā arī likumus, kurus īsteno dažādu izmaiņu gadījumos attiecībā uz apskatīto sistēmas daļu un tās iezīmēm;
- 5) Freimu kopā var atspoguļot gan objektu, gan klašu hierarhiju – tātad aprakstīt gan sistēmas struktūru, gan ontoloģijas [GRU 1999, VAL 2005c, ZEL 2010a, ZEL 2010b].

3.2. Sistēma I4S un transformācijas no freimu kopas

Intelektuāla sistēma sarežģītu sistēmu struktūrmodelēšanai (I4S) ir datorsistēma, kurā ir implementēta SM pieeja, lai atbalstītu sarežģītu tehnisku sistēmu struktūrmodelēšanu ar datoru. Sistēmas I4S arhitektūru veido 3 līmeņi: (1) datu un informācijas līmenis, kas atbilst pamatkomponentei datu bāze, (2) loģikas līmenis, kas atbilst zināšanu bāzei un (3) lietojuma līmenis, kas atbilst lietojumam. Lietojums ir izveidots vizualizētā Rad Studio XE2 C++Builder integrētā izstrādes vidē, kas paredzēta lietojumprogrammu izstrādei, un kurā izmanto C++ programmēšanas valodu [HIL 2009]. Sistēmas I4S datu bāze ir izveidota atvērtā koda objektu – relāciju datu bāzes pārvaldības sistēmā PostgreSQL (versija 9.1.) [POS 2012]. Zināšanu bāze ir izveidota, izmantojot C++Builder un PostgreSQL programmatūru iespējas. Sistēmas I4S pamatkomponentes ir savstarpēji saistītas un iekļauj sešus moduļus, kas ļauj īstenot sistēmas I4S funkcionalitāti: 1) Datu bāzes vadības moduli; 2) Palīgfunkciju moduli; 3) Lietotāju sesiju moduli; 4) Datu dzēšanas moduli; 5) Lietojuma vadības moduli; 6) Modeļu un matricu ģenerēšanas moduli. Lai nodrošinātu automatizētu struktūras modeļu konstruēšanu, darba ietvaros izstrādātas transformācijas no freimu kopas uz struktūras modeļiem. Katrai transformācijai ir izveidots atbilstošs algoritms, kas, implementēts sistēmā I4S, no noteiktiem freimu kopas freimiem un slotiem secīgi iegūst nepieciešamās zināšanas modeļu pamatelementu un izvēlētā struktūras modeļa izveidei.

Transformācijas sastāv no 4 pamatdaļām: sistēmas dekompozīcijas līmeņa izvēles, modeļa tipa izvēles, zināšanu izgūšanas no freimu kopas, atbilstošo pamatelementu atspoguļošanas un sasaistīšanas. Lai veiktu transformāciju no freimu kopas uz MSM, FSM FT vai FSM UT, izmanto freimu sistēmas hierarhiju, klases un kontaktu freimus. Tas norāda uz struktūras modeļu savstarpējo saistību un freimu kopas iespējām, vienuviet atspoguļojot zināšanas par dažādiem izpētes sistēmas aspektiem (morfoloģiskiem, funkcionāliem). Transformācijas procesā iegūst informāciju, kas ir nepieciešama modeļa izveidei, vizualizē un

sasaista modeļa pamatelementus un izveido struktūras modeli. Transformācija no freimu kopas uz MSM sastāv no 7 soļiem:

- 1) Izvēlas noteiktu dekompozīcijas līmeni freimu sistēmas hierarhijā;
- 2) Nosaka kādu struktūras modeli veidot un vai to konstruēt visai sistēmai izvēlētajā detalizācijas līmenī, vai arī tikai noteiktai apakšsistēmai.
- 3) No freimu hierarhijas iegūst sistēmas objektu nosaukumus un izveido objektu sarakstu;
- 4) Pārbauda objektu saistības (tai skaitā kontaktus, plūsmas un loģiskos operatorus) un izveido saistību sarakstu;
- 5) No objektu saraksta izvēlas objektus, kas vēl nav atspoguļoti modelī un tos vizuāli attēlo, ievērojot MSM lietotos apzīmējumus;
- 6) Pārbauda saistību sarakstu attiecībā uz atspoguļotajiem objektiem un nosaka kontaktu skaitu. Vizuāli attēlo kontaktus, ja tie ir jānorāda izvēlētajā modelī;
- 7) Savieno objektus, vizuāli attēlojot plūsmas (bultiņa, plūsmas nosaukums un bultiņas krāsa, atbilstoši plūsmas tipam).

Līdzīgi īsteno arī pārējās transformācijas no freimu kopas uz struktūras modeļiem. Transformācijā no freimu kopas uz funkcionālās struktūras modeli parametru telpā (FSM PT), izmanto freimu sistēmas hierarhiju, klases, kontaktu un uzvedības freimus. Sistēma I4S papildus transformācijām no freimu kopas uz struktūras modeļiem veic arī transformācijas no freimu kopas uz notikumu kokiem. FSM PT attēlo visus notikumus un saistības starp tiem, izvēlētajā sistēmas detalizācijas līmenī. Notikumu koks ir grafisks attēlojums noteiktai cēloņseku virknei, kas ļauj identificēt izvēlētajā parametrā konstatēto izmaiņu cēloņus. Mainot sistēmas parametrus, var iegūt secinājumus par to, kāda ir to ietekme uz sistēmas funkcionalitāti. Notikumu kokiem ir būtiska loma diagnostikā, jo tie ļauj spriest par sistēmas uzvedības maiņas cēloņiem. Katram notikumam atbilst viens parametrs vai defekts [GRU 1997b]. Divu notikumu kauzālā secība un tai atbilstošā loģika tiek interpretēta kā kauzālas saites. Kauzālu saišu virkne ļauj veidot notikuma koka struktūru. Notikumu koka pamatelementi ir [GRU 1993, GRU 1997a, GRU 1997b]:

- notikumi, ko attēlo, norādot parametra vai defekta identifikatoru. Notikumu kokā izdala: galīgo notikumu (saistīts ar novēroto parametra vērtības izmaiņu), starpnotikumus (katrs primārais notikums rada vienu vai vairākus secīgus starpnotikumus) un primāros notikumus (galīgā notikuma iestāšanās cēloņi);
- stāvokļu pārejas tiek interpretētas kā cēloņseku saites, ko attēlo orientētu loku veidā;

- loģiskie operatori.

Notikumu koku veido, izvēloties virsotni (parametru), kurā ir konstatētas izmaiņas. Lai iegūtu parametru sarakstu noteiktā detalizācijas līmenī, īsteno transformācijas algoritmu soļus no freimu kopas uz FSM PT. Notikumu koku konstruē, izmantojot parametru un saistību sarakstus un procedūru „pārmeklēšana un atkāpšanās” (no angļ. val. backtrack) [GRU 1997b, RUS 2010], ņemot vērā eksperta izvēlēto parametru. Procedūra īsteno meklēšanu grafā, kāpjoties atpakaļ no izvēlētajā virsotnes (galīgais notikums). Saistītās virsotnes tiek atspoguļotas kokā, ievērojot starp tām norādītos loģiskos operatorus. Procedūrā kāpjas atpakaļ un pievieno virsotnes līdz ir sasniegti primārie notikumi.

3. nodaļas kopsavilkums un secinājumi

- Jaunizveidotā zināšanu izgūšanas un atspoguļošanas shēma – freimu kopa ļauj vienuviet atspoguļot zināšanas par dažādiem izpētes sistēmas aspektiem (morfoloģiskiem, funkcionāliem), kā arī veidot dažādas hierarhijas.
- Transformācijās ir būtiski ievērot ne tikai loģisko operatoru lietojumu, bet arī veikt papildus pārbaudes, lai, veidojot struktūras modeli, nepieļautu vienlaicīgi gan priekšteču, gan pēcteču attēlošanu (tas ir nepieciešams, lai automatizēti izveidotu pareizu struktūras modeli).
- Izstrādātā intelektuālā sistēma I4S ļauj īstenot zināšanu izgūšanu, atspoguļošanu un saglabāšanu.
- Sistēma I4S iekļauj 3 pamatkomponentes, kurās ir implementēta freimu kopa, un 6 moduļus, kas ļauj īstenot struktūrmodelēšanas mērķus. Lietojot iegūtās zināšanas un darba ietvaros izveidotās transformācijas, I4S nodrošina struktūras modeļu un notikumu koku automatizētu konstruēšanu.

4. PRAKTISKA PIEMĒRA REALIZĀCIJA SISTĒMĀ I4S

Lai praktiski pārbaudītu promocijas darba ietvaros izstrādāto sistēmu I4S un tās funkcionalitāti, tajā ir īstenots sarežģītas tehniskas sistēmas – robota AGR8 atspoguļojums, kas ir aprakstīts ceturtnā nodaļas ietvaros. AGR8 ir mobila robota platforma, kas ir izstrādāta Rīgas Tehniskajā universitātē mehānikas un mākslīgā intelekta pētniecības nolūkos [NIK 2010]. Sistēmā I4S ir implementēti risinājumi, kas atbalsta automatizētu struktūras modeļu konstruēšanu, jaunu zināšanu izgūšanu par izpētes sistēmu un tās analīzi. Lai īstenotu izpētes sistēmas struktūrmodelēšanu, sistēma I4S veic šādus uzdevumus:

- atbalsta zināšanu izgūšanu, atspoguļošanu un saglabāšanu tādā veidā, lai zināšanas var koplietot, atkārtoti izmantot un lietot SM mērķu sasniegšanai;
- iegūtās zināšanas sistēma I4S izmanto, lai, lietojot transformācijas algoritmus, automatizēti konstruētu SM pieejā aprakstītos struktūras modeļus un notikumu kokus dažādos sistēmas detalizācijas līmeņos;
- pamatojoties uz atspoguļoto MSM vai FSM FT, sistēma I4S izveido matricas un īsteno sistēmas topoloģisko un kvalitatīvo sistēmas struktūras analīzi, kas nepieciešama, lai veiktu sistēmas izpēti.

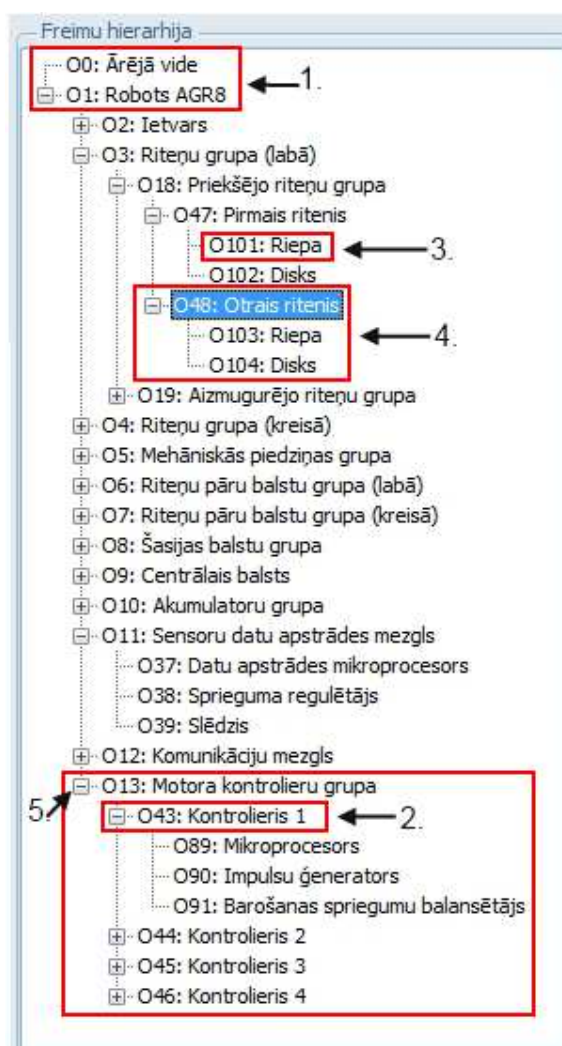
4.1. Zināšanu iegūšana un atspoguļošana sistēmā I4S

Strādājot ar sistēmu I4S, eksperta galvenais uzdevums ir izveidot izpētes sistēmas formālu atspoguļojumu, norādot struktūrmodelēšanai būtiskos aspektus: kādu sistēmu apskata, kādi objekti ir sistēmā un kādas ir starp tiem pastāvošās saistības, kādas ir sistēmas un atsevišķu objektu īpašības un uzvedība. Sistēma I4S var iegūt un atspoguļot eksperta zināšanas attiecībā uz izvēlēto izpētes sistēmu dažādos veidos:

- aprakstot sistēmas objektus, saites ar citiem objektiem, īpašības (piemēram, krāsa svārs, utt.), alternatīvas, ko var izmantot apskatītā objekta vietā;
- detalizējot saistības, plūsmas nosaukumu un tipu, funkcijas nosaukumu un realizēto uzvedību, norādot iespējamās plūsmu kombinācijas, kā arī plūsmas īpašības (piemēram, matērijas veids: eļļa);
- specificējot parametrus katram uzvedības stāvoklim un to savstarpējās saites;
- izveidojot un attēlojot sistēmas daļu, funkciju un īpašību hierarhijas;
- transformējot no eksperta iegūtās zināšanas struktūras modeļos.

Sistēmas apraksta izveidi uzsāk, pievienojot pirmo freimu, kurā norāda sistēmas nosaukumu, kas promocijas darba ietvaros ir *robots AGR8*. Kad pirmais freims ir pievienots, sistēma I4S automātiski pievieno vēl vienu freimu, ar nosaukumu *00: Ārējā vide* (skatīt 4.1. att. 1.). Tas tiek darīts ar nolūku, dot ekspertam iespēju aprakstīt izpētes sistēmas saistību ar tās ārējo vidi, līdz ar to arī plūsmas, kuras ietekmē sistēmas funkcijas un uzvedību vai kuras īsteno sistēma, iedarbojoties uz ārējo vidi. Kad ir norādīts sistēmas nosaukums, tālāk secīgi apraksta sistēmā esošos objektus, freimu hierarhijā pievienojot jaunus freimus ar sistēmas daļu nosaukumiem. Darba autore sistēmā I4S ir atspoguļojusi zināšanas par robota AGR8 struktūru, norādot sistēmā esošo objektu nosaukumus. Freimu hierarhijā (skatīt 4.1. att.) var aplūkot robota dekompozīciju, kas apstiprina I4S iespējas, atspoguļot zināšanas par dažādām sarežģītām sistēmas daļām:

- **komponentēm**, piemēram, *O43: Kontrolieris 1* (skatīt 4.1. att. 2.) ir sistēmas komponente, kas iekļauj sistēmas elementus: *O89: Mikroprocesors*, *O90: Impulsu ģenerators* un *O91: Barošanas spriegumu balansētājs*;
- **elementiem**, piemēram, *O101: Riepa* ir sistēmas elements (4.1. att. 3.);
- **heterogēnām daļām**, piemēram, *O48: Otrais ritenis* (skatīt 4.1. att. 4.) ir sistēmas komponente, kas iekļauj 2 dažādu elementus: *O103: Riepa* un *O104: Disks*;
- **homogēnām daļām**, kā piemēram *O13: Motora kontrolieru grupa* (skatīt 4.1. att. 5.), kas iekļauj četras komponentes – kontrolierus, kuru uzbūve un darbības principi ir identiski.



4.1. att. Freimu hierarhija sistēmai robots AGR8

Sistēma I4S ļauj izveidot saites tikai starp freimu hierarhijā aprakstītiem objektiem, tāpēc vispirms noteikti ir jābūt aprakstītām visām sistēmas daļām. Darba autore ir apskatījusi katru sistēmas daļu atsevišķi, kontaktu slotos norādot saistības starp objektiem, kā arī

norādījusi plūsmas un funkciju nosaukumus, pievienojot kontaktu freima plūsmu slotiem vērtības. Plūsmas nosaukuma vērtība atbilst SM definētiem plūsmas tiptiem, kas var būt enerģija, matērija vai informācija. Funkcijas nosaukumu ievada brīvā formā, piemēram, „Stāvokļu datu uztveršana”. Sistēma I4S, izveidojot jaunu kontaktu slotu, automātiski izveido arī divus uzvedības stāvokļus, kas atbilst ieejas un izejas kontaktiem, kā arī katram uzvedības stāvoklim atbilstošo parametru kopu. Veicot atspoguļojumu, tiek aprakstīti parametru kopā iekļautie parametri un defekti (pievienojot parametru slotus uzvedības freimā), ja tādi pastāv. Parametra un defekta identifikatorus sistēma I4S piešķir automātiski, bet vērtības ir jāievada ekspertam. Kad ir pievienoti parametri un/vai defekti, tad saišu slotos ir jānorāda saistības starp tiem. Pievienojot saiti, pie nosaukuma var izvēlēties kādu no iekšējiem parametriem vai defektu, kā arī loģiskos operatorus.

Sistēma I4S ļauj manipulēt ar atspoguļotajām zināšanām, par objektiem, saitēm, īpašībām un uzvedību. Ekspertam ir iespēja ne tikai pievienot objektu aprakstu, bet arī to mainīt un dzēst, kā arī īstenot reorganizēšanu sistēmas atspoguļojumā. Reorganizēšanas iespēja ir ieviesta, lai atdarinātu pašorganizēšanās procesu, kas ir būtisks sarežģītās sistēmās. Reorganizēt nozīmē to, ka I4S var pārvietot izvēlēto sistēmas daļu (ar visiem tās pēctečiem) uz citu vietu sistēmā, tas ir, mainīt daļas priekštecī. Pārveidot sistēmas struktūras atspoguļojumu ir būtiski ne tikai, ja mainās reālā sistēma, bet arī gadījumos, kad eksperts ir pieļāvis kļūdas, veicot sistēmas aprakstu. Sistēmā I4S, izmantojot freimu hierarhijas iespējas, attēlo dažāda veida hierarhijas: sistēmas daļu, funkciju un īpašību. Pēc eksperta norādes, sistēma I4S konstruē daļu un funkciju hierarhijas arī vizualizēti, izveidojot atbilstošos modeļus. Kad sistēmā I4S ir izveidots izpētes sistēmas apraksts freimu kopā, un ir atspoguļotas visas modelēšanai nepieciešamās sistēmas daļas, to saistības, uzvedība un parametri, kā arī norādīti loģiskie operatori, tad īsteno dažādu struktūras modeļu konstruēšanu, dažādos sistēmas detalizācijas līmeņos.

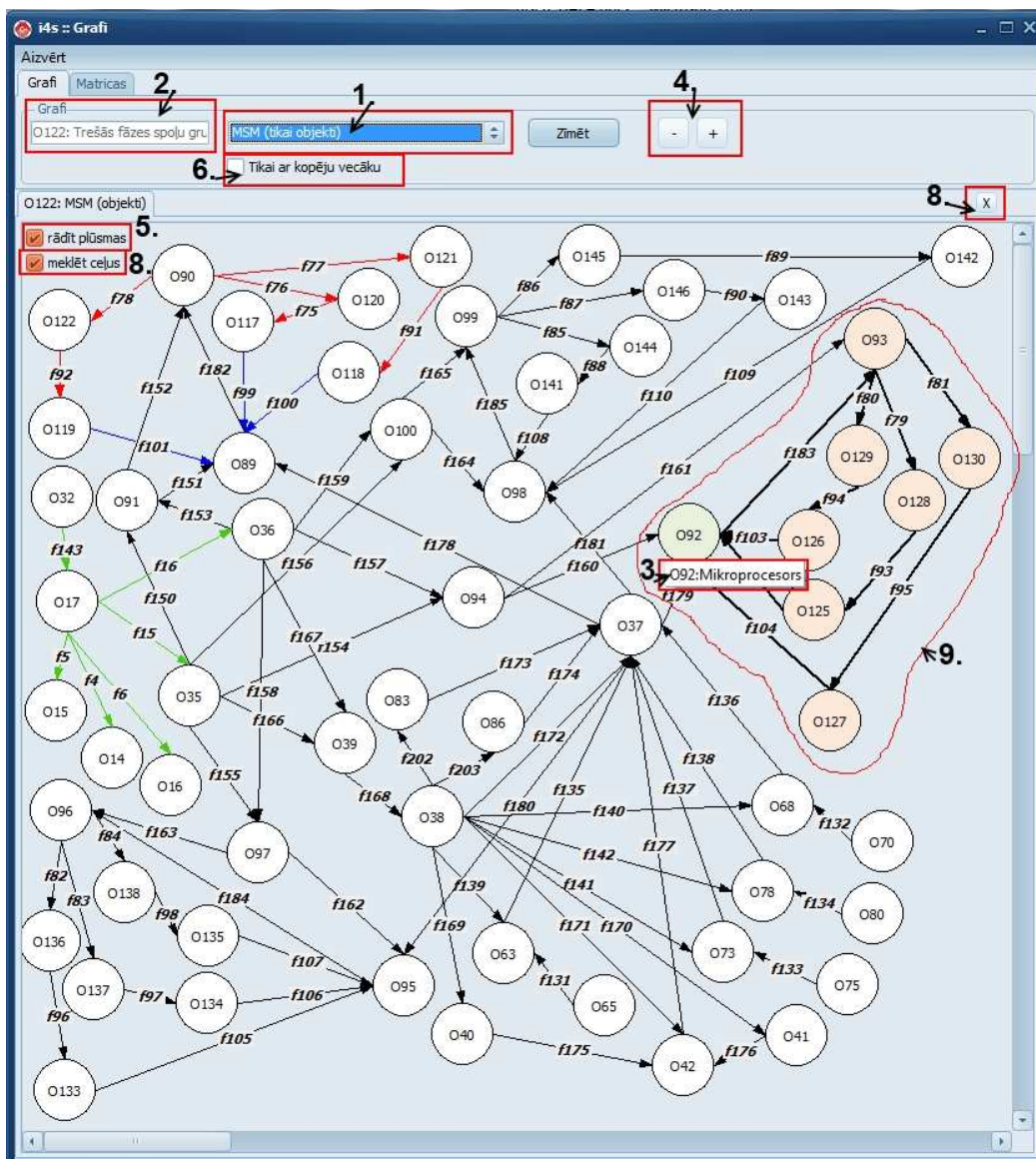
4.2. Robota AGR8 struktūrmodelēšana un analīze ar I4S

Pētot sarežģītas tehniskas sistēmas nepilnīgas informācijas apstākļos, to modeļiem ir jāapmierina šādas prasības [GRU 1993, GRU 1997a]:

- modeli jāspēj izveidot, pamatojoties tikai uz pieejamām zināšanām;
- modelim jāaptver visa sistēma kopumā, neskatoties uz elementu fizisko daudzveidību;
- modelim jābūt viegli koriģējamam sistēmas konstruktīvo izmaiņu gadījumā;
- modelim “jāstrādā” nepilnīgas informācijas apstākļos un jādod jaunas zināšanas par pētāmo sistēmu.

Īstenojot robota AGR8 struktūrmodelēšanu, ir iegūts apstiprinājums, ka struktūrmodelēšanas pieeja, implementēta intelektuālā datorsistēmā I4S, ļauj konstruēt struktūras modeļus, ievērojot iepriekš uzskaitītos kritērijus. Iezīmējot noteiktu freimu freimu hierarhijā un nospiežot peles labo taustiņu, eksperts dod komandu sistēmai I4S veidot struktūras modeļus. Sistēma I4S atver jaunu formu, kurā iespējams izvēlēties, kādus struktūras modeļus konstruēt (skatīt 4.2. att., kurā attēlots struktūras modeļa piemērs):

1. MSM pēc eksperta izvēles var norādīt vai nenorādīt plūsmu nosaukumus. Objektus atspoguļo, ievērojot to, vai daļa ir komponente vai elements. MSM sistēmā I4S apzīmēts kā:
 - a. *MSM (tikai objekti)* ir morfoloģiskās struktūras modelis, kurā attēlo tikai objektus bez kontaktiem un starp tiem esošās plūsmas;



4.2. att. MSM (tikai objekti) atspoguļojums

- b. *MSM (ar kontaktiem)* – modelī atspoguļo objektus kopā ar kontaktiem un starp objektiem pastāvošās plūsmas;
 - c. *MSM (ar uzvedības stāvokļiem)* – modelī attēlo objektus kopā ar uzvedības stāvokļiem un starp objektiem pastāvošās plūsmas;
2. FSM FT sistēmā I4S ir apskatīts kā *FSM (funkciju telpā)*. Modelī atspoguļo funkcijas un starp tām pastāvošās cēloņseku saites. Lai atbalstītu eksperta spriešanu par sistēmu, sistēma I4S izvada arī produkciju likumu tabulu, kas atbilst sistēmas funkcijām un to saistībām izvēlētajā sistēmas detalizācijas līmenī.
3. FSM UT sistēmā I4S apzīmēts kā:
- a. *FSM (uzvedības telpā-uzvedība)*. Struktūras modelī attēlo uzvedību (vienkopus divi uzvedības stāvokļi) un cēloņseku saites;
 - b. *FSM (uzvedības telpā-uzvedības stāvokļi)* – modelī atspoguļo uzvedības stāvokļus un starp tiem esošās cēloņseku saites;
4. FSM PT sistēmā I4S apskatīts kā:
- a. *FSM (parametru telpā-parametru kopas)* – modelī attēlo parametru kopas un cēloņseku saites;
 - b. *FSM (parametru telpā-parametri)* – modelī attēlo parametrus un defektus un starp tiem pastāvošās cēloņseku saites;

Izvēloties kādu no konstruētiem struktūras modeļiem un nospiežot pogu „Zīmēt”, sistēma I4S attēlo struktūras modeli. Struktūras modeļi atspoguļo visu sistēmu vai izvēlēto komponenti, neskatoties uz sistēmas daļu fizisko daudzveidību, dažādo uzvedību un īpašībām. Modeļi ir viegli maināmi, un, ekspertam veicot izmaiņas freimu kopās, sistēma I4S konstruē jaunu modeli. Izstrādājot sistēmu I4S, tajā ir iekļauta arī agrāk struktūrmodelēšanā aprakstītā teorētiskā grafu analīzes daļa [GRU 1993]. Līdz ar to uzkonstruētām MSM vai FSM FT sistēma I4S veic topoloģisko un kvalitatīvo struktūras analīzi. Sistēma I4S automatizēti var izveidot šādas matricas: (1) blakusvirsotņu matricu; (2) sasniedzamības matricu; (3) incidentu matricu (4) attālumu matricu. Sistēmā I4S eksperts var apskatīt arī blakusvirsotņu matricu reizinājumus, izvēlētajā pakāpē (no 1 līdz n, kur n ir virsotņu skaits MSM). Reizinājums ir būtisks, lai noteiktu ceļu un ciklu skaitu starp struktūras modelī attēlotiem objektiem, noteiktā garumā, kā arī attālumus starp virsotnēm.

Struktūras topoloģiskā analīze ir analīzes veids, kurā pēta struktūras elementu savstarpējo saistību [НИК 1985, GRU 1993]. Sistēmā I4S ir implementēta iespēja veikt tiešo saišu analīzi un topoloģisko šķirošanu apskatītajai izpētes sistēmas struktūrai, ko attēlo MSM vai FSM FT. Lai realizētu tiešo saišu analīzi, izmanto blakusvirsotņu matricu. Lai īstenotu

topoloģisko šķirošanu, izmantojot blakusvirsotņu matricu, veic klasifikāciju, sadalot apskatītos elementus četrās apakškopās [KNO 2005]. Sistēma I4S ļauj īstenot izpētes sistēmas struktūras kvalitatīvo analīzi, kas ir analīzes veids, kurā tiek noteikti struktūras kvalitatīvie rādītāji – elementu rangi. Rangu var noteikt pēc dažādiem kritērijiem [GRU 1993]:

- Pēc lokālās pakāpes. Tad rangu apzīmē kā R(LP);
- Pēc ceļu un ciklu skaita ar ierobežotu garumu (sistēmā I4S eksperts var norādīt garumu no 1 līdz n, kur n ir virsotņu skaits), kas iziet no apskatītās virsotnes. Rangu apzīmē kā R(CE);
- Pēc sasniedzamo virsotņu skaita. Rangu apzīmē kā R(S).

Bez matricu analīzes sistēma I4S ļauj meklēt arī ceļus izveidotajā MSM un FSM FT, starp jebkurām divām virsotnēm. Sistēma I4S ekspertam ļauj veidot arī notikumu kokus, ko tālāk var izmantot, lai spriestu par defektu seku izplatīšanos sistēmā. Eksperts izvēlas parametru, kurā konstatētas izmaiņas, un nospiež pogu „Zīmēt”. Sistēma I4S automātiski konstruē notikumu koku, kurā izvēlētais parametrs ir notikumu koka virsotne.

4. nodaļas kopsavilkums un secinājumi

- Ir aprakstīta izpētes sistēma robots AGR8, atspoguļojot zināšanas par objektiem, no kuriem tas sastāv, saitēm starp šiem objektiem, plūsmām, funkcijām un uzvedību, kas tiek īstenota sistēmā, kā arī parametriem un iespējamiem defektiem.
- Sistēma I4S, izmantojot eksperta atspoguļotās zināšanas, ļauj īstenot sarežģītas tehniskas sistēmas struktūrmodelēšanu, kā arī veikt izveidotās struktūras topoloģisko un kvalitatīvo analīzi (gan MSM, gan FSM FT).
- Skaidrojot sistēmā I4S iespējamās struktūras modelēšanas un analīzes iespējas un realizējot piemērus attiecībā uz sistēmu robots AGR8 ir konstatēts, ka sistēmā I4S var:
 - īstenot zināšanu izgūšanu, atspoguļošanu, labošanu un saglabāšanu attiecībā uz izvēlēto izpētes sistēmu;
 - atspoguļot dažādas hierarhijas (objektu, funkciju, īpašību), kas ļauj izprast izpētes sistēmas uzbūvi;
 - konstruēt 8 dažādus struktūras modeļus un notikumu kokus dažādos eksperta izvēlētos sistēmas detalizācijas līmeņos gan visai sistēmai, gan atsevišķām sistēmas komponentēm.
- Īstenojot struktūras modeļu automatizētu izveidi sistēmā I4S, salīdzinot ar modeļu manuālu izveides procesu, ekspertam nav nepieciešams ieguldīt daudz laika, lai izveidotu nepieciešamos struktūras modeļus (nospiežot pogu, tiek izveidots modelis).

DARBA KOPEJIE REZULTĀTI UN SECINĀJUMI

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt intelektuālu sistēmu, kas paredzēta sarežģītu sistēmu struktūrmodelēšanai, un pārbaudīt to, konstruējot sarežģītas tehniskas sistēmas struktūras modeļus. Lai noteiktu prasības pret sistēmu, darba ietvaros ir veikti šādi uzdevumi:

- IZanalizētas sarežģītas sistēmas un noteiktas to būtiskākās īpašības, ko nepieciešams ievērot, izstrādājot sarežģītas sistēmas modeli:
 - daudz un dažādas (homogēnas, heterogēnas, vienkāršas un saliktas) daļas, kas mijiedarbojas dažādos veidos;
 - daudzveidīga (tīklveida un hierarhiska) un sadalāma (var veikt dekompozīciju) struktūra;
 - katrai sistēmas daļai piemīt īpašības un uzvedība un sistēmai kopumā piemīt sistēmīpašības un sistēmuzvedība;
 - sistēma sadarbojas ar ārējo vidi, pašorganizējas un attīstās laikā.
- Izpētes rezultātā secināts, ka sarežģītu tehnisku sistēmu specifika un pieejamais informācijas apjoms ir noteicošie faktori modelēšanas pieejas izvēlē un šiem kritērijiem atbilst struktūrmodelēšanas pieeja.
- Aplūkota struktūrmodelēšanas pieeja, noskaidrotas tās iespējas un konstatētas nepilnības, ko ir būtiski novērst, īstenojot struktūrmodelēšanu datorsistēmā.
- Veikta intelektuālu sistēmu uzbūves un darbības principu analīze un sniegta intelektuālas sistēmas definīcija, kas ir saistoša promocijas darba ietvaros.
- Izpētīts freima lietojums dažādās pieejās un noteiktas tā galvenās iezīmes, kā arī aprakstīti struktūrmodelēšanā iepriekš izmantotās zināšanu izgūšanas un atspoguļošanas shēmas trūkumi. Analīze ļāva noskaidrot prasības pret zināšanu izgūšanas un atspoguļošanas shēmu, kas ir jāimplementē intelektuālā sistēmā struktūrmodelēšanas mērķu īstenošanai.

Lai novērstu struktūrmodelēšanas pieejā konstatētās nepilnības un realizētu intelektuālas sistēmas izstrādi programmatūrā, **promocijas darba ietvaros ir iegūti šādi jauni teorētiskie rezultāti:**

- Struktūras modeļiem izstrādāti jauni pamatelementi (loģiskie operatori) un skaidrotas to pielietojšanas iespējas.
- Pilnveidota struktūras modeļu sintakse un semantika un transformācijas algoritmi starp struktūras modeļiem.

- Izstrādāta zināšanu izgūšanas un atspoguļošanas shēma – freimu kopa un transformācijas algoritmi no tās uz struktūras modeļiem.
- Izstrādāta intelektuālas sistēmas arhitektūra sarežģītu sistēmu struktūrmodelēšanai.

Iegūtie teorētiskie rezultāti ir praktiski realizēti intelektuālā sistēmā I4S, īstenojot šādus uzdevumus:

- Zināšanu izgūšanas un atspoguļošanas shēma – freimu kopa ir implementēta intelektuālas sistēmas arhitektūrā. Shēma ļauj izgūt un atspoguļot zināšanas no eksperta un tās saglabāt tā, lai varētu koplietot, atkārtoti pielietot, kā arī izmantot automatizētai struktūras modeļu konstruēšanai un struktūras analīzei.
- Izveidotā intelektuālas sistēmas arhitektūra ir praktiski realizēta programmatūras veidā.
- Pārbaudīta izstrādātās intelektuālās sistēmas I4S darbība un atbilstība struktūrmodelēšanas mērķiem, atspoguļojot tajā zināšanas par sarežģītu tehnisku sistēmu robots AGR8 un veicot tās struktūras modeļu ģenerēšanu, kā arī struktūras analīzi.

Iespējamie turpmākie pētījumu virzieni ir:

- Papildus grafisku modeļu un algoritmu realizēšana intelektuālā sistēmā I4S, kas atbalstītu detalizētāku izpētes sistēmas analīzes īstenošanu, kā arī ļautu veikt sistēmu projektēšanu.
- Mehānismu izstrādi, kas ļauj interpretēt un pielietot sistēmā I4S iegūtos produkciju likumus.

BIBLIOGRĀFISKAIS SARAKSTS

- [ACK 1971] Ackoff R.L., 1971, Towards a system of system concepts, Management science, Vol 17, No 11, pp. 661- 671.
- [AMA 2004] Amatriain X., 2004, An Object-oriented Metamodel for digital signal processing, Thesis (PhD), Universitat Pompeu Fabra, p 399.
- [APP 2011] Jurgen Appelo, 2011, Management 3.0: Leading Agile Developers, Developing Agile Leaders, (Addison-Wesley Signature Series (Cohn)), p. 464.
- [ASH 1981] Ashby W.R., 1981, Mechanisms of Intelligence: Ashby's Writings on Cybernetics by Conant R., p. 442.
- [ASH 2004] Ashby W.R., 1962, Principles of self – organizing system, Principles of self – organization: Transactions of the University of Illinois Symposium, (Von Foerster, Zopf G.W.

- Eds.), Pergamon Press: London, UK, pp. 255-278. Reprinted in E:CO Special Double Issue Vol. 6 No. 1/2 Fall by Goldstein J., **2004**, pp.102-126.
- [ASH 2007] Ashby W.R. Requisite variety and its implications for the control of complex systems, *Cybernetica Vol.1*: No. 2, 1958 pp. 83-99. Reprinted in *Mechanisms of Intelligence: Ashby's Writings on Cybernetics* by Conant R., 1981; Reprinted on the web Principia Cybernetica Project by Heylighen F. 2007.
- [AST 1996] Astudillo H.R., 1996, Reorganizing Split Objects, In proceedings of the ACM SIGPLAN Conference on Object-Oriented Programming Systems, Languages & Applications (OOPSLA '96), pp. 138-149.
- [BAR 1997] Bar-Yam Y., 1997, *Dynamics Of Complex Systems*. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, pp. 848.
- [BEE 1995] Beer S., 1995, *Platform for Change*, Published by Wiley J.& Sons Ltd., reprinted from 1978, pp. 468.
- [BER 1969] Von Bertalanffy, L., 1969, *General System Theory: Foundations, Development, Applications*. George Braziller: NY, Revised Edition, p. 296.
- [BIE 1991] Bielawski L., Lewland R., 1991, *Intelligent system design: integrating expert systems, hypermedia, and database Technologies*, New York, John Wiley & Sons, p. 302
- [BOP 2008] Воройский Ф. С., 2008, *Энциклопедический систематизированный словарь-справочник ИНФОРМАТИКА, Электронное издание №5, ГПНТБ России*, с. 842.
- [BOU 2004] Boulding K.E., 2004, *General systems theory*: E:CO Special Double Issue Vol. 6 No. 1/2 Fall, pp.127-139, reprinted by Richardson K. from *The skeleton of science*, *Management Science*, 2, 1956, pp. 197-208.
- [BRO 1998] Brown D.C., 1998, *Intelligent Computer-Aided Design*, AI in Design Group, *Encyclopedia of Computer Science and Technology*, (Williams J.G., Sochats K., Eds.), p. 19.
- [BRO 1999] Brown D. E., Pomykalski J. J. and Truszkowski W.F., 1999, *Expert Systems*, Wiley Encyclopedia for Electrical and Electronics Engineering, p. 66.
- [CAP 1996] Capra F., 1996, *The Web of Life: A New Scientific Understanding of Living Systems*, Anchor Books, Doubleday, New York, p. 368, pp. 3 – 112.
- [CAR 2004] Carpenter S. A., Cannady, J., 2004, *Tool for Sharing and Assessing Models of Fusion-Based Space Transportation Systems*, Proceedings of the 40th AIAA/SAE/ASME/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Paper AIAA-2004-3535, p. 9.
- [CHU 1979] Churchman C. W., 1979, *The Systems Approach*, Published by Delacorte Press, Paperback edition Dell Publishing, New York, p. 243.
- [COO 2001] Cook S. C., Kasser J.E., Asenstorfer J., 2001, *A Frame-Based Approach to Requirements Engineering*, 11th International Symposium of the INCOSE, Melbourne, Australia, p. 9.
- [COR 2003] Cornet R., Abu-Hanna, A., 2003, *Using description logics for managing medical terminologies*. In: Dojat, M., Keravnou, E., Barahona, P. (Eds.), *Artificial Intelligence in*

- Medicine. Proceedings of the Ninth Conference on Artificial Intelligence in Medicine in Europe (AIME), pp. 61-70.
- [CZO 1991] Czogala E., Cholewa W., 1991, Management of Statements in Frame Interpreter of CC_SHELL, Busefal journal 49 (october), LISTIC, p. 10.
- [DUR 1994] Durkin J., 1994, Expert Systems Design and Development, Macmillan Publishing, ISBN0-02-330970-9, p. 800.
- [EDM 1999] Edmonds B., 1999, Syntactic Measures of Complexity, Doctor thesis, The University of Manchester, United Kingdom, p. 245.
- [EUR 2012] European Commission, 2012, Theme 3, ICT - information and communications Technologies, Work programme 2013, p. 170.
- [FAY 1996] Fayyad U., Piatetsky-Shapiro G., Smyth P., 1996, From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases, AI Magazine, pp. 37-54.
- [FIK 1985] Fikes R., Tom Kehler, 1985, The Role Of Frame-Based Representation In Reasoning, Communications of the ACM, v.28 n.9, pp. 904-920.
- [GAN 1993] Gan H., 1993, Script and Frame: Mixed Natural Language Understanding System with Default Theory, Methodologies for Intelligent Systems, In proceedings of 7th International Symposium (ISMIS '93), Trondheim, Norway, pp. 466-475.
- [GAR 2001] Garcia R.M., 2001, Simulation for sytem fault diagnosis, Master thesis, Delf university of Technology, Netherlands, p. 89.
- [GLO 2002] Glouberman S., Zimmerman B., 2002, Complicated and Complex Systems: What Would Successful Reform of Medicare Look Like? Catalogue No. CP32-79/8-2002E-IN, Discussion paper No. 8, p. 37.
- [GOL 1999] Goldenfeld N., Kadanoff L.P., 1999, Simple Lessons from Complexity, Science 2: Complex Systems, Vol. 284 no 5411, pp. 87-89.
- [GRE 1980] Greiner R., 1980, RLL-1: A Representation Language Language, Proceedings of the First National Conference of the American Association of Artificial Intelligence, p.46.
- [GRE 1996] Greenberg M., Westbrook D.L., 1996, The Frame System, Experimental Knowledge Systems Laboratory, University of Massachusetts Amherst, p.40.
- [GRU 1972] Grundspenkis J., 1972, Disertācijas autoreferāts, p. 132.
- [GRU 1993] Grundspenkis J., 1993, Sarežģītu tehnisku sistēmu struktūmodelēšana nepilnīgas informācijas apstākļos, zinātnisko darbu apskats habilitētā zinātņu doktora grāda iegūšanai, p. 33.
- [GRU 1997a] Grundspenkis J., 1997. Structural Modelling of Complex Technical Systems in Conditions of Incomplete Information: A Review. In: Modern Aspects of Management Science, No 1. Riga, Latvia, pp. 111-135.
- [GRU 1997b] Grundspenkis J., 1997, Causal Domain Model Driven Knowledge Acquisition for Expert Diagnosis System Development. Applications of AI to Production Engineering. Lecture

- Notes of Nordic - Baltic Summer School '97. K.Wong and H.Pranevicius (Eds.), Kaunas University of Technology Press, Kaunas, Lithuania, pp.251-268.
- [GRU 1999] Grundspenkis J., 1999, Reasoning Supported by Structural Modelling. Intelligent Design, Intelligent Manufacturing and Intelligent Management. Lecturer notes of the Nordic-Baltic Summer School on Applications of AI to Production Engineering. K.Wang and H.Pranevicius (Eds.), Kaunas University of Technology Press, Technologija, pp.57-100.
- [GRU 2001] Grundspenkis J., Jekabsons J., 2001, Model Transformation for Knowledge Base Integration within the Framework of Structural Modelling. In: Databases and Information Systems. Fourth International Baltic Workshop, Baltic DB&IS 2002, Vilnius, Lithuania, May 1-5, 2000, Selected Papers, (Barzdins J., Caplinskas A., Eds.), Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, pp. 261-274.
- [GRU 2002] Grundspenkis J., 2002, Reasoning in Structural Model-Based Diagnosis. In: Proceedings of the 4th International Conference of Quality, Reliability and Maintenance, QRM2002, Oxford, March 21-22, (G. J. McNulty, Ed.), Professional Engineering Publishing, London, UK, pp. 295-298.
- [GRU 2004] Grundspenkis J., 2004. Automated Transformation of the Functional Model into the Diagnosis Knowledge Base. In: Proceedings of the 5th International Conference on Quality, Reliability and Maintenance, QRM 2004, Oxford, 1-2 April, 2004, (McNulty G.J., ed.), Professional Engineering Publishing, London, UK, 2004, pp. 295-298.
- [HAK 2006] Haken H., 2006, Information and Self-Organization: A Macroscopic Approach to Complex Systems, Springer Verlag, 3rd enlarged edition, pp. 262.
- [HAL 1968] Hall A. D., Fagen R. E., 1968, Definition of System, in Modern Systems Research for the Behavioral Scientist: *A Sourcebook* (Ed. Buckley W.), Aldine Publishing Company (reprinted from *General Systems I* 1956), pp. 18-28
- [HEY 1990] Heylighen F., 1990, Representation and Change, A Metarepresentational Framework for the Foundations of Physical and Cognitive Science, Communication & Cognition, Gent. Belgium, p. 200.
- [HEY 2001] Heylighen F., 2001, The Science of Self-organization and Adaptivity, Knowledge Management, Organizational Intelligence and Learning, and Complexity (Kiel L. D. ed.), in: The Encyclopedia of Life Support Systems, (Eolss Publishers, Oxford), pp. 253-280.
- [HEY 2008] Heylighen F., 2008, Five questions on complexity, Complexity: 5 questions, (In Gershenson C. Eds.), Automatic Press/ VIP, pp. 156.
- [HIL 2009] Hillmann V., 2009, An Introduction to Embarcadero® C++Builder® 2010, Embarcadero Technologies whitepaper, p. 106.
- [HOP 2012] Hopgood A. A., 2012, Intelligent Systems for Engineers and Scientists, Third Edition, p. 451.

- [HOR 1995] Horgan J., 1995, From complexity to perplexity, *Scientific American*, Volume 272, Issue 6, pp. 74–79.
- [INF 2011] Information Society Technologies Advisory Group, 2011, 10 Key Recommendations, Vision and Needs, Impacts and Instruments, Orientations for EU ICT R&D & Innovation beyond 2013, Report for European Commission, p.61.
- [JOH 2009] Johnson N.F., 2009, Simply complexity, A Clear guide to complexity theory, *Oneworld*, p. 256.
- [JOS 2000] Joslyn C., Rocha L., 2000, Towards semiotic agent-based models of socio-technical organizations, *Proc. AI, Simulation and Planning in High Autonomy Systems (AIS 2000) Conference*, Tucson, Arizona, pp. 70-79.
- [KAR 1993] Karp P.D., 1993, The Design Space of Frame Knowledge Representation Systems, *Artificial Intelligence Center, SRI International, SRI AI Center Technical Note Nr. 520*, p. 54.
- [KAR 1995] Karp P.D., Myers K., Gruber T., 1995, The generic frame protocol, in *proceedings of the Fourteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-95)*, Canada, pp. 768-774.
- [KHA 2010] Khalil A. Yaghi K.A., Barakat S., 2010, Predicting the Life Cycle of Complex Technical Systems (CTS), In *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology*, Issue 69, pp. 316 – 319.
- [KNO 2005] Knorn Florian, 2005, Ranking and Importance in Complex Networks, B.Sc. thesis, *Otto von Guericke Universität Magdeburg*, p. 128.
- [KRI 1986] Krippendorff K. A., 1986, *Dictionary of Cybernetics*, NorfolkVA: The American Society for Cybernetics, pp. 81.
- [KUS 1997] Kusiak A., 1997, Knowledge – based systems, *Lecturer notes of the Nordic-Baltic Summer School on Applications of AI to Production Engineering*, K. Wang, H.Pranevicius (Ed.), Kaunas, Lithuania, pp. 45-79.
- [LEE 1999] Lee F., and Heyworth, R., 1999, Errors Due to Misperception and the Default- Value Model. *Advanced Research in Computers and Communications in education*. G.Gumming et.al., (Eds), IOS Press, p. 6.
- [LIE 1997] Liebowitz J. (Ed.), 1997, *The Handbook of Applied Expert Systems*, CRC Press; 1 edition, p. 736.
- [MAR 2006] Martins J. P., 2006, *Foundations of knowledge representation and reasoning*, Chapter 7: Frames, *Technical University of Lisbon (Portugal)*, pp. 270 – 299.
- [MAT 1974] Maturana H.R., 1974, Cognitive strategies, in Von Foester, Heinz (ed.), *Cybernetics of Cybernetics*, UrbanaIL: Biological Computer Laboratory, University of Illinois, pp. 457-469.
- [MCC 1997] McCawley P. F., 1997, *The Logic Model for Program Planning and Evaluation*, CIS 1097, University of Idaho Extension Program, p. 5.

- [MCC 2000] McCarthy I.P., Rakotobe J.T., Frizelle G., 2000, Complex system theory: implications and promises for manufacturing organisations, *Int. J. Manufacturing Technology and Management*, Vol. 2, Nos. 1-7, pp. 559 – 579.
- [MEN 2010] Mens T., Magee J., Rumpe B., 2010, Evolving Software Architecture Descriptions of Critical Systems, *IEEE Computer* 43: 5, pp. 42-48.
- [MER 2003] Merritt D., 2003, Rules, *AI Expert Newsletter, Architecture & Design*, Dr. Dobb's Journal, Vol 11, p. 6.
- [MIN 1975a] Minsky M., 1975, A Framework for representing knowledge, (P.Winston Ed.), *The Psychology of Computer Vision*. New York: McGraw-Hill, pp. 211–277.
- [MIN 1975b] Minsky M., 1975, Minsky's frame system theory, *Proceedings of the 1975 workshop on Theoretical issues in natural language processing*, pp. 104-116.
- [MOU 2009] Mouchart M., Russo F., Wunsch, G., 2009, Structural modelling, exogeneity, and causality, *Causal Analysis in Population Studies: Concepts, Methods, Applications* (Engelhardt H., Kohler H. P., Fürnkranz - Prskawetz A., Eds.), *The Springer Series on Demographic Methods and Population Analysis*, Springer, Dordrecht, Netherlands, pp. 59-82.
- [NEG 2004] Negnevitsky M., 2004, *Artificial intelligence: a guide to intelligent systems*, Addison Wesley; 2 edition p. 440, pp. 131-162.
- [NGU 2010] Nguyen-Thi T.U., Martin L., 2010, Impact of R&D and ICT on Innovation and Productivity. Empirical evidence from micro data, In *Proceedings of DRUID Summer Conference 2010, „Opening Up Innovation: Strategy, Organization and Technology”*, p. 27.
- [NIK 2010] Nikitenko A., Kulikovskis G., 2010, Eight wheel robotic platform and its Fuzzy control system, *Proceedings of International conference on automation, robotics and control systems*, Orlando, USA, pp. 16. – 23.
- [OKA 2007] Okafor E.C., Osuagwu C., 2007, Issues in Structuring the Knowledge-base of Expert Systems *Electronic Journal of Knowledge Management (EJKM)*, Volume 5 Issue 3, pp. 313-323.
- [OSI 1969] Осис Я., 1969, Топологическая модель функционирования систем. *Автоматика и вычисл. техника*. АН Латв. ССР, № 6, с. 44-50.
- [OXF 2009] Oxford Dictionaries, 2009, *Concise Oxford English Dictionary: Luxury Edition*, 11th edition, OUP Oxford, p. 1728.
- [PEA 2002] Pease A., Liuzzi R.A., Gunning D., 2002, Knowledge bases, *Encyclopedia of Software Engineering*, 2nd ed., Volume I (J. Marciniak, Ed.), USA, New York: Wiley & Sons, pp. 696-704.
- [PEI 2011] Peine A., 2011, Challenging Incommensurability: What We Can Learn From Ludwik Fleck for the Analysis of Configurational Innovation, *Minerva*, Volume 49, Issue 4, pp. 489-508.
- [POD 2012] Podnieks K., 2012, *Datizraces metodes (I, II)*, *Datizrace (Data Mining) kurss*, p. 47.

- [POL 2002] Polyakov L.M., 2002, Structure Approach to the Intelligent System Design, Proceedings of the 2002 PerMIS Workshop, p. 10.
- [POS 2012] PostgreSQL Global Development Group, 2012, PostgreSQL 9.1.5 Documentation, University of California, p.2652.
- [RIC 2000] Richardson K. A., Mathieson G., Cilliers P., 2000, The Theory and Practice of Complexity Science: Epistemological Considerations for Military Operational Analysis, *SystemeMexico*, Vol 1: pp. 25-66.
- [RIC 2001] Richardson K.A., Cilliers P., 2001, What is Complexity Science? A View from Different Directions, *Emergence*, Vol. 3 (1), pp. 5-23.
- [ROB 1977] Roberts R. B. and Goldstein, I. P., 1977, The FRL Primer. Technical Report. UMI Order Number: AIM-408, Massachusetts Institute of Technology. p. 28.
- [ROS 1979] de Rosnay J., 1979, The macroscope: a new world scientific system, Publisher Harper & Row, pp. 247, reprinted in *Principia Cybernetica Web*, 1999, by Vranckx A., Heylighen F.
- [RUD 2008] Rudas I.J., Fodor J., 2008, Intelligent Systems, *International Journal of Computers Communications and Control*, Volume: 3, Suppl. Issue: Proceedings of ICCCC, pp. 132-138.
- [RUS 2010] Russell S., Norvig P., 2010, *Artificial Intelligence: A Modern Approach* (3rd Edition), Pearson Education, Upper Saddle River, New Jersey, p. 1152.
- [SHA 2003] Sharma A.K., Kumar C., Mustafa K., & Kumar A., 2003, A Fuzzy Frame Based Expert Shell, In *Proceedings of the National workshop on Information Technology Services and Applications (WITSA-2003)*, New Delhi, p. 6.
- [SIM 1962] Simon H.A., 1962, The Architecture of Complexity. *Proceedings of the American Philosophical Society*, Vol. 106, No. 6., republished by JSTOR, 2007, pp. 467-482.
- [SIM 1987] Simon H.A., 1987, *Models of man: social and rational*, published by Garland Pub., New York, pp. 287 (p. 198), Reprint. Originally published: New York : Wiley, 1957.
- [SKY 2006] Skyttner L., 2006, *General Systems Theory: Problems, Perspective, Practice*. World Scientific Publishing Company; 2 edition, pp.536.
- [SOK 2010] Sokolowski, J. A. and Banks, C. M. (eds), 2010, *Modeling and simulation fundamentals: theoretical underpinnings and practical domains*, Wiley & Sons, Inc. Publication, USA, p. 437.
- [SPE 2004] Spenser C., 2004, WIN-Prolog 4.9 Flex Tutorial, Logic Programming Associates Ltd, p. 68.
- [STA 2006] Stahl T., Voelter M., 2006, Chapter 2: MDSD – Basic Ideas and Terminology, *Model-Driven Software Development: Technology, Engineering, Management*, p. 444, pp. 11-29.
- [TUT 2001] Tutte W.T., 2001, *Graph Theory*, Cambridge University Press, New York, p. 360.
- [UEN 1991] Ueno h., Yamamoto Y., Fukuda H., 1991, Knowledge modeling and model-based problem solving-towards a multi-use engineering knowledge base, *Applications of Supercomputers in Engineering II*, (Brebba C.A., Howard D., Peters A., Eds.), Elsevier Applied Science, pp. 215-231.

- [VAL 2005a] Valkovska I., Grundspenkis J., 2005, Development of Frame Systems Shell for Learning of Knowledge Representation Issues. In Proceedings of the International Conference on Computer Systems and Technologies – CompSysTech'05, Varna, Bulgaria, June 16-17, (Ed. Rochev B., Smrikarov A.), The Bulgarian Chapter of ACM, pp. IV.11.-1 – IV.11.-6.
- [VAL 2005b] Valkovska I., Grundspenkis J., 2005, Representation of Complex Agents by Frames for Simulation of Internal Relationships in Structural Modelling. In Proceedings of the 19th European Conference on Modelling and Simulation (ECMS 2005), pp. 151-157.
- [VAL 2005c] Valkovska I., Graudina V., Grundspenkis J., 2005, Usage of Frame System for Modelling of Intelligent Tutoring System Architecture. In Annual Proceedings of Vidzeme University College. ICTE in Regional Development. Valmiera, pp. 105-109.
- [VAZ 2009] Vazquez, F. and Gonzalez-Avella, J. and Eguiluz, V. and Miguel, M.S., 2009, Collective Phenomena in Complex Social Networks, In journal Applications of Nonlinear Dynamics Model and Design of Complex Systems, (In, Visarath; Longhini, Patrick; Palacios, Antonio, eds) XII , Springer Verlag, pp. 189-200.
- [VIC 2002] Vicsek T., 2002, Complexity: The bigger picture. Nature, Vol. 418, Issue 6894, pp. 131.
- [WEA 2004] Weaver W., 2004, Science and complexity, E:CO Special Double Issue Vol. 6 No. 3, pp. 65-74, reprinted by Wirth K from American scientist, 36: 536, 1948, pp. 536-544.
- [WEI 2009] Weisfeld M.A., 2003, The Object-Oriented Thought Process, Addison-Wesley Professional, 3rd edition, p.360, pp. 10- 50.
- [WHE 1993] Wheeler, L. A., Shapiro, A. E., 1993, Method and apparatus for storing information about and associating slot behaviors of a slot in a frame-based semantic network, United States Patent US5208899, (Pittsburgh, PA), p. 33.
- [WHI 1999] Whitesides G.M., Ismagilov R.F., 1999, Complexity in Chemistry, Science 2: Complex Systems, Vol. 284, pp. 89-92.
- [WOO 2004] Woog R. Attachment F, 2004, Contemporary Theories and Thinking, The Knowing of Knowledge, p. 19.
- [YOU 2007] Young B.J., Booch G., Conallen J., Engel M.W., Houston K. A., Maksimchuk R.A., 2007, Chapter 1: Complexity, Object-Oriented Analysis and Design with Applications, 3rd Edition, Addison-Westley, p. 717, pp. 3-29.
- [ZEL 2007] Zeltmate, I., 2007, Frame system development for structural modelling knowledge representation purpose, Master thesis, RTU, Riga, Latvia, p. 214.
- [ZEL 2008a] Zeltmate I., Grundspenkis J., Kirikova M., 2008, The Challenges in Knowledge Representation for Analysis of Inter - Institutional Knowledge Flows. In Proceedings of the IADIS International Conference on Cognition and Exploratory Learning in Digital Age (CELDA 2008), Freiburg, Germany, pp. 145-152.
- [ZEL 2008b] Zeltmate I., Grundspenkis J., 2008, Formal Method of Functional Model Building Based on Graph Transformations. In Proceedings of the 5th International Mediterranean and Latin

- American Modeling Multiconference, The international Workshop on Modelling & Applied Simulation, Italy, pp. 140-147.
- [ZEL 2010a] Zeltmate I., Grundspenkis J., 2010, An Extension of Frame-Based Knowledge Representation Schema, In proceedings of the International Multi-Conference on Complexity, Informatics and Cybernetics. Vol.1, USA, Orlando, pp. 401-406.
- [ZEL 2010b] Zeltmate I., Kirikova M., Grundspenkis J., 2010, Prototype for the Knowledge Representation Supporting Inter-Institutional Knowledge Flow Analysis. Learning And Instruction In The Digital Age, Part II - Knowledge Representation and Mental Models, Chapter 6 (Spector J.M., Ifenthaler D., Isaías P., Kinshuk., Sampson D.G. Ed.), New York, Springer, pp. 87-99.
- [ZEL 2011] Zeltmate I., 2011, Logical Operator Usage in Structural Modelling, In Proceedings of the 10th International Conference on Modeling and Applied Simulation, Italy, p. 338 -346.
- [НИК 1985] Николаев В.И., Брук В.М., 1985, Системотехника: методы и приложения, „Машиностроение”, с.199.
- [ЮР 2007] Юревич Е. И., 2007, Основы робототехники 2-е издание (ISBN 978-5-94157-473-5), БХВ-Петербург, 408 стр.