

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Jūlija PETUHOVA

**IMITĀCIJAS MODELĒŠANĀ BĀZĒTA
PIEGĀDES ĶĒŽU DINAMIKAS ANALĪZE**

Promocijas darba kopsavilkums

Rīga 2008

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Datorzinātnes un informācijas tehnoloģijas fakultāte
Informācijas tehnoloģijas institūts

Jūlija PETUHOVA
Doktora studiju programmas „Vadības informācijas tehnoloģija” doktorante

**IMITĀCIJAS MODELĒŠANĀ BĀZĒTA
PIEGĀDES ĶĒŽU DINAMIKAS ANALĪZE**

Promocijas darba kopsavilkums

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

Rīga 2008

Petuhova, J. Imitācijas modelēšanā bāzēta piegādes ķēžu dinamikas analīze. Promocijas darba kopsavilkums.-R.: RTU, 2008.-38 lpp.

Iespiests saskaņā ar Informācijas tehnoloģijas institūta 2008. gada 28. maija Padomes sēdes lēmumu, protokola Nr.08-03.

ISBN 978-9984-32-783-9

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

PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI
RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2008. gada 1. decembrī plkst. 14³⁰ Rīgas Tehniskās universitātes Datorzinātnes un informācijas tehnoloģijas fakultātē, Meža ielā 1, 3. korpusā, 202. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

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

Profesors, Dr.habil.sc.ing. Jurijs Tolujevs
Transporta un sakaru institūts, Latvija

Profesors, Dr.habil.sc. Andrzej Dzielinski
Varšavas Tehniskā universitāte, Polija

APSTIPRINĀJUMS

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

Jūlija Petuhova _____  (paraksts)

Datums: 2008. gada 25. augustā

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 4 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 8 pielikumus, 35 attēlus, kopā 201 lappuses. Literatūras sarakstā ir 108 nosaukumi.

VISPĀRĒJS DARBA RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Latvijas ārējās un iekšējās tirdzniecības nozares pašreizējais attīstības līmenis un tās potenciālās izaugsmes iespējas, kas saistītas ar Latvijas integrācijas procesu vienotajā Eiropas ekonomiskajā zonā, veicināja jauno informācijas tehnoloģiju attīstības nepieciešamību loģistikas jomā par ko liecina Latvijas tautsaimniecības kompleksais attīstības plāns.

Imitācijas modelēšana ir kļuvusi par nozīmīgu informācijas tehnoloģijas instrumentu uzņēmuma kopējās piegādes ķēdes darbības analīzē un uzlabošanā. Viens no vissvarīgākajiem piegādes ķēdes darbības stabilitātes rādītājiem ir bulvīpa efekta lielums. Eksistē daudz metodes bulvīpa efekta modelēšanai, tomēr trūkst metodes tā skaitliskai novērtēšanai piegādes ķēdē. Promocijas darbā izstrādātās, statistikā un varbūtību teorijā bāzētās analītiskās metodes ļauj novērtēt bulvīpa efektu piegādes ķēdē, kas darbojas tirgus pieprasījuma nenoteiktības apstākļos.

Ņemot vērā, ka krājumu kontrole ir viena no kritiskākajām problēmām piegādes ķēdes vadīšanā, un bieži piegādes ķēdi apraksta kā savstarpēji saistītas krājumu vadības sistēmas ķēdi, darbā ir izstrādāta imitācijas modelēšanas metodika, kas atbalsta tieši krājumu vadības sistēmas analīzi, ievērojot visas šai jomai raksturīgās īpašības.

Darba mērķis

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt imitācijas modelēšanas metodiku vienprodukta krājumu vadības sistēmas darbības analīzei. Minētā mērķa sasniegšanai tika izvirzīti šādi darba uzdevumi:

1. Izanalizēt diskrēto notikumu imitācijas modelēšanas praktiskos pielietojumus stohastiskā vidē darbojošām loģistikas sistēmām to darbības efektivitātes paaugstināšanai.
2. Salīdzināt centralizētas un decentralizētas informācijas apmaiņas stratēģijas piegādes ķēdē stacionāra pieprasījuma un piegādes laika nenoteiktības apstākļos, ņemot vērā piegādes ķēdes darbības stabilitātes rādītāja bulvīpa efekta lielumu.
3. Izanalizēt nepārtraukti un periodiski pārbaudāmās krājumu vadīšanas stratēģijas ietekmi uz piegādes ķēdes darbības stabilitātes rādītāja bulvīpa efekta lielumu.
4. Izstrādāt piegādes ķēdes darbības stabilitātes rādītāja (bulvīpa efekta lieluma) analītiskās novērtēšanas metodi stacionāram patērētāju pieprasījumam stohastiskā vidē.

5. Noformulēt vienprodukta krājumu vadības sistēmas imitācijas modelēšanas metodikas pamatposmus diskrētu notikumu stohastiskām sistēmām.
6. Aprobēt izstrādāto metodiku, izveidojot vienprodukta krājumu vadības sistēmas imitācijas modeli, kur patērētāju pieprasījums ir atkarīgs no sasniegtā apkalpošanas servisa līmeņa, un salīdzināt to ar tradicionālo krājumu vadības sistēmu, kur patērētāju pieprasījums ir stohastisks un stacionārs.

Pētījuma priekšmets un objekts

Promocijas darba pētījuma priekšmets ir diskrētu notikumu sistēmu imitācijas modelēšanas metodes pielietošanas iespējas, analizējot, plānojot un novērtējot loģistikas sistēmu darbību.

Promocijas darba pētījuma objekts ir piegādes ķēde un tās krājumu vadības sistēmas, kas darbojas stohastiskā vidē, kur galvenais nenoteiktības faktors ir patērētāju stohastisks stacionārais pieprasījums.

Pētījumu metodes

Promocijas darba izstrādē tiek izmantota diskrētu notikumu sistēmu imitācijas modelēšanas, matemātiskās statistikas un varbūtību teorijas metodes. Izmantotās metodes atbalsta piegādes ķēdes un krājumu vadības sistēmas imitācijas modelēšanas projekta realizāciju, kā arī ļauj gan eksperimentāli, gan analītiski novērtēt piegādes ķēdes darbības stabilitātes rādītāju – bulvīpa efekta lielumu. Dažos avotos sastopamais bulvīpa efekta tulkojums ir „vēršu pātagas” efekts, bet oficiāli šī jauna termina tulkojums nav pieņemts, tāpēc šajā promocijas darbā nolemts rakstīt to, atbilstoši oriģinālajam nosaukumam.

Zinātniskā novitāte

Izstrādātajā promocijas darbā ir divi galvenie jaunieguvumi:

1. Izstrādāta vienprodukta krājumu vadīšanas imitācijas modelēšanas metodika, kas ir paredzēta imitācijas modelēšanas projektu realizācijai diskrētu notikumu sistēmām, un darbojas stohastiskā vidē. Izstrādātā metodika atšķiras no vispārējās imitācijas modelēšanas metodikas ar to, ka integrē imitācijas modelēšanas tehnoloģiju un krājumu vadības sistēmas izstrādes raksturīpašības, kas ievērojami vienkāršo konkrētās sistēmas imitācijas modeļa izstrādi un izmantošanu.
2. Izstrādātās statistikā un varbūtību teorijā bāzētās metodes ļauj analītiski novērtēt bulvīpa efekta lielumu piegādes ķēdē, pamatojoties uz patērētāju pieprasījuma sadalījuma parametriem, ko iepriekš bija

iespējams realizēt tikai pielietojot diskrētu notikumu un nepārtrauktu sistēmu imitācijas modelēšanas metodes.

Pārējie jaunieguvumi ir saistīti ar darba gaitā sastaptajām un atrisinātajām problēmām, tās ir:

1. Realizējot imitācijas modelēšanā bāzētu piegādes ķēdes darbības stabilitātes analīzi, tika konstatēts, ka periodiskās pārbaudes krājumu vadīšanas sistēmas mazāk ietekmē pieprasījuma svārstību palielināšanos, nekā nepārtraukti pārbaudāmās sistēmas.
2. Aprobējot izstrādāto metodiku, tika pierādīts, ka krājumu vadības sistēma ar servisatkarīgu pieprasījumu ir efektīvāka nekā tradicionālā, drošības krājumu līmeņa samazināšanās iespēju dēļ, nepazeminot sasniegto servisa līmeni.
3. Veiktā imitācijas modeļa jutīguma analīze atklāja faktorus, kas ievērojami ietekmē sasniegtā un mērķa apkalpošanas servisa līmeņu atšķirību krājumu vadības sistēmā ar servisatkarīgo pieprasījumu.

Darba praktiskais pielietojums un aprobācija

Promocijas darba ietvaros tika izstrādāta metodika vienprodukta krājumu vadības sistēmas imitācijas modelēšanai. Piedāvātā metodika atbalsta krājumu vadīšanas uzdevumu risināšanu ar imitācijas modelēšanas palīdzību un atvieglo imitācijas modelēšanas projekta realizēšanas procesu. Pielietojot izstrādātās, statistikā un varbūtību teorijā bāzētās bulvīpa efekta analītiskās novērtēšanas metodes, var secināt par piegādes ķēdes darbības stabilitāti, kā arī pārbaudīt izstrādātā piegādes ķēdes imitācijas modeļa adekvātumu. Darba gaitā tika izstrādāti vairāki imitācijas modeļi un veikti eksperimenti ar tiem, kas demonstrē izstrādātās metodikas un metožu praktisko pielietojumu piegādes ķēžu vadīšanas jomā.

Par darba rezultātiem tika ziņots šādās zinātniskajās konferencēs:

1. Starptautiskā konference *Simulation and Modelling: enablers for a better quality of life. The 14th European Simulation Multiconference (ESM'2000)*. Gentā, Beļģijā, 2000.g. 23.–26.maijā. Referāts "Implementing a cost model in a textile supply chain using simulation".
2. RTU 42. starptautiskā zinātniskā konference, sekcija *Informācijas tehnoloģijas un vadības zinātne*. Rīgā, 2001.g. 12.–13.oktobrī. Referāts "Simulation of logistics systems: A survey".
3. Starptautiskā konference *Traditions and Innovations in Sustainable Development of Society*. Rēzeknē, Rēzeknes Augstskolā, 2002.g. 28.februārī–2.martā. Referāti "An overview of supply chain managing through the simulation" un "Simulation and analysis of supply chains using LORD".

4. Starptautiskā konference *The 4th International Workshop on Computer Science and Information Technologies (CSIT'2002)*. Patrasā, Grieķijā, 2002.g. 18.–20.septembrī. Referāts “Methods of supply chain processes instability reduction through simulation”.
5. Starptautiskā konference *Simulation in Industry. The 14th European Simulation Symposium (ESS'2002)*. Drēzdenē, Vācijā, 2002.g. 23.–26.oktobrī. Referāts “Simulation-based analysis of the Bullwhip effect under different information sharing strategies”.
6. Starptautiskā konference *Production System Design, Supply Chain Management and Logistics. The 9th International Multi-Conference “Advanced Computer Systems” (ACS'2002)*. Miedzyzdrojā, Polijā, 2002. g. 23.–25.oktobrī. Referāts “An approach to forecasting of a service-sensitive demand through simulation”.
7. Starptautiskā konference *The 2003 European Simulation Symposium, (ESS2003)*. Delftā, Nīderlandē, 2003.g. 26.–29.oktobrī. Referāts “Analysis of dynamic properties of an inventory system with service-sensitive demand using simulation”.
8. RTU 44. starptautiskā zinātniskā konference, sekcija *Informācijas tehnoloģijas un vadības zinātne*. Rīgā, 2003.g. 10.–13. oktobrī. Referāts “Development of a simulation tool for selection of inventory control policy”.
9. Starptautiskā konference *New Opportunities for Operations Research. 5th EURO/INFORMS*. Stambulā, Turcijā, 2003.g. 6.–10.jūlijā. Referāts “Simulation-based analysis of the Bullwhip effect in supply chains”.
10. Starptautiskā konference *Networked Simulations and Simulated Networks. The 18th European Simulation Multiconference (ESM'2004)*. Magdeburgā, Vācijā, 2004.g. 13.–16.jūnijā. Referāts “Simulation-based statistical analysis of the bullwhip effect in supply chains”.
11. Starptautiskā konference *Simulation in wider Europe. The 19th European Conference on Modelling and Simulation (ECSM'2005)*. Rīgā, Latvijā, 2005.g. 1.–4.jūnijā. Referāts “Combining analytical and simulation approaches to quantification of the bullwhip effect”.
12. Starptautiskā konference *International Mediterranean Modelling Multiconference (I3M'2006)*. Barselonā, Spānijā, 2006.g. 4.–6.oktobrī. Referāts „Simulation-based analysis of sales volume and service level dependency”.

Publikācijas

Pētījuma rezultāti ir publicēti 15 zinātniskajos rakstos. Publikāciju sarakstu var apskatīt kopējā promocijas darbā izmantojamās literatūras sarakstā, kas atrodas kopsavilkuma beigās.

Darba struktūra un apjoms

Promocijas darbs sastāv no ievada, 4 nodaļām, secinājumiem, literatūras saraksta un 8 pielikumiem. Promocijas darba pamatteksts ir izklāstīts uz 152 lappusēm un paskaidrots ar 35 attēliem un 27 tabulām. Literatūras sarakstā ir iekļauti 108 nosaukumi.

Promocijas darba struktūra ir šāda:

Ievads – Promocijas darba vispārējs raksturojums. Tēmas aktualitātes pamatojums, darba mērķa un uzdevumu formulēšana, pētījuma priekšmeta un objekta apraksts, izmantoto pētījuma metožu un zinātniskās novitātes apraksts.

1. nodaļa: Imitācijas modelēšanas praktisko pielietojumu apskats, risinot loģistikas uzdevumus – Imitācijas modelēšanas pielietošanas iespēju loģistikas jomā vispārējs apraksts un ar imitācijas modelēšanas palīdzību uzņēmējdarbībā risināmo problēmu apskats.

2. nodaļa: Imitācijas modelēšanā bāzēta piegādes ķēdes darbības stabilitātes analīze – Piegādes ķēdes darbības stabilitātes rādītāja bulvīpa efekta lieluma izstrādāto novērtēšanas metožu apraksts.

3. nodaļa: Vienprodukta krājumu vadības sistēmas imitācijas modelēšanas metodikas izstrāde – Krājumu vadības sistēmas imitācijas modelēšanas projekta realizācijas pamatposmu apraksts.

4. nodaļa: Izstrādātās metodikas aprobācija, modelējot krājumu vadības sistēmu ar servīsatkarīgu tīrgus pieprasījumu – Krājumu vadības sistēmu ar servīsatkarīgu tīrgus pieprasījumu imitācijas modelēšanas projekta realizācijas pamatposmu, kas atbilst izstrādātajai metodikai, apraksts.

Promocijas darba rezultāti

Pielikumi

Līteratūras saraksts

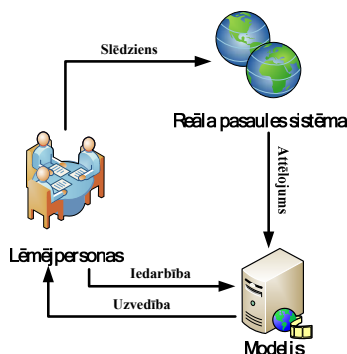
DARBA ATSEVIŠĀO NODAĻU ĪSS IZKLĀSTS

Pīrmā nodaļa

Pīrmajā nodaļā ir dota imitācijas modelēšanas tehnoloģijas un loģistikas uzdevumu vispārīga nostādne un piedāvāta imitācijas modelēšanas programmlīdzekļu klasifikācija, detalizētāk aprakstot tos, kas ir orientēti uz loģistikas uzdevumu risināšanu un piegādes ķēžu analīzi.

Imitācijas modelēšana ir atzīta par vienu no efektīvākajām loģistikas sistēmu analīzes un plānošanas tehnoloģijām. Lai atrastu uzņēmējdarbībā sastopamu, sarežģītu situāciju kopējo analītisko risinājumu, matemātiskās analīzes jauda ne vienmēr ir pietiekama. Šādas situācijas alternatīvs risinājums ir eksperimentāls pētījums. Šim mērķim tika izstrādāts

analizējamās sistēmas imitācijas modelis un veikti eksperimenti ar to (sk. 1. att.).



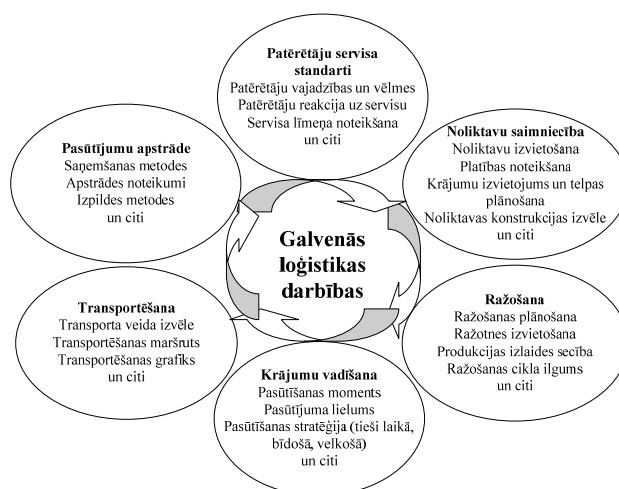
1. att. Imitācijas modelēšanas būtība

Imitācijas modelēšana ir viena no visizplatītākajām operāciju pētīšanas un vadības teorijas metodēm [50]. Līdz 1980. gadam imitācijas modelēšana bija diezgan dārga un laikietilpīga, ņemot vērā abus – gan analītiska darba, gan arī programmas izstrādes laikus [1]. Lēto personālo datoru parādīšanās ar jaudīgiem procesoriem un grafiskajiem līdzekļiem deva jaunas iespējas, kas padarīja imitācijas modelēšanu par īpaši pievilcīgu un rentablu tehnoloģiju dažādu sistēmu darbības efektivitātes analīzei. Pašlaik pieejamos imitācijas modelēšanas programmlīdzekļus var iedalīt sekojošās klasēs:

1. Universālas augsta līmeņa programmēšanas valodas (*general-purpose High-Level Languages, HLLs*): Ada, Pascal, Visual Basic, C, C++, u.c.
2. Imitācijas modelēšanas valodas:
 - nepārtrauktu sistēmu imitācijas modelēšanas valodas (*Continuous-System Simulation Languages, CSSLs*): MatLab/Simulink, ACSL Sim (Advanced Continuous Simulation Language), u.c.
 - diskrētu sistēmu imitācijas modelēšanas valodas (*Discrete Simulation Languages, DSLs*): Simula, SIMSCRIPT, GPSS, SLX, u.c.
3. Universālas imitācijas modelēšanas sistēmas (*General Simulation Systems, GSSs*):
 - nepārtrauktu sistēmu imitācijas modelēšanas sistēmas: STELLA, Powersim, Vensim, u.c.
 - diskrētu sistēmu imitācijas modelēšanas sistēmas: Arena, WITNESS, ProModel, eM-Plant, AutoMod, Extend, ALPHA/Sim, AnyLogic, Simprocess, CSIM 19, Enterprise Dynamics, SIMUL8, u.c.

4. Loģistikas ķēžu imitācijas modelēšanas sistēmas (*Logistics Chain Simulation Systems, LCSSs*): SimFlex, Caps Logistics, LogicNet, LogicChain, SCA, Supply Chain Builder, Enterprise TR Builder, Compaq's CSCAT, Sourcing Simulator, Digital Workcell, Factory Explorer, u.c.

Imitācijas modelēšanas pielietojanas efektivitāte ražošanas sektorā veicināja vairāku specializētu programmlīdzekļu izstrādes procesu, kas, savukārt, paplašināja imitācijas modelēšanas tehnoloģijas pielietojanas sfēru. Pēdējā laikā ir novērojams, ka imitācijas modelēšanas pielietojana loģistikas sfērā kļūst ļoti populāra. Tika izanalizētas galvenās loģistikas darbības (sk. 2. att.) un katrai loģistikas darbībai ir izdalīti uzdevumi, kurus ir efektīvi risināt ar imitācijas modelēšanas palīdzību. Apskata ietvaros tika sniegti imitācijas modelēšanas praktisko pielietojumu piemēri, kas demonstrē reālas loģistikas sistēmas darbības uzlabošanas iespējas, pielietojot imitācijas modelēšanu.



2. att. Galvenās loģistikas darbības

Veicot imitācijas modelēšanas tehnoloģijas praktisko pielietojumu apskatu loģistikas sfērā, tika pamatota imitācijas modelēšanas izmantošanas efektivitāte, analizējot un plānojot sarežģītas loģistikas sistēmas, kas darbojas stohastiskā vidē. Tika pētītas mūsdienu loģistikas sistēmas plānošanas un vadīšanas problēmas ar mērķi noskaidrot sistēmas kopējās darbības efektivitātes sasniegšanas iespējas. Analīze noteica piegādes ķēdes koncepcijas svarīgumu loģistikas sistēmas kopējās darbības uzlabošanā uz

patērētāju orientētu tirgu dēļ. Tika izanalizētas un klasificētas dažādas matemātiskās modelēšanas metodes, kuras var pielietot piegādes ķēdes analīzei:

1. Analītiskā modelēšana – algebriskās metodes (*algebraic methods*), automātu teorija, Petri tīkli (*Petri-Nets*), rindu teorija (*queueing theory*), Markova ķēdes, u.c.
2. Algoritmiskā modelēšana:
 - nepārtrauktu sistēmu imitācijas modelēšana – diferenciālvienādojumi, diferenču vienādojumi, u.c.
 - diskretu notikumu sistēmu imitācijas modelēšana – uz notikumiem vai procesiem orientētā modelēšana, u.c.

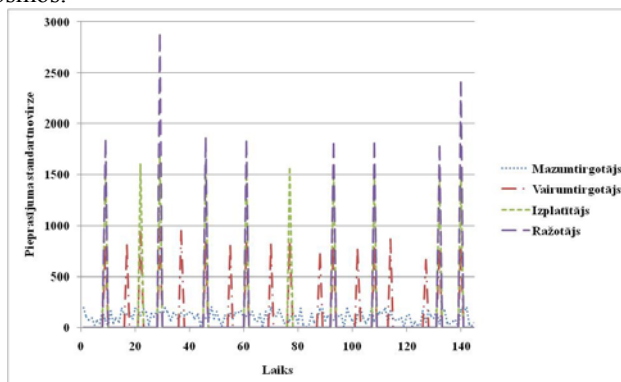
Izanalizējot piedāvāto metožu priekšrocības un trūkumus, diskretu notikumu sistēmu imitācijas modelēšana tika atzīta par vispiemērotāko, modelējot dinamiskas sistēmas ar lielu detalizācijas līmeni un stohastiskiem faktoriem.

Apskata rezultātā krājumu vadīšana tika atzīta par kritisko loģistikas darbību piegādes ķēdē, un tas pamatoja nepieciešamību izstrādāt krājumu vadības sistēmas imitācijas modelēšanas metodiku.

Otrā nodaļa

Otrajā nodaļā ir aprakstīts stohastisko faktoru svarīgums piegādes ķēdes plānošanā un vadīšanā. Tā kā lielāku stohastisko faktoru skaitu adekvāti var kontrolēt tikai taktiskajā plānošanas līmenī, un piegādes ķēdes procesu plānošanas cikls ir saskaņots ar materiālu plūsmu, kuru raksturo pieprasījuma lielums, pieprasījuma nenoteiktība ir atzīta par kritisku faktoru lēmumu pieņemšanā. Pasūtījumu piegādes laiks arī lielā mērā ietekmē piegādes ķēdes darbības stabilitāti un tās nenoteiktībai ir vislielākā negatīvā ietekme tieši taktiskajā plānošanas līmenī. Līdz ar to promocijas darbā tika analizēti piegādes ķēdes plānošanas un vadīšanas uzdevumi taktiskajā līmenī patērētāju pieprasījuma un pasūtījuma piegādes laika nenoteiktības apstākļos. No patērētāju pieprasījuma un tā mainīguma ir atkarīga jebkuras piegādes ķēdes darbība, tomēr liela loma ir arī piegādes ķēdes posmu iekšējiem pieprasījumiem, kuri ievērojami maina informāciju par vajadzīgo produkcijas daudzumu. Svarīgs novērojums piegādes ķēžu vadībā ir tas, ka pieprasījumu svārstība pieaug, tam virzoties pa piegādes ķēdi virzienā no patērētāja līdz piegādātājam. Šī parādība ir nosaukta par bulvīpa (*bullwhip*) – “vēršu pātagas” – efektu, jo piegādes ķēdes patērētāju nelielas pieprasījuma svārstības izraisa ļoti lielas pieprasījuma svārstības tās gala posmos (sk. 3. att).

Pieprasījuma mainīguma rādītājs ir pieprasījuma standartnovirze σ . Tās lieluma palielināšanās piegādes ķēdes posmos tieši norāda uz bulvīpa efektu. Bulvīpa efekta lielumu var uzskatīt par piegādes ķēdes darbības stabilitātes rādītāju. Galvenokārt šī efekta pastāvēšana ietekmē krājumus, veidojot liekos krājumus un/vai izvietojot krājumus neatbilstošos piegādes ķēdes posmos.

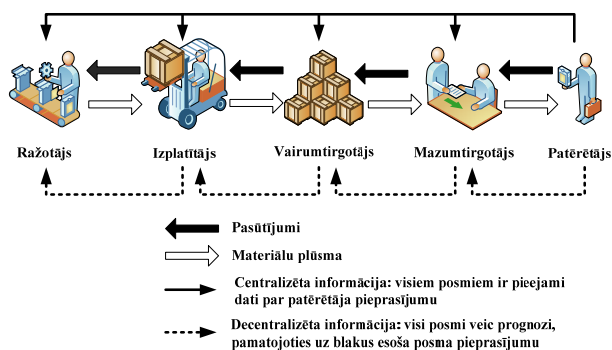


3. att. Bulvīpa efekts piegādes ķēdē

Viena no bulvīpa efekta samazināšanas metodēm ir moderno informācijas tehnoloģiju pielietošana piegādes ķēdes vadīšanā. Darbā ir izanalizēta decentralizētas un centralizētas informācijas apmaiņas stratēģijas ietekme uz bulvīpa efekta lielumu, kad vai nu katrs piegādes posms prognozē pieprasījumu, pamatojoties uz pasūtījumiem, kas saņemti no iepriekšējā posma, vai visi piegādes ķēdes posmi saņem informāciju par gala patērētāja reālo pieprasījumu (sk. 4. att.).

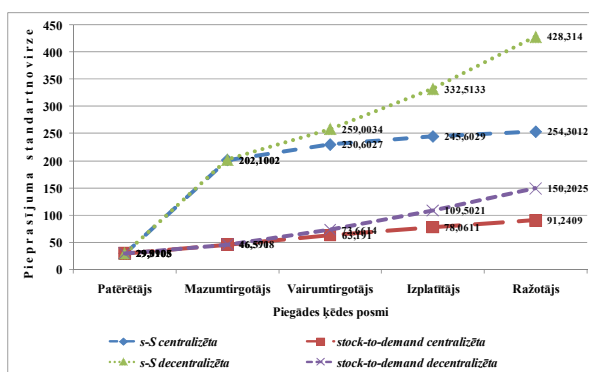
Analizējamā piegādes ķēde sastāv no četriem posmiem: ražotājs, izplatītājs, vairumtirgotājs un mazumtirgotājs, kas patērētājam piegādā viena veida produkciju saskaņā ar nenoteiktu pieprasījumu. Ir izstrādāti četri imitācijas modeļi, kas modelē piegādes ķēdes ar divām informācijas apmaiņas stratēģijām un divām krājumu vadīšanas stratēģijām:

- ✓ Decentralizētas informācijas apmaiņas stratēģija:
 - *s-S* krājumu vadīšanas stratēģija;
 - *Stock-to-demand* krājumu vadīšanas stratēģija.
- ✓ Centralizētas informācijas apmaiņas stratēģija:
 - *s-S* krājumu vadīšanas stratēģija;
 - *Stock-to-demand* krājumu vadīšanas stratēģija.



4. att. Piegādes ķēdes centralizētas un decentralizētas informācijas apmaiņas stratēģijas

Iegūtie modelēšanas rezultāti parāda bulvīpa efekta pastāvēšanu visās četrās piegādes ķēdēs (sk. 5. att.).



5. att. Bulvīpa efekta lielums četrās piegādes ķēdēs

Imitācijas modelēšanas pētījuma rezultātā tiek konstatēts fakts, ka pieprasījuma izkropļojums, virzoties pa piegādes ķēdi ražotāja virzienā, ir mazāk izteikts, pielietojot centralizēto informācijas apmaiņas stratēģiju, jo piegādes ķēdē ar decentralizēto informācijas apmaiņas stratēģiju katram nākamajam posmam ir nepieciešams ilgāks laiks, lai reaģētu un pielāgotos patērētāju pieprasījuma izmaiņām. Centralizētās informācijas apmaiņas stratēģijas pielietošana ļauj ievērojami izlīdzināt pieprasījumu starp posmiem piegādes ķēdēs gan ar nepārtraukti pārbaudāmu krājumu vadības sistēmu, gan ar periodiski pārbaudāmu. Īpaši liela atšķirība tika novērota pēdējos – izplatītāja un ražotāja posmos, jo, posmiem atrodoties tālāk no

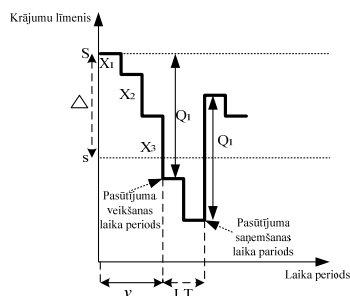
patērētāja, grūtāk veikt precīzu patērētāju pieprasījuma prognozi, un līdz ar to ticamas informācijas (šajā gadījumā gala patērētāju pieprasījuma lielums) esamība aprakstītajā situācijā spēlē svarīgu lomu. Piemēram, piegādes ķēdē, kur tiek pielietota *s-S* krājumu vadīšanas stratēģija, centralizētā patērētāju pieprasījuma informācijas sadale ļauj samazināt bulvīpa efektu pēdējos posmos aptuveni 1.5 reizes. Tāds pats bulvīpa efekta samazināšanās raksturs ir novērots piegādes ķēdē ar *stock-to-demand* krājumu vadīšanas stratēģiju. Tomēr bulvīpa efekts saglabājas visās četrās piegādes ķēdēs un pat moderno informācijas tehnoloģiju pielietošana ļauj samazināt, bet ne novērst bulvīpa efektu.

Analizējot piegādes ķēdes darbības efektivitāti, tika ņemti vērā arī citi raksturotāji, piemēram, katrā posmā nodrošinātais servisa līmenis, vidējais krājumu līmenis, u.c. Veiksmīga piegādes ķēdes vadīšanas stratēģija no stabilas darbības viedokļa varētu izvērsties par neefektīvu no klientu apkalpošanas kvalitātes vai krājumu uzturēšanas un glabāšanas izmaksu viedokļa. Realizējot visu četru alternatīvu piegādes ķēdes darbību vispusīgu analīzi, var secināt, ka piegādes ķēde ar centralizētu informācijas apmaiņas stratēģiju un periodiski pārbaudāmu krājumu vadības sistēmu ir visveiksmīgākā gan no sistēmas stabilas darbības nodrošināšanas, gan no sasniegtā klientu apkalpošanas servisa līmeņa, gan arī no sistēmas kopējo izmaksu viedokļa.

Turklāt ir izstrādātas statistikā un varbūtību teorijā bāzētas metodes bulvīpa efekta analītiskajai novērtēšanai, pamatojoties uz patērētāju pieprasījuma sadalījuma skaitliskajiem raksturlielumiem. Veiktais bulvīpa efekta novērtēšanas metožu apskats ļauj secināt, ka izstrādātie analītiskie modeļi dod iespēju analizēt dažādu faktoru ietekmi uz bulvīpa efekta lielumu, bet ne novērtēt pašu lielumu, un pētījumi šajā virzienā vēl joprojām attīstās un ir atzīti par perspektīviem piegādes ķēžu vadīšanas jomā.

Piegādes ķēde ir analizēta no krājumu vadīšanas viedokļa, kad piegādes ķēde ir parādīta kā savstarpēji secīgi saistītu krājumu vadības sistēmu tīkls. Apskatāmā piegādes ķēde sastāv no gala patērētāja, mazumtirgotāja un piegādātāja. Mazumtirgotājs piegādā patērētājam viena veida produkciju atbilstoši saņemtajam pieprasījumam un papildina savus krājumus, veicot pasūtījumus piegādātājam. Patērētāju pieprasījums ir stohastisks un stacionārs. Krājumi tiek kontrolēti, pielietojot *s-S* krājumu vadīšanas stratēģiju, kura grafiski ilustrēta 6. attēlā.

Bulvīpa efekta lielumu raksturo veiktā pasūtījuma lieluma svārstību palielināšanās attiecībā uz saņemta pieprasījuma svārstībām, līdz ar to bulvīpa efekta lielumu var izteikt analītiski, ņemot vērā patērētāju pieprasījuma sadalījuma skaitliskos raksturotājus – matemātisko cerību $E(X)$ un dispersiju $D(X)$.



6. att. Krājumu vadīšanas stratēģija mazumtirgotāja posmā

Pielietojot iepriekš aprakstīto krājumu vadīšanas stratēģiju pie nosacījuma, ka pieprasījums X ir gadījumlīkums, veiktais pasūtījums Q ir gadījumlīkums, kas ir atkarīgs no pieprasījuma lieluma. Funkcijas $Q = \varphi(X)$ matemātiskā cerība $E(Q)$ un dispersija $D(Q)$ ir novērtētas, pielietojot Fillera (Feller, 1967) piedāvātās analītiskās izteiksmes [34]:

$$E(Q) = E(X) * E(v), \quad (1)$$

un

$$D(Q) = E(v) * D(X) + D(v) * [E(X)]^2, \quad (2)$$

kur $E(v)$ – laika periodu starp pasūtījumiem skaita matemātiskā cerība, laika periods;

$D(v)$ – laika periodu starp pasūtījumiem skaita dispersija, laika periods.

Periodu skaits starp pasūtījumiem v raksturo pasūtījumu veikšanas biežumu, un to varbūtisko uzvedību var raksturot ar skaitliskiem raksturlielumiem: matemātisko cerību un dispersiju. Vairākkārtēja sekojoša algoritma realizācija ļauj iegūt statistiskus datus par v vērtību ($v_i, i = \overline{1, n}$) un novērtēt v_i vērtības varbūtību p_i , pamatojoties uz v vērtības relatīvo parādīšanās biežumu \hat{p}_i , kas savukārt ļauj eksperimentāli novērtēt v matemātisko cerību un dispersiju:

```

if  $X_1 > \Delta$  THEN  $v=1$  AND STOP
ELSE generate  $X_2$ 
if  $X_1 < \Delta$  and  $X_1 + X_2 > \Delta$  THEN  $v=2$  AND STOP
ELSE generate  $X_3$ 
...
if  $X_1 + X_2 + \dots + X_{n-1} < \Delta$  and  $X_1 + X_2 + \dots + X_n > \Delta$  THEN  $v=n$ 
STOP

```


Tika realizēti vairāki eksperimenti bulvīpa efekta lieluma analītiskai novērtēšanai, pielietojot piedāvāto statistiskā bāzēto metodi. Tika izstrādāts pētāmās krājumu vadības sistēmas imitācijas modelis, iegūto rezultātu validācijai. Statistikā bāzēta un imitācijas modelēšanas metožu pielietošanas rezultātu salīdzinājums ir parādīts 1. tabulā.

1. tabula
Bulvīpa efekta lieluma analītiskās statistiskā bāzētas novērtēšanas metodes validācijas rezultāti

$STD(Q)_{an}$	$STD(Q)_{sim}$	χ^2_{fakt}	$[\chi^2_{1-0.95,389}; \chi^2_{0.95,389}]$	rezultāts
29.89	17.93	233.28	[344.29; 435.99]	nesakrīt
32.01	17.71	215.23	[344.29; 435.99]	nesakrīt
35.13	17.89	198.08	[344.29; 435.99]	nesakrīt
39.79	18.63	182.15	[344.29; 435.99]	nesakrīt
47.36	20.74	170.35	[344.29; 435.99]	nesakrīt

Validācijas procesā tika atklāts, ka analītiskā modeļa rezultāti nesakrīt ar iegūtajiem, pielietojot imitācijas modelēšanu ar ticamības varbūtību 95%. Analītiski novērtētā pasūtījumu standartnovirze ir krietni lielāka, nekā imitētā (sk. 1. tab.).

Bulvīpa efekta neadekvātās analītiskās novērtēšanas iemesls ir eksistējoša atkarība starp pasūtījuma veikšanas periodu v un patērētāju pieprasījuma lielumu X_i . Piedāvātās analītiskās izteiksmes bulvīpa efekta novērtēšanai (1) un (2) paredz v un X neatkarību, bet analizējamā krājumu vadības sistēmā tie ir atkarīgi, jo v gadījumlielumam ir nosacīta parādīšanās varbūtība $p_v = P(X_1 + X_2 + \dots + X_v > \Delta / X_1 + X_2 + \dots + X_{v-1} < \Delta)$.

Piegādes ķēdēs, kur pasūtījuma veikšanas laika moments nav atkarīgs no saņemtā patērētāju pieprasījuma lieluma, piedāvāto statistiskā bāzēto metodi var izmantot bulvīpa efekta lieluma novērtēšanai, pamatojoties uz patērētāju pieprasījuma sadalījuma skaitliskajiem raksturlielumiem. Piemēram, ja pasūtījuma veikšanas laika periods v ir neatkarīgs gadījumlielums ar iepriekš zināmu, empīrisku vai teorētisko sadalījumu, tad veiktais eksperimentālais pētījums ar ticamības varbūtību 95% apstiprināja, ka analītiski iegūtie rezultāti sakrīt ar imitācijas modelēšanas rezultātiem.

Korelācijas starp pieprasījuma lielumu X_i un pasūtījuma veikšanas laika periodu v ievērošanai jānosaka veiktā pasūtījuma lieluma Q blīvuma funkcija, kas tiek iegūta, integrējot saņemto pieprasījumu summas

$(S_Q = X_1 + X_2 + \dots + X_v)$ pilnās varbūtības formulu. Gadījumlieluma S_Q sadalījuma funkcija pēc pilnās varbūtības formulas ir šāda:

$$F_Q(x) = P(S_Q < x) = P(X_1 + X_2 + \dots + X_v < x) = P(S_Q < x/v = 1) * P(v = 1) + P(S_Q < x/v = 2) * P(v = 2) + P(S_Q < x/v = 3) * P(v = 3) + \dots = P(X_1 < x) * P(v = 1) + P(X_1 + X_2 < x) * P(v = 2) + P(X_1 + X_2 + X_3 < x) * P(v = 3) + \dots \quad (3)$$

kur $P(v=i)$, $i=1 \div \infty$ – varbūtība tam, ka pasūtījums tiks veikts i -tajā laika periodā;

$P(S_Q < x/v = i)$ – varbūtība tam, ka pasūtījuma lielums būs mazāks par x laika periodā v ;

* – reizināšanas zīme.

Anālītiski aprēķinot pasūtījuma veikšanas laika perioda varbūtību $P(v=1, 2, 3, \dots)$ un pieprasījumu summas Δ lieluma sasniegšanas varbūtību $P(X_1 + X_2 + X_3 + \dots < x)$, ir iespējams definēt sekojošu pasūtījuma lieluma sadalījuma funkciju $F_Q(x)$:

$$F_Q(x) = \int_0^x f(x_1) dx_1 * \left(1 - \int_0^{\Delta} f(x) dx \right) + \int_0^x f(x_1) \int_0^{x-x_1} f(x_2) dx_2 dx_1 * \int_0^{\Delta} f(x_1) \int_{\Delta-x_1}^{\infty} f(x_2) dx_2 dx_1 + \int_0^x f(x_1) \int_0^{x-x_1} f(x_2) \int_0^{x-x_1-x_2} f(x_3) dx_3 dx_2 dx_1 * \int_0^{\Delta} f(x_1) \int_0^{\Delta-x_1} f(x_2) \int_{\Delta-x_1-x_2}^{\infty} f(x_3) dx_3 dx_2 dx_1 + \int_0^x f(x_1) \int_0^{x-x_1} f(x_2) \dots \int_0^{x-x_1-\dots-x_{i-1}} f(x_i) dx_i dx_{i-1} \dots dx_1 * * \int_0^{\Delta} f(x_1) \int_0^{\Delta-x_1} f(x_2) \dots \int_{\Delta-x_1-x_2-x_{i-1}}^{\infty} f(x_i) dx_i dx_{i-1} \dots dx_1 \quad (4)$$

kur $f(x_i)$ – patērētāju pieprasījuma sadalījuma blīvuma funkcija;

Δ – starpība starp mērķa krājumu līmeni S un atkalpasūtījuma punktu s .

i – vērā ņemamo gadījumlieluma mainīgā vērtību skaits; jo lielāks ir saskaitāmo skaits, jo precīzāk sadalījums apraksta gadījumlieluma Q uzvedību.

Lai noteiktu pasūtījuma lieluma sadalījuma blīvuma funkciju $f_Q(x)$, ir jāatvasina tā sadalījuma funkcija $F_Q(x)$ (4):

$$f_Q(x) = f(x) * \left(1 - \int_0^{\Delta} f(x) dx \right) + \int_0^x f(x_1) f(x-x_1) dx_1 * \int_0^{\Delta} f(x_1) \int_{\Delta-x_1}^{\infty} f(x_2) dx_2 dx_1 + \dots + \int_0^x f(x_1) \int_0^{x-x_1} f(x_2) \dots \int_0^{x-x_1-\dots-x_{i-2}} f(x-x_1-\dots-x_{i-1}) dx_{i-1} dx_{i-2} \dots dx_1 * * \int_0^{\Delta} f(x_1) \int_0^{\Delta-x_1} f(x_2) \dots \int_{\Delta-x_1-x_2-x_{i-1}}^{\infty} f(x_i) dx_i dx_{i-1} \dots dx_1 \quad (5)$$

Zinot gadījumu lieluma sadalījuma blīvuma funkciju, ir iespējams analītiski iegūt tā sadalījuma skaitliskos raksturotājus: matemātisko cerību (6) un dispersiju (7):

$$E(Q) = \int_{\Delta}^{\infty} x f_Q(x) dx, \quad (6)$$

kur $f_Q(x)$ – pasūtījuma lieluma sadalījuma blīvuma funkcija.

$$D(Q) = \int_{\Delta}^{\infty} x^2 f_Q(x) dx - [E(Q)]^2. \quad (7)$$

Pasūtījuma lieluma Q dispersijas lielums raksturo bulvīpa efekta lielumu piegādes ķēdē. Pielietojot izstrādāto varbūtību teorijā bāzēto metodi un zinot patērētāju pieprasījuma sadalījuma likumu un tā parametrus, ir iespējams analītiski aprēķināt pasūtījuma lieluma Q dispersijas lielumu.

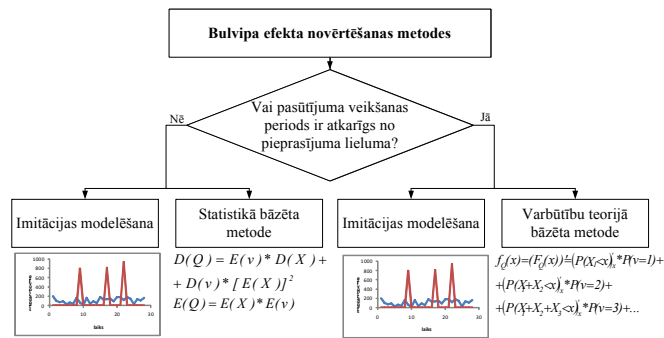
Izstrādātās metodes precizitātes pārbaudei tika realizēts tās praktiskais pielietojums, analizējot konkrētas piegādes ķēdes darbību, kur patērētāju pieprasījums ir sadalīts atbilstoši eksponenciālam sadalījumam un analītiski iegūtie rezultāti tika salīdzināti ar imitācijas modelēšanas procesā iegūtajiem (sk. 2. tab.). Detalizēti aprēķini ir sniegti promocijas darba 3. un 4. pielikumos.

2. tabula

Bulvīpa efekta lieluma analītiskās varbūtību teorijā bāzētās novērtēšanas metodes validācijas rezultāti

<i>Nr.</i>	$E(Q)_{an}$	$STD(Q)_{an}$	$E(Q)_{sim}$	$STD(Q)_{sim}$	χ^2_{fakt}	$\left[\begin{matrix} \chi^2_{1-0.95,779} \\ \chi^2_{0.95,779} \end{matrix} \right]$	<i>rezultāts</i>
1.	64	25	75	25	798	[734;866]	sakrīt
2.	42	17	50	17	799	[734;866]	sakrīt
3.	32	13	37	13	783	[734;866]	sakrīt
4.	25	10	30	10	778	[734;866]	sakrīt
5.	21	9	25	8	773	[734;866]	sakrīt

χ^2 testa rezultāti pierādīja izstrādātās, varbūtību teorijā bāzētās metodes precizitāti, analītiski novērtējot veiktā pasūtījuma lieluma sadalījuma skaitliskos raksturotājus (matemātisko cerību un standartnovirzi) pamatojoties uz patērētāju pieprasījuma sadalījuma skaitliskajiem raksturlielumiem.



7. att. Bulvīpa efekta novērtēšanas metodes

Bulvīpa efekta analītiskajai novērtēšanai piegādes ķēdē tika izstrādātas un aprobētas divas metodes. Ja pasūtījuma veikšanas periods v ir neatkarīgs no patērētāju pieprasījuma lieluma X , tad var pielietot imitācijas modelēšanu un statistikā bāzēto metodi, savukārt, ja eksistē atkarība starp diviem gadījumlīkumiem, tad var pielietot varbūtību teorijā bāzēto metodi un imitācijas modelēšanu veikto pasūtījumu standartnovirzes novērtēšanai, pamatojoties uz patērētāju pieprasījuma sadalījuma parametru vērtībām (sk. 7. att.).

Kā redzams imitācijas modelēšana atbalsta bulvīpa efekta lieluma novērtēšanu dažādas konfigurācijas piegādes ķēdēs, to var uzskatīt par universālu tehnoloģiju piegādes ķēdes darbības analīzei un plānošanai. Analītiskā pieeja piegādes ķēdes darbības analīzei neprasa specializēta programnodrošinājuma pielietošanu, bet matemātiskais aparāts ne vienmēr ir spējīgs aprakstīt sarežģītas dinamiskas un stohastiskas loģistikas sistēmas.

Trešā nodaļa

Trešajā nodaļā ir izklāstīta izstrādātā vienprodukta krājumu vadības sistēmas imitācijas modelēšanas metodika. Tā ir paredzēta imitācijas modelēšanas iespēju demonstrācijai analizējot, plānojot un vadot krājumu vadības sistēmas. Atšķirībā no esošajām informācijas sistēmām, krājumu vadības sistēmas imitācijas modelis ļauj vadības personālam modelēt pieņemto krājumu kontroles lēmumu efektu laikā un nepieciešamības gadījumā regulēt vai mainīt pašu krājumu vadīšanas procedūru, jo informācijas sistēmās iebūvētie algoritmi parasti nav pieejami krājumu sistēmas vadības personālam, un viņu darbs nereti ir saistīts tikai ar iepriekš noteiktas ieejas informācijas ievadi.

Sākumā tika aprakstīti imitācijas modelēšanas projekta realizācijas pamatposmi, ievērojot krājumu vadīšanas problēmu specifiku, kas atvieglo

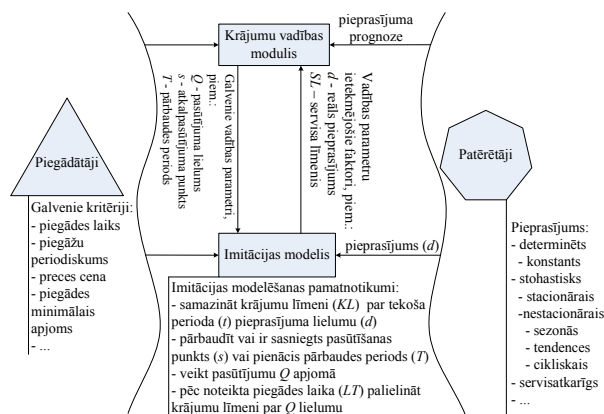
imitācijas modelēšanā bāzētu krājumu vadības sistēmas analīzi. Krājumu vadības sistēmas imitācijas modelēšanas projekts sastāv no 8 pamatposmiem:

1. Problēmu noteikšana – paredzēts krājumu vadības sistēmas pētīšanai un problēmu formulēšanai.
2. Ieejas datu definēšana – paredzēts nepieciešamās informācijas par krājumu vadības sistēmas struktūru un darbību vākšanai.
3. Konceptuālā modeļa izstrāde – paredzēts iegūto ieejas datu apvienošanai un analīzei.
4. Imitācijas modeļa izstrāde – paredzēts konceptuālā modeļa transformēšanai datormodelī. Promocijas darbā tika izstrādāta metodika vienprodukta krājumu vadības sistēmas diskrētu notikumu sistēmu imitācijas modeļa izveidošanai.
5. Imitācijas modeļa adekvātuma pārbaude – paredzēts pārbaudei vai izstrādātais imitācijas modelis ir piemērots turpmākai lietošanai, risinot krājumu vadīšanas problēmas.
6. Imitācijas modelēšanas eksperimentu organizēšana – paredzēts nepieciešamo imitācijas modelēšanas eksperimentu plānošanai un veikšanai.
7. Imitācijas modelēšanas rezultātu analīze – paredzēts iegūto imitācijas modelēšanas rezultātu statistiskai apstrādei un analīzei.
8. Iegūtā rezultāta izmantošana – paredzēts pieņemto lēmumu ieviešanai praksē.

Promocijas darbā izstrādātā metodika ir paredzēta vienprodukta krājumu vadības sistēmas diskrētu notikumu sistēmu imitācijas modeļa izveidošanai. Tiek noteikti un aprakstīti soļi, kurus nepieciešams izpildīt krājumu vadības sistēmas imitācijas modeļu izstrādei neatkarīgi no imitācijas modelēšanas vides. Krājumu vadības sistēmas darbība risina divus pamatjautājumus: (1) krājumu vadīšanas stratēģijas parametru noteikšana un (2) krājumu līmeņa izmaiņu organizēšana, atbilstoši noteiktajiem parametriem. Galvenā metodikas ideja ir atdalīt krājumu vadīšanas stratēģijas parametru noteikšanas analītisko daļu, kas pēc savas būtības ir statiska, no krājumu līmeņa izmaiņu dinamisku procesu modelēšanas (sk. 8. att.). Krājumu līmeņa izmaiņu notikumi ir standarta jebkurai krājumu vadības sistēmai, līdz ar to, lai analizētu dažādas krājumu vadības sistēmas, ir nepieciešams mainīt tikai analītisko daļu, bet notikumu imitācija paliek nemainīga.

Krājumu vadības sistēmas imitācijas modeļa izstrādes metodika ietver šādus soļus:

1. Izvēlēties krājumu vadīšanas stratēģiju, ņemot vērā tirgus prognozēto pieprasījumu un piegādātāju nosacījumus.



8. att. Vienprodukta krājumu vadības sistēmas imitācijas modeļa izstrādes principi

Eksistē vairākas krājumu vadīšanas stratēģijas, ko pielieto kontrolējot krājumus noliktavās. No tiem var izdalīt četras visizplatītākās stratēģijas: (s, Q) ; (s, S) ; (R, S) un (R, s, S) (sk. 9. att.). Visas krājumu vadības sistēmas var iedalīt divās grupās:

- 1) nepārtraukti pārbaudāmās sistēmas – esošais krājumu līmenis tiek kontrolēts nepārtraukti, tas ir, katrā laika periodā, pēc tekošā perioda pieprasījuma apmierināšanas, tiek pārbaudīti paliekošie krājumi un pieņemts lēmums par krājumu līmeņa papildināšanas nepieciešamību.
- 2) periodiski pārbaudāmās sistēmas – krājumu līmenis tiek kontrolēts noteiktajos laika periodos, tas ir, katrā n -tajā laika periodā (piem., katru otro dienu vai nedēļas beigās) tiek pārbaudīti atlikušie krājumi, un pieņemts lēmums par krājumu līmeņa papildināšanas nepieciešamību.

Minētās četras pamatstratēģijas var papildināties ar nosacījumiem, kas ir raksturīgi konkrētā tirgū darbojošai krājumu vadības sistēmai.

2. Realizēt izvēlētās krājumu stratēģijas vadības parametru noteikšanu, izmantojot analītisko modeli.

Katrai augstāk minētajai krājumu vadīšanas stratēģijai ir atbilstošas analītiskās izteiksmes vadības parametru noteikšanai (sk. 9. att.).

Protams, jebkuras krājumu vadīšanas stratēģijas parametru vērtības lielā mērā ir atkarīgas no piegādātāju prasībām un sadarbības īpašībām. Piemēram, ja pasūtījuma piegādes laiks nav noteikti definēts, tad tas ir gadījumlielums, un to jāņem vērā aprēķinot (s, Q) krājumu vadīšanas stratēģijas drošības krājumu līmeni, ievērojot piegādes laika nenoteiktību:

$$SS = z * \sqrt{\hat{\sigma}_d^2 * \overline{LT} + \sigma_{LT}^2 * \hat{d}^2}, \quad (8)$$

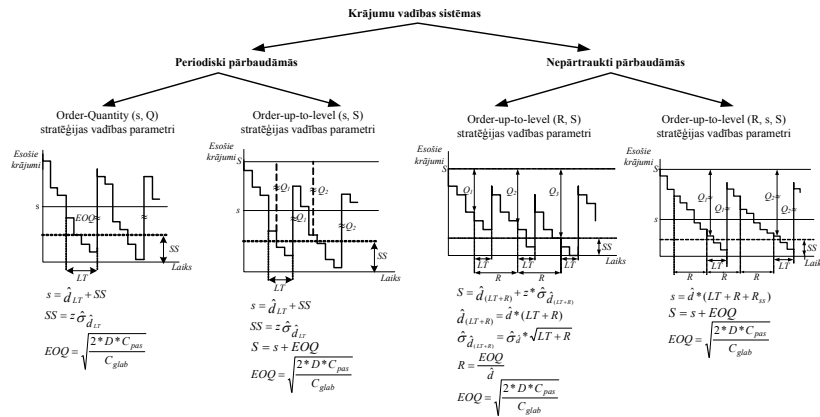
kur $\hat{\sigma}_d$ – viena perioda pieprasījuma prognozējamā standartnovirze, gab.;

\overline{LT} – piegādes laika vidējā vērtība, laika periods;

σ_{LT} – piegādes laika standartnovirze, laika periods;

\hat{d} – viena perioda pieprasījuma prognozējamā vidējā vērtība, gab.;

z – servisa līmeņa koeficients (drošības krājumu faktors).



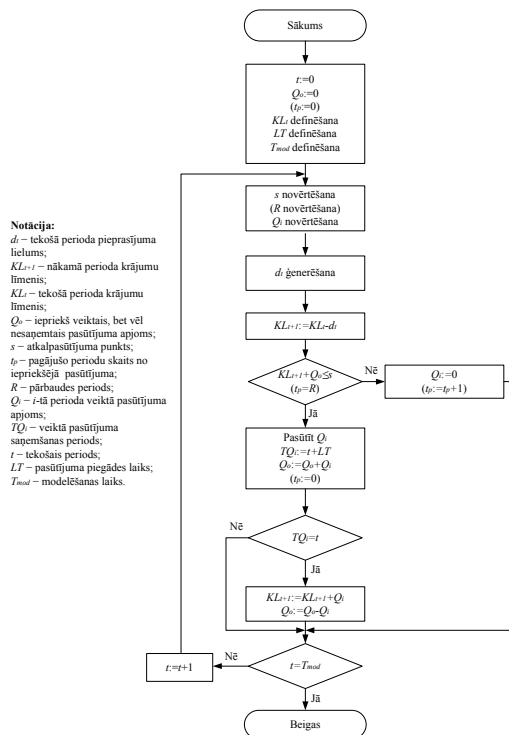
9. att. Krājumu vadības stratēģijas darbības principi

Līdz ar to ir svarīgi analizēt konkrētā tirgū darbojošās krājumu vadības sistēmas struktūru un noteikt tai raksturīgās īpašības.

3. Realizēt krājumu līmeņa izmaiņu dinamiku, izstrādājot imitācijas modeli.

Krājumu vadības sistēmas modelēšanai ir iespējams izmantot gan universālas imitācijas modelēšanas sistēmas, kas ir paredzētas iekšējo loģistikas procesu modelēšanai, gan loģistikas imitācijas modelēšanas sistēmas, kas pamatā ir paredzētas piegādes ķēžu modelēšanai. Galvenie izvirzītie noteikumi imitācijas modelēšanas videi ir diskrētu notikumu, stohastisku sistēmu imitācijas modelēšanas atbalsts.

Krājumu vadības sistēmai jānodrošina noteiktu pamatnotikumu secību izpildi, modelējot to izmantojot izstrādāto un 10. attēlā parādīto algoritmu.



10. att. Krājumu līmeņa izmaiņu realizēšanas algoritms

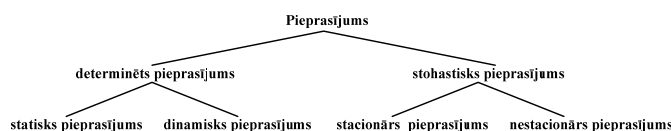
4. Nodrošināt nepieciešamās informācijas apmaiņas iespēju starp analītisko un imitācijas modeļiem.

Modernas imitācijas modelēšanas paketes parasti ir atvērtas un atbalsta sadarbību ar citu programmatūru, piem., MS Excel, MS Access, MS Visio u.c. Informācijas apmaiņas procesa realizācija lielākā mērā ir atkarīga no izvēlētajā imitācijas modelēšanas vides, kā arī no vides, kur ir izstrādāts analītiskais modelis. Vairākos gadījumos saiti starp analītisko un imitācijas modeļiem ir vienkāršāk realizēt, pielietojot universālās programmēšanas valodas, tādas kā C, C++, Visual Basic, Visual Basic for Applications, u.c.

Dažos gadījumos krājumu vadības sistēmas darbības rezultāti ietekmē krājumu vadīšanas stratēģijas parametru vērtības, tas ir, vadības parametri reaģē uz sistēmas darbības mainīgajiem apstākļiem un pielāgojas sistēmas darbības videi modelēšanas laikā. Atgriezeniskā saite ir realizējama analogiski informācijas apmaiņas metodei starp analītisko un imitācijas modeļiem.

5. Modelēt izstrādātās krājumu vadības sistēmas darbību laikā, imitējot reālu tirgus pieprasījumu.

Pieprasījuma veids ir viens no krājumu vadīšanas stratēģijas veidošanas pamatfaktoriem. Pieprasījums var būt determinēts (noteikti zināms) un stohastisks (aprakstīts ar varbūtības sadalījumu). 11. attēlā ir parādīti krājumu vadības sistēmām raksturīgie pieprasījuma veidi.



11. att. Pieprasījuma klasifikācija

Krājumu vadības sistēmas darbības reālajos apstākļos determinētais statistiskais pieprasījuma veids ir reti sastopams un visprecīzāk pieprasījumu var aprakstīt ar nestacionāriem varbūtību sadalījumiem. Dažkārt, aprakstot pieprasījuma raksturu, ir nepieciešams ņemt vērā krājumu vadības sistēmas darbības rādītāju vērtības, piemēram, nodrošinātā patērētāju apkalpošanas servisa kvalitāti (pieprasītās preces klātbūtni noliktavā, pieprasījuma izpildes laiku un precizitāti, u.c.), jo servisa kvalitātes izmaiņas var ietekmēt nākamā pieprasījuma lielumu.

Pirmkārt, lai noteiktu efektīvus krājumu vadīšanas stratēģijas parametrus, ir pēc iespējas precīzāk jāprognozē pieprasījuma raksturs. Otrkārt, lai organizētu eksperimentus ar izstrādāto krājumu vadības imitācijas modeli, ir jāimitē reāla tirgus uzvedība un jo precīzāk tiks aprakstīts tirgus pieprasījums, jo iegūtie modelēšanas rezultāti būs līdzīgāki reālas sistēmas darbības rezultātiem.

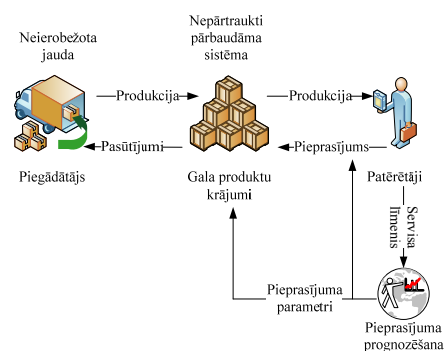
Ceturtnā nodaļa

Ceturtnajā nodaļā izstrādātā metodika tika praktiski pielietota, modelējot krājumu vadības sistēmu ar servisatkarīgo pieprasījumu (turpmāk tekstā „servisatkarīga krājumu vadības sistēma”).

Pats nozīmīgākais apkalpošanas servisa raksturojums ir pieprasītās produkcijas klātbūtne noliktavā [95]. Līdz ar to uzņēmuma servisa līmeni raksturo bilance starp pieprasījuma lielumu un produkcijas krājumiem. Nespēja nodrošināt produkcijas pieejamību un apmierināt pieprasījumu tekošajā laika periodā noved pie krājumu deficīta. Patērētāju orientētā tirgū jebkurš pieprasījums krājumu deficīta gadījumā ir zaudēts. Zaudējumus no nerealizētas tirdzniecības var parādīt ņemot vērā sakarību starp nodrošināto servisa līmeni un nākotnes tirgus pieprasījumu (t.i., patērētāji, kas saskaras ar krājumu deficītu, iespējams pāries pie cita pārdēvēja, turpretim augsts servisa līmenis var piesaistīt papildus patērētājus).

Tradicionālās krājumu vadības sistēmas neievēro sasniegto patērētāju apkalpošanas servisa līmeņa ietekmi uz tirgus pieprasījumu. Promocijas darba ietvaros tradicionālā sistēma tika papildināta ar servisatkarīgo pieprasījumu modelēšanu, kur nodrošinātais servisa līmenis un patērētāju pieprasījuma sadalījuma parametru vērtības ir lineāri atkarīgas [33]. Tika modelēta vienprodukta krājumu vadības sistēma, kur patērētāju pieprasījums ir stohastisks un piegādātāju ražotspēja nav ierobežota (sk. 12. att). Izstrādātais imitācijas modelis modelē aprakstīto krājumu vadības sistēmu un iekļauj divus analītiskos modeļus:

1. Modelis atgriezeniskās saites realizēšanai starp modelētajām izmaiņām īstermiņa servisa līmenī (9) un patērētāju pieprasījuma sadalījuma parametriem.
2. Modelis krājumu vadīšanas stratēģijas parametru novērtēšanai.



12. att. Krājumu vadības sistēmas struktūra

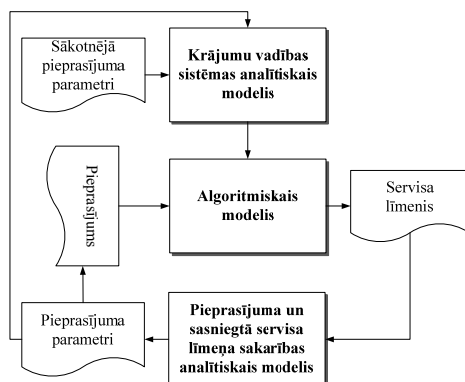
Īstermiņa apkalpošanas servisa līmenis t laika periodā ir skaitliski izteikts lielums (no 0 līdz 1) un aprēķināms pēc šādas formulas:

$$SL_t = 1 - \frac{SO_t}{D_t}, \quad (9)$$

kur SO_t – neizpildītais pieprasījums laika periodā t , gab.;

D_t – pieprasījuma lielums laika periodā t , gab.

Izstrādātā krājumu vadības sistēmas imitācijas modeļa struktūra ir parādīta 13. attēlā.



13. att. Atgriezeniskās saites starp algoritmisko un analītiskajiem modeļiem noteikšana

Imitācijas modelēšanas procesā tiek realizēti šādi galvenie soļi:

1. Inicializēt ieejas datu moduli, ieskaitot sākotnējos (iegūtos ar tradicionālo prognozēšanas metožu palīdzību) patērētāju pieprasījuma sadalījuma parametrus.
2. Aprēķināt vadības parametrus atbilstoši $s-Q$ vadīšanas stratēģijai.
3. Izpildīt krājuma līmeņa izmaiņu procesu imitāciju.
4. Aprēķināt tekošajā laika periodā sasniegto servisa līmeni.
5. Aprēķināt patērētāju pieprasījuma sadalījuma parametrus, ņemot vērā sasniegto servisa līmeni.
6. Atjaunot modelējamā pieprasījuma parametrus analītiskajā un imitācijas modelī.
7. Atgriezies 2. solī, kamēr krājumu vadības sistēmas darbības imitācija nav pabeigta (netiek sasniegts definētais modelēšanas laiks).

Krājumu izmaiņu dinamika tika modelēta imitācijas modelēšanas vidē Arena 8.00, analītiskie modeļi – izmantojot programmēšanas valodu Visual Basic for Applications.

Ar izstrādāto imitācijas modeli tika veikti vairāki eksperimenti sekojošo mērķu sasniegšanai:

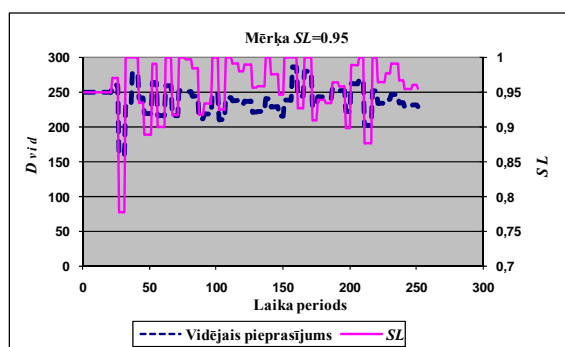
1. Novērtēt patērētāju pieprasījuma sadalījuma parametru izmaiņu dinamiku.
2. Noteikt krājumu vadīšanas stratēģijas parametrus, kas ievērojami ietekmē starpību starp mērķa un sasniegto servisa līmeni.

3. Analizēt tradicionālas un servīsatkarīgas krājumu vadības sistēmas spējas nepieciešamā apkalpošanas servīsa līmeņa nodrošināšanā.

Lai sasniegtu šos mērķus, tika veiktas eksperimentu sērijas, ņemot vērā sešus kvantitatīvos faktorus: (1) sākotnējais vidējais patērētāju pieprasījums \bar{D}_0 , (2) pieprasījuma standartnovirze, kas atbilst trokšņa signālam *SignalToNoise*, (3) mērķa (nepieciešamais) servīsa līmenis SL_{Target} , (4) pasūtījuma piegādes laiks LT , (5) pasūtījuma lieluma koeficients *OrderSize* un (6) servīsa līmeņa koeficients z .

Eksperimenti tika realizēti atbilstoši daļējam faktoriālajam eksperimentu plānam ar izšķirtspēju IV, kas sastāv no 16 eksperimentālajiem scenārijiem. Katram krājumu vadības sistēmas modeļa scenārijam tiek veikti 5 neatkarīgi eksperimenti. Katra eksperimenta garums ir 250 nedēļas ar iesildīšanas periodu 20 nedēļas.

Vidējā patērētāju pieprasījuma un sasniegtā īstermiņa servīsa līmeņa dinamiskā uzvedība imitācijas gaitā ir parādīta 14. attēlā. Eksperimentālo rezultātu grafiskais attēlojums apstiprina to, ka nedēļas laikā sasniegtais īstermiņa servīsa līmenis bieži mainās un atšķiras no mērķa līmeņa. Tas izraisa patērētāju pieprasījuma izmaiņas. Ar varbūtību 95% var secināt, ka modelējamās sistēmas sasniegtais ilgtermiņa servīsa līmenis atšķiras no mērķa servīsa līmeņa vidēji par 5%, un vidējais patērētāju pieprasījums atšķiras no sākotnējā vidēji par 13%.



14. att. Servīsatkarīgā pieprasījuma izmaiņu dinamika ar mērķa servīsa līmeni 0.95

Iegūtie imitācijas modelēšanas rezultāti tika apkopoti, pielietojot daudzfaktoru lineārās regresijas analīzi.

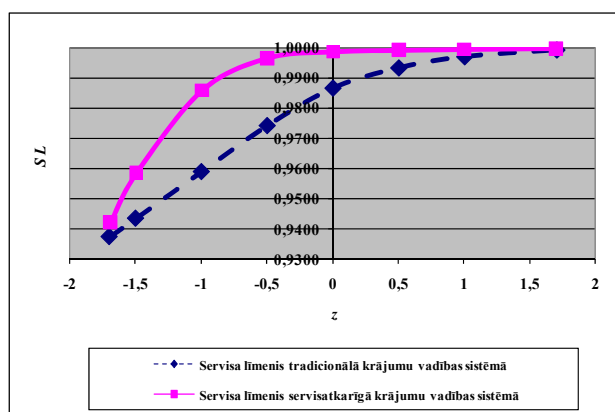
Regresijas analīzes rezultāti

Neatkarīgie mainīgie faktori	Koeficients	P-vērtība	95% ticamības intervāls
<i>Konstante</i>	-0.795	0.00000	[-0.8379; -0,7511]
\bar{D}_0	0.00002	0.05062	[-5.61e-08; 4.04e-05]
<i>SignalToNoise</i>	-0.004	0.00000	[-0.0044; -0.0034]
<i>LT</i>	0.006	0.00000	[0.0047; 0.0067]
<i>OrderSize</i>	0.003	0.14589	[-0.001; 0.007]
SL_{Target}	0.848	0.00000	[0.8026; 0.8925]

Iegūtie regresijas vienādojuma koeficienti parādīja, ka faktori *SignalToNoise*, *LT* un SL_{Target} ir statistiski nozīmīgi ar 95% varbūtību, jo faktoru hipotētiskās vērtības $\beta=0$ nepieder 95% ticamības intervālam, bet faktori \bar{D}_0 un *OrderSize* ir statistiski nenozīmīgi (sk. 3. tab.).

Realizētā jutīguma analīze parādīja, ka starpību starp mērķa un sasniegto ilgtermiņa servisa līmeni ievērojami ietekmē trokšņa signāls, piegādes laiks un definētais mērķa servisa līmenis. Plānojot servisatkarīgas krājumu vadības sistēmas darbību, īpaši rūpīgi jāanalizē tieši šie faktori.

15. attēls parāda divu veidu krājumu vadības sistēmu darbības atšķirību. Pamatojoties uz iegūtajiem rezultātiem, ir iespējams noteikt drošības krājumu koeficienta z vērtību, kas ir nepieciešama definētā ilgtermiņa servisa līmeņa sasniegšanai gan tradicionālā, gan arī servisatkarīgā krājumu vadības sistēmā.



15. att. Ilgtermiņa servisa līmeņa atkarība no drošības krājumu koeficienta

Atkarībai starp drošības krājumu koeficientu un nodrošināto servisa līmeni ir nelineārs raksturs. Drošības krājumu koeficienta vērtību palielināšana sekmēs strauju servisa līmeņa paaugstināšanos intervālā no 93% līdz 98%. Servisa līmeņa izmaiņu līkne stabilizēsies, sasniedzot 99%. Protams, šo attiecību raksturojums ir atkarīgs no konkrētām krājumu vadīšanas stratēģijas parametru vērtībām, bet jebkurā gadījumā eksistēs kritiskais punkts, pēc kura ilgtermiņa servisa līmenis paliks nejutīgs pret turpmāko drošības krājumu koeficienta vērtības palielināšanu.

Nosakot vienādus drošības krājumu koeficientus, tradicionālā krājumu vadības sistēmā ar konstantiem patērētāju pieprasījuma parametriem nodrošinātais ilgtermiņa servisa līmenis būs zemāks, nekā sistēmā ar servisatkarīgo pieprasījumu. Tas nozīmē, ka, ievērojot atkarību starp sasniegto apkalpošanas servisa līmeni un tirgus pieprasījumu ar vienādiem drošības krājumiem, var sasniegt augstāko apkalpošanas servisa līmeni. Tas ir, uzturot vienādus krājumus, tradicionālā krājumu vadības sistēmā izdosies sasniegt zemāku apkalpošanas servisa līmeni, nekā sistēmā ar servisatkarīgu pieprasījumu.

PROMOCIJAS DARBA GALVENIE REZULTĀTI

Promocijas darbā ir izstrādāta vienprodukta krājumu vadības sistēmas imitācijas modelēšanas metodika, kura ir paredzēta dinamiskām, diskrētu notikumu sistēmām, kas darbojas stohastiskā vidē. Metodika integrē imitācijas modelēšanas tehnoloģiju un krājumu vadīšanas problēmas un ir paredzēta krājumu vadības sistēmas imitācijas modelēšanas projekta realizācijai. Darba gaitā tika analizētas savstarpēji saistītas krājumu vadības sistēmas jeb piegādes ķēdes darbība stohastiskā vidē, kā rezultātā radās nepieciešamība novērtēt sistēmas darbības stabilitāti. Tika izstrādātas statistiskā un varbūtību teorijā bāzētas metodes piegādes ķēdes darbības stabilitātes rādītāja – bulvīpa efekta lieluma analītiskajai novērtēšanai. Izstrādātās metodes tika verificētas, pielietojot imitācijas modelēšanas tehnoloģiju. Darbs noslēdzas ar izstrādātās metodikas aprobāciju, realizējot servisatkarīgās krājumu vadības sistēmas imitācijas modelēšanas projektu, kas parāda izstrādātās metodikas lietojamību praksē.

Izpildītā darba rezultāti ir šādi:

1. Izstrādāta imitācijas modelēšanas metodika vienprodukta krājumu vadības sistēmām, kas darbojas stohastiskā vidē.
2. Metodikas aprobācijas rezultātā ir izstrādāti priekšlikumi krājumu vadības sistēmas darbības uzlabošanai, ņemot vērā atkarību starp sasniegto patērētāju apkalpošanas servisa līmeni un tirgus pieprasījumu, un regulējot sistēmas vadības parametrus.

3. Izstrādātās bulvīpa efekta statistikā un varbūtību teorijā bāzētās novērtēšanas metodes ļauj analītiski aprēķināt bulvīpa efekta lielumu krājumu vadības sistēmām, kur pasūtījuma lielums ir saņemto pieprasījumu summa tekošajā pasūtīšanas ciklā.
4. Izstrādātā analītiskā izteiksme bulvīpa efekta lieluma novērtēšanai pierādīja analizējamās sistēmas imitācijas modeļa adekvātumu un ļāva secināt par imitācijas modelēšanas tehnoloģijas priekšrocībām, analizējot dinamiskas sistēmas, kas darbojas stohastiskā vidē.
5. Veiktā imitācijas modelēšanā bāzētā analīze pierādīja, ka centralizētas informācijas apmaiņas stratēģijas pielietošana piegādes ķēdes vadīšanā samazina stabilitātes rādītāja bulvīpa efekta lielumu, kas liecina par moderno informācijas tehnoloģiju izmantošanas efektivitāti.
6. Iegūtie imitācijas modelēšanas eksperimentālie rezultāti parādīja, ka periodiski pārbaudāmo krājumu vadības sistēmu pielietošana piegādes ķēdē stabilizē to darbību stohastiskā vidē, un apstiprināja krājumu vadīšanas problēmas svarīgumu piegādes ķēdes vadīšanā.

NOSLĒGUMS

Promocijas darbā ir aprakstītas imitācijas modelēšanas tehnoloģijas pielietošanas iespējas, risinot piegādes ķēdes vadīšanas problēmas stohastiskā darbības vidē, un izstrādāta metodika krājumu vadības sistēmas imitācijas modelēšanas projekta realizācijai, ņemot vērā, ka krājumu kontrole ir viena no kritiskākajām problēmām piegādes ķēdes vadīšanā. Tika izstrādātas statistikā un varbūtību teorijā bāzētas metodes piegādes ķēdes darbības stabilitātes rādītāja (bulvīpa efekta lieluma) analītiskai novērtēšanai. Promocijas darba izstrādes gaitā iegūtajiem rezultātiem ir gan teorētiska, gan arī praktiska nozīme, tos var izmantot mācību kursos, kas saistīti ar imitācijas modelēšanu un loģistiku. Ievērojot tirdzniecības nozares attīstības līmeni un potenciālās izaugsmes iespējas, darbā izstrādāto metodiku un praktiskās rekomendācijas loģistikas sistēmu darbības efektivitātes paaugstināšanai ir lietderīgi pielietot pakalpojumu nozarēs, kur nepieciešams nodrošināt ciklisko krājumu glabāšanu.

IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS

1. Altiok T., Melamed B. Simulation Modeling and Analysis with Arena. – USA: Cyber Research, Inc. and Enterprise Technology Solutions, Inc., 2001. - 418 p.
2. Arena Simulation: Simulation solutions driving business strategy/ Internets. - <http://www.arenasimulation.com/solutions/docs/Simulation%20Cookbook.pdf>

3. Arenasimulation: Danish Rail Cargo Logistic Simulator/ Internets. - <http://www.arenasimulation.com/pdf/dsb.pdf>
4. Armbuster D., Marthaler D., Ringhofer C. Efficient simulations of supply chains// Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference. – San Diego: Eds. Yücesan E., Chen C.-H., Snowdon J.L., Charnes J.M., 2002. – P. 1345-1348.
5. Asipre Systems homepage: Global Logistics Assistance Simulation/ Internets. - http://www.aspiresys.com/pmcentral/html/case_studies.html
6. Baker R.C., T.L. A deterministic inventory system with an inventory-level-dependent demand rate// Journal of the Operational Research Society. - 1995. – No. 39 (9). – P. 823-831.
7. Ballou R.H. Business logistics management. – New Jersey: Prentice-Hall International Inc., 4th edition, 1992. – 443 p.
8. Banks J., Buckley S., Jain S. et al. Panel session: opportunities for simulation in supply chain management// Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference. – San Diego: eds. Yücesan E., Chen C.-H., Snowdon J.L., Charnes J.M., 2002. - P. 1652-1658.
9. Banks J., Malave C.O. The simulation of inventory systems: An overview// Simulation Councils, Inc. – 1984. - P. 283-290.
10. Barlas, Y., Aksogan A. Product Diversification and Quick Response Order Strategies in Supply Chain Management// Proceedings of the International System Dynamics Conference. – Boston: 1996. – P. 51-54.
11. Behlau T., Strothotte C., Schürholz A. Modeling and simulation of supply chains// Proceedings of the 11th European Simulation Multiconference. – Istanbul: 1997. - P. 389-395.
12. Belpaire B., Van Landeghem H., Petuhova J. Implementing a cost model in a textile supply chain using simulation// Proceedings of the 14 European Simulation Multiconference “Simulation and Modelling: enablers for a better quality of life”. – Ghent: 2000. – P. 455-460.
13. CACI International Inc.: IBM PC Company Supply Chain/ Internets. – http://www.caciasl.com/solutions/solutions_simprocess.cfm#IBM
14. CACI International Inc.: Products Union Pacific Railroad Network/ Internets. - <http://www.caci.com/asl/products.shtml>
15. Cao X.R. A comparison of the dynamic of continuous and discrete events systems// Proceedings of the IEEE. – New York, IEEE Press: 1989. – P. 7-13.
16. Chandra C., Chilov N., Smirnov A. Analysis of supply chain bullwhip effect using simulation modeling// CONSA Research Report Series “Simulation: Applications, Research and Education in the Baltic Area”. - Linköping: Presentations at the Special CONSA Conference, 2001. – 10 p.

17. Chandra C., Chilov N., Smirnov A. Generic Simulation Architecture for Supply Chain Modeling// Proceedings of 15th European Simulation Multiconference. – Prague: 2001. - P. 874-879.
18. Chandra C., Grabis J. Supply Chain Configuration: Concepts, Solutions and Applications. – USA: Springer Science+Business Media, LLC, 2007. - 342p.
19. Chen L.R., Ghosh S. Modeling and Simulation of a Hierarchical, Distributed, Dynamic Inventory Management Scheme// Simulation. – 1997. - Volume 68, Number 6. - P. 340-362.
20. Chen, Y.F., Ryan J.K., Simchi-Levi D. The Impact of Exponential Smoothing Forecasts on the Bullwhip Effect// Naval Research Logistics. – 2000. – No. 47. - P. 269-286.
21. Chung K.-J. An algorithm for an inventory model with inventory-level-dependent demand rate// Computers & Operations Research. - 2003. – No. 30 (9). - P. 1311-1317.
22. Cohen M.A., Lee H.L. Resource deployment analysis of global manufacturing and distribution networks// Journal of Manufacturing and Operations Management. – 1989. - Volume 2. - P. 81-104.
23. Crosbie R. Modeling and simulation in supply chain management// Proceedings of Harbor Simulation Conference. Presentation – Portofino: 2000. – 9 p.
24. Dabbah R. Manufacturing Process optimization through the Simulation, Printronix Chain: Case study/ Internets. – <http://www.aspiresys.com/resource-center/case-studies/>
25. Davis T. Effective supply chain management// Sloan Management Review. – 1993. - P. 35-46.
26. Dejonckheere J., Disney S.M., Lambrecht M.R. et al. Measuring and avoiding the bullwhip effect: A control theoretic approach// European Journal of Operational Research. – 2003. – No. 147. - P. 567–590.
27. Discrete-Event System Simulation: Book. 4th ed./ Banks J., Carson J.S., Nelson B.L. et al. - USA: Prentice Hall, 2004. - 624 p.
28. Design and implementation of a new logistics concept for a steel factory: Case study/ Internets. – <http://www.enterprisedynamics.com/>
29. Disney S.M., Towill, D.R. A robust and stable analytical solution to the production and inventory control problem via a z transform approach// Proceedings of the Twelfth International Working Conference on Production Economics. – Igl: Vol. 1, Austria, 2002. – P. 37-47.
30. Distribution center Levi Strauss GmbH: Case study/ Internets. – <http://www.soltecs.de/>
31. Encyclopedia of Computer Science: Smith R.D., Simulation article/ Internets. – <http://www.modelbenders.com/encyclopedia/>

32. Eneyo E.S., Pannirselvam G.P. The use of simulation in facility layout design: A practical consulting experience// Proceedings of the Winter Simulation Conference (WSC'98). – Washington: Vol. 2, 1998. – P. 1527-1532.
33. Ernst R., Powell S.G. Optimal inventory policies under service-sensitive demand// European Journal of Operational Research. – 1995. –No.87. – P. 316-327.
34. Feller W. An introduction to probability theory and its applications. – New York: John Wiley&Sons, Inc., London: Chapman&Hall, Limited, 1967. – 498 p.
35. Forrester J.W. Designing the future// Sevilla: Universidad de Sevilla, 1998. – 11 p.
36. Forrester J.W. Industrial Dynamics. – New York: MIT Press and Wiley, 1961. – 479 p.
37. Goodsell A., Van Kley T.J. Inventory management simulations at CAT logistics// Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference. – Orlando: ed. by Joines J.A., Barton R.R., Kang K., Fishwick P. A., Volume 2, 2000. – P. 1185-1190.
38. Gross Associates: Simulation and the advanced performance warehouse/ Internets. - <http://www.grossassociates.com/articles/articles.htm>
39. Hande E. Simulation modelling of a real manufacturing system in an automobile factory – TOFAS// Proceedings of the 11th European Simulation Multiconference. – Istanbul: 1997, P. 331-335.
40. Hennet J.-C. Load and inventory fluctuations in supply chains// Proceedings of the 17th European Simulation Symposium and Exhibition “Simulation in industry”. – Marseille: 2005. – P. 217-222.
41. Ho Y.C., Cao X.R. Perturbation Analysis of Discrete Event Dynamic. – Boston: Kluwer Academic Publisher, 1991. – 464 p.
42. INFOR: SSA Supply Chain Managements/ Internets. – <http://www.ssaglobal.com/solutions/scm/index.aspx>
43. Ingals R.G., Foote B.L., Krishnamoorthy A. Reducing the bullwhip effect in supply chains with control-based forecasting// International Journal of Simulation&Process Modelling, 2005. – No. 1/2. - P. 90-110.
44. Ishii K., Takahashi K., Muramatsu R. Integrated production, inventory and distribution systems// International Journal of Production Research. –1988.- No. 26(3). - P. 473-482.
45. Kelle P., Milne A. The effect of (s, S) ordering policy on the supply chain// International Journal of Production Economics. – 1999. – Volume 59. – P. 113-122.
46. King R.E., Moon K. Quick Response Replenishment: A Case Study// Proceedings of Winter Simulation Conference, Proceedings. – New

- Jersey: 1999. – P. 1341-1349.
47. Kleijnen J.P.C. Supply chain simulation tools and techniques: a survey// International Journal of Simulation & Process Modelling. – 2005. – Volume 1, No.1/2. – P. 82-89.
 48. Krūmiņš N. Rokasgrāmata Loģistikas sistēmu vadīšanai, jeb kas jāzina, lai LOGISTIKAS sistēmu izveidotu par 30% pelnošāku. – Rīga: Petrovskis&Ko, 2004. – 153 lpp.
 49. Laboratory of Logistics - Savona Campus: Crosbie R., Modeling and simulation in supply chain management/ Internets. – <http://itim.unige.it/ssi11x00/crosbie.htm>
 50. Law A.M., Kelton W.D. Simulation modeling and analysis. – Singapore: McGraw-Hill International Series in Industrial Engineering and management Science, 3rd edition, 2000. - 760 p.
 51. Law A.M., McComas M.G. Simulation of manufacturing systems// Proceedings of Winter Simulation conference, Vol. 1. - Las Alamitos: 1998. – P. 49-52.
 52. Lee H.L., Padmanabhan V. Whang S. The Bullwhip Effect in Supply Chains// Sloan Management Review. – 1997. – P. 93-102.
 53. Logic Tools home page: Network design overview/ Internets. – <http://www.logic-tools.com/solutions/logicnetplus.html>
 54. Logic-Tools: Supply Planner for SAP users/ Internets. – http://www.logic-tools.com/solutions/production_sourcing_asset_planning_sap.html
 55. Logistics Simulation: VNA Experience/ Internets. – http://www.logsim.co.uk/vna_ex.htm
 56. Luong Huynh Trung, Phien Nguyen Huu. Measure of bullwhip effect in supply chains: The case of high order autoregressive demand process// European Journal of Operational Research.–2007.–No.183.–P. 197–209.
 57. Merkuryev Y., Burska O., Petuhova J. et al. Simulation and analysis of supply chains using LORD// Proceedings of the conference “Traditions and Innovations in Sustainable Development of Society”. – Rezekne: Environment and Society. Information Technologies, 2002.–P. 201-208.
 58. Merkuryev Y., Petuhova J. Simulation of logistics systems: A survey // Scientific Proceedings of Riga Technical University. – Riga: RTU, Series 5, Computer Science, Vol. 5, Information Technology and Management Science, 2001. – P. 125-135.
 59. Merkuryev Y., Petuhova J., Buikis M. Simulation-based analysis of the Bullwhip effect in supply chains// Book of Abstracts. Joint International Meeting “New Opportunities for Operations Research”. – Istanbul: 5th EURO/INFORMS, 2003. - P. 35.
 60. Merkuryev Y., Petuhova J., Buikis M. Simulation-based statistical

- analysis of the bullwhip effect in supply chains// Proceedings of the 18th European Simulation Multiconference “Networked Simulations and Simulated Networks”.–Magdeburg: ed. by Horton G., 2004.-P. 301-307.
61. Merkuryev Y., Petuhova J., Grabis J. Analysis of dynamic properties of an inventory system with service-sensitive demand using simulation// Proceedings of the 15th European Simulation Symposium “Simulation in Industry”. – Delft: SCS-Europe BVBA Ed. by Verbraeck A. and Hlupic V., 2003. – P. 509-514.
 62. Merkuryev Y., Petuhova J., Grabis J. Managing service-sensitive demand through simulation// Supply Chain Optimisation: Product/Process Design, Facility Location and Flow Control. Series: Applied Optimization. – 2005. – Volume 94. - P. 41-53.
 63. Merkuryev Y., Petuhova J., Van Landeghem H. et al. Simulation-based analysis of the bullwhip effect under different information sharing strategies// Proceedings of the 14th European Simulation Symposium&Exhibition “Modeling, Simulation and Optimisation”. – Dresden: SCS-Europe BVBA, 2002. – P. 294-299.
 64. Minner S. Multiple-supplier inventory models in supply chain management: A review// International Journal of Production Economics. – 2003. – Volumes 81-82. - P. 265-279.
 65. Morrice D.J., Valdez R.A., Chida J.P. et al. Discrete event simulation in supply chain planning and inventory control at freescale semiconductor, INC// Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference. – Orlando: Ed. by Kuhl M.E., Steiger N.M., Armstrong F.B., and Joines J.A., 2005. – P. 1718-1724.
 66. Operations Management// Slack N., Chambers S., Harland C. et al. – Financial Times, Prentice Hall; 2 edition, 1997. – 912 p.
 67. Order-processing-software: Developing concepts that work for you/ Internets. - <http://www.order-processing-software.com/>
 68. Page B., Kreutzer W. The Java simulation handbook: Simulating discrete event systems with UML and Java. – Aachen: Shaker Verlag, 2005. – 518 p.
 69. Pegden C.D. Simulation: a look to the future// Proceedings of the 11th European Simulation Multiconference. – Istanbul: 1997. – P. K17-K21.
 70. Permala A., Pasi S. A simulation tool for the assessment of transport and handling technologies in paper exports// Proceedings of the 7th European Simulation Symposium. – Erlangen-Nuremberg: 1995, P. 529-533.
 71. Petuhova J., Merkuryev Y. An approach to forecasting of a service-sensitive demand through simulation// Proceedings of the 9th International Multi-Conference “Advanced Computer Systems, ACS’2002. “Production System Design, Supply Chain Management and

- Logistics”. – Miedzyzdroje: Szczecin, Part II, 2002. – P. 489-496.
72. Petuhova J., Merkurjev Y. An overview of supply chain managing through the simulation// Proceedings of the international conference “Traditions and Innovations in Sustainable Development of Society”. – Rezekne: Environment and Society. Information Technologies, 2002. – P. 217-225.
 73. Petuhova J., Merkurjev Y. Combining analytical and simulation approaches to quantification of the bullwhip effect// Proceedings of the 19th European Conference on Modelling and Simulation “Simulation in wider Europe”. – Riga: Ed. by Merkurjev Y., Zobel R. and Kerckhoffs E., 2005. – P. 222-226.
 74. Petuhova J., Merkurjev Y. Combining analytical and simulation approaches to quantification of the bullwhip effect// International Journal of Simulation: Systems, Science & Technology (IJS³T), United Kingdom Simulation Society, The Nottingham Trent University. – 2007. – Volume. 8, No. 1. – P. 16-24.
 75. Petuhova J., Merkurjev Y. Methods of supply chain processes instability reduction through simulation// Proceedings (in the CD format) of the 4th International Workshop on Computer Science and Information Technologies (CSIT’2002). – Patras: Ed. by Peter P. Groumpos, 2002. – 5 p.
 76. Petuhova J., Merkurjev Y. Simulation-based analysis of sales volume and service level dependency// Proceedings of the International Mediterranean Modelling Multiconference. – Barcelona: ed. by Bruzzone A.G., Guasch A., Piera M.A., Rozenblit J., 2006.– P. 697-702.
 77. Petuhova J., Merkurjev Y., Indans J. Development of a simulation tool for selection of inventory control policy// Scientific Proceedings of Riga Technical University. Ser. 5. Computer Science. Vol. 14. Information Technology and Management Science. – Riga: RTU, 2003.– P. 147-155.
 78. Phelps R.A., Parsons D.J., Siprelle A.J. SDI Industry Pro: Simulation enterprise – wide problem solving// Proceedings of Winter Simulation Conference. – New Jersey: 1999. – P. 241-248.
 79. Pipeline Manager home page: PIPELINEMANAGER™, a proprietary computer simulation software package of Andersen Consulting/ Internets. – <http://www.pipelinemanager.com/>
 80. PMC home page: Products, Case study / Internets. – <http://www.pmccorp.com/Solutions/index.asp>
 81. Powers T.L., Closs D.J. An Examination of the Effects of Trade Incentives on Logistical Performance in a Consumer Products Distribution Channel// Journal of Business Logistics. – 1987. – Volume 8, No. 2. – P. 1-28.

82. Ray S., Jewkes E.M. Customer lead time management when both demand and price are lead time sensitive// *European Journal of Operational Research*. – 2003. – No.153 (3). – P. 769-781.
83. Riddalls C.E., Bennett S., Tipi N.S. Modelling the dynamic of supply chain// *International Journal of System Science*. – 2000. - Volume 31 (8). - P. 969-976.
84. Robinson S. *Simulation: The Practice of Model Development and Use*. – John Wiley&Sons, 2004. - 316 p.
85. Rockwell Automation: Arena Software/ Internets. – <http://www.arenasimulation.com/>
86. Schwartz B.L. A new approach to stockout penalties// *Management Science*. – 1968. No.12 (12). - P. 538-544.
87. Schwarz L, Weng Z. The design of a JIT supply chain: the effect of lead time uncertainty on safety stock// *Journal of Business Logistics*. - 2000. – No. 21 (2). - P. 231-253.
88. Shycon H.N., Maffei R.B. Simulation-Tool for Better Distribution// *Harvard Business Review*. – 1960. – No. 38. – P. 65-75.
89. Silver E.A., Peterson R. *Decision systems for inventory management and production planning*. – New York: John Wiley & Sons, 2nd ed., 1985. – 722 p.
90. Silver E.A., Pyke D.F., Peterson R. *Inventory management and production planning and scheduling*. - New York: John Wiley & Sons, 3rd ed., 1998. – 784 p.
91. Simchi-Levi D., Kaminsky P., Simchi-Levi E. *Designing and Managing the Supply Chain*. – USA: McGraw-Hill/Irwin, 2nd ed., 2002. – 384 p.
92. Simon H.A. On the application of servomechanism theory in the study of production control// *Econometrica*. - 1952. – No.20. - P. 247-268.
93. Simulation Dynamic Inc.: Applications/ Internets. - http://www.simulationdynamics.com/product/simulators/distribution_sim.asp
94. Simulation Dynamic Inc.: Applications/ Internets. - http://www.simulationdynamics.com/product/modeling_tools/sc_builder.asp
95. Sprancmanis N. *Biznesa loģistika*. – Rīga: Vaidelote, 2003. – 360 lpp.
96. Sterman J.D. Modeling Managerial Behavior: Misperceptions of Feedback in a Dynamic Decision Making Experiment// *Management Science*. – 1989. – No. 35 (3). - P. 321-339.
97. Swinehart K.D., Blackstone J.H. Simulating a JIT/kanban production system using GEMS// *Technical article, Simulation Councils, Inc.* – 1991. - P. 262-269.
98. TC² home page: Apparel merchandising and manufacturing training

- aids/ Internets. - http://www.tc2.com/products/training_aids.html#1
99. Tomii N., Sakaguchi T. A universal train traffic simulation model and its applications to train scheduling systems// Proceedings of the 11th European Simulation Multiconference. – Istanbul: 1997. – P. 633-639.
 100. Uzņēmējdarbības loģistikas terminu angļu-latviešu vārdnīca./ N. Sprancmanis, J. Merkurjevs, I. Matisone u.c. – Rīga: Apgāds Zvaigzne ABC, 2007. – 168 lpp.
 101. Vaidyanathan B.S., Miller D.M., Park Y.H. Application of discrete event simulation in production scheduling// Proceedings of the Winter Simulation Conference (WSC'98). – Washington: Vol. 2, 1998. – P. 965-971.
 102. Van Landeghem H., Vanmaele H. Robust planning: a new paradigm for demand chain planning// Journal of Operations Management. – 2002. – No. 20. - P. 69-783.
 103. Wikner J., Toqill D.R., Naim M. Smoothing Supply Chain Dynamics// International Journal of Production Economics. – 1991. - No 22 (3). – P. 231-248.
 104. Williams J.F. Heuristic techniques for simultaneous scheduling of production and distribution in multi-echelon structures: theory and empirical comparisons// Management Science. – 1981. – No. 27(3). – 336-352 p.
 105. Zhang C, Tan G.W., Robb D.J. et al. Sharing shipping quantity information in the supply chain// Omega: International Journal of Management Science. – 2006. – No. 34 (5). – P. 427-438.
 106. Zhang C., Zhang C. Design and simulation of demand information sharing in a supply chain// Simulation Modelling Practice and Theory.– 2007.– Volume 15, No.1.– P. 32-46.
 107. Гаджинский А. М. Логистика: Учебник для высших и средних специальных учебных заведений. – Москва: Информационно-внедренческий центр „Маркетинг”, 3-е изд., перераб. и доп., 2000. – 375 с.
 108. Лопатников Л. И. Экономико-математический словарь: Словарь современной экономической науки. – Москва: Дело, 5-е изд., перераб. и доп. 2003. – 520 с.