

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

**Oļesja Večerinska**

**IMITĀCIJAS MODELĒŠANĀ BĀZĒTĀ PIEGĀDES ĶĒŽU  
PLĀNOŠANAS METOŽU OPTIMALITĀTES ANALĪZE  
NENOTEIKTĪBAS APSTĀKĻOS**

**Promocijas darba kopsavilkums**

**Rīga 2012**

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE  
Datorzinātnes un informācijas tehnoloģijas fakultāte  
Informācijas tehnoloģijas institūts

**Oļesja VEČERINSKA**

Doktora studiju programmas “Vadības informācijas  
tehnoloģija” doktorante

**IMITĀCIJAS MODELĒŠANĀ BĀZĒTĀ PIEGĀDES ĶĒŽU  
PLĀNOŠANAS METOŽU OPTIMALITĀTES ANALĪZE  
NENOTEIKTĪBAS APSTĀKĻOS**

**Promocijas darba kopsavilkums**

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

**RTU Izdevniecība  
Rīga 2012**

UDK 004.94(043.2)

Ve 072 i

Večerinska, O. Imitācijas modelēšanā bāzētā piegādes ķēžu plānošanas metožu optimalitātes analīze nenoteiktības apstākļos. Promocijas darba kopsavilkums.-R.: RTU, 2012.-36.lpp.

Iespiests saskaņā ar Informācijas tehnoloģijas institūta 2012.gada 10.aprīļa Padomes sēdes lēmumu, protokols Nr.12-03.



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

ISBN 978-9934-10-385-8

PROMOCIJAS DARBS  
IZVIRZĪTS RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ  
INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2012.g. 28.decembrī plkst.14<sup>30</sup> Rīgas Tehniskās universitātes Datorzinātnes un informācijas tehnoloģijas fakultātē, Meža ielā 1/3, 202. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Dr.habil.sc.ing., profesors Leonīds Novickis  
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Dr.habil.sc.ing., profesors Jevgeņijs Kopitovs  
Transporta un sakaru institūts, Latvija

Ph.D., asist. profesors Francesco Longo  
Kalabrijas universitāte, Itālija

APSTIPRINĀJUMS

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

Oļesja Večerinska.....(Paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 5 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 1 pielikums, 43 attēlus un 20 tabulas, kopā 143 lappuses. Literatūras sarakstā ir 113 avoti.

## VISPĀRĒJS DARBA RAKSTUROJUMS

### *Tēmas aktualitāte*

Promocijas darba tēmas aktualitāte ir saistīta ar izvirzītajām Eiropas Savienības 6. un 7. ietvara programmu prioritātēm piegādes ķēžu vadības jomā, tādām kā resursos bāzētu pieeju aizvietošana ar zināšanās bāzētām pieejām un Eiropas kompāniju integrācija globālajos piegādes un sadales tīklos, ar mērķi efektīvāk apkalpot reģionālos tirgus un nākotnē pie zemākām izmaksām sasniegt optimālos ražošanas un loģistikas procesus [29, 30]. Gan Eiropas Savienības, gan pasaules mērogā ekonomikas ātras globalizācijas apstākļos arvien nozīmīgāk ir iedziļināties globālo piegādes ķēžu vadības jautājumos. Turklāt ir svarīgi koncentrēties uz procesu optimalitātes ievērošanu katrā piegādes ķēdes posmā. Kā vienu no risinājumiem izvirzīto prasību panākšanā var minēt efektīvu dažāda veida procesu plānošanu.

Sarežģīto sistēmu, tajā skaitā piegādes ķēžu, plānošanā tradicionāli tiek izmantotas cikliskas un necikliskas plānošanas metodes, tomēr piedāvāto metožu pielietošanas noteikumi un optimalitāte netiek padziļināti pētīti daudzveidīgu piegādes ķēdēs produkta dzīves cikla ietvaros nenoteiktības apstākļos. Imitācijas modelēšanas tehnika piedāvā jaunas iespējas šīs problēmas risināšanai, kas nav piedāvātas zinātniskajā literatūrā. Apkopojot iepriekš minēto tēmas aktualitāti, ir noteiktas nepieciešamās imitācijas modelēšanā bāzētās piegādes ķēžu plānošanas metožu optimalitātes novērtēšanas darbības:

- sarežģītu sistēmu plānošanas procesu pilnveidošana produkta dzīves cikla ietvaros nenoteiktības apstākļos;
- mūsdienīgu plānošanas metožu padziļināta analīze un izvēle, to optimalitātes ieviešana un izpēte;
- imitācijas modelēšanas izmantošanas analīze daudzveidīgu piegādes ķēžu plānošanas uzdevumos.

### *Darba mērķis un uzdevumi*

Darba mērķis ir izstrādāt imitācijas modelēšanā bāzētu daudzveidīgu piegādes ķēžu plānošanas metožu optimalitātes novērtēšanas procedūru nenoteiktības apstākļos. Promocijas darba mērķa sasniegšanai ir izvirzīti šādi uzdevumi:

1. Izanalizēt plānošanas pieeju un metožu izmantošanu piegādes ķēdēs pie nenoteiktības apstākļiem.
2. Izpētīt optimalitātes intervāla būtību piegādes ķēžu plānošanas un vadības uzdevumos.
3. Izanalizēt vispārīgas un imitācijas modelēšanā bāzētas alternatīvu salīdzināšanas metodes.
4. Izstrādāt imitācijas modelēšanā bāzētu piegādes ķēžu plānošanas procedūru un pārslēgšanas algoritmu produkta dzīves cikla ietvaros.

5. Izanalizēt ieejas datu modelēšanas metodes, risinot piegādes ķēžu plānošanas uzdevumus, kā arī noteikt faktorus, kas ietekmē plānošanas mehānismu optimalitāti.
6. Veikt darbā piedāvātās procedūras aprobāciju daudzešelonu piegādes ķēžu plānošanas uzdevumos.

### ***Pētījuma objekts un priekšmets***

Darba pētījuma objekts ir daudzešelonu piegādes ķēžu plānošanas metodes un mehānismi, kas tiek izmantoti stohastiskā vidē ar patērētāju nedeterminētu pieprasījumu kā nenoteiktības pamatfaktoru.

Darba pētījuma priekšmets ir imitācijas modelēšanā bāzētas plānošanas mehānismu salīdzināšanas metodes un optimalitātes novērtēšanas iespējas.

### ***Pētījuma metodes***

Šajā darbā teorētiskie pētījumi pamatojas uz pieejamajos literatūras avotos izanalizētajām piegādes ķēžu plānošanas mehānismu iespējām un to salīdzināšanas metodēm. Teorētiskie rezultāti ir iegūti, izmantojot krājumu vadības, matemātiskās statistikas un varbūtību teorijas metodes. Praktisko pētījumu veikšanai ir izmantotas piegādes ķēžu cikliskās un necikliskās plānošanas metodes un diskrētu notikumu sistēmu imitācijas modelēšana.

### ***Promocijas darba zinātniskais jaunieguvums***

Izstrādātā promocijas darba zinātniskie jaunieguvumi ir šādi:

1. Izstrādāta optimalitātes novērtēšanas procedūra, kas paredzēta daudzešelonu piegādes ķēžu plānošanas metožu efektivitātes analīzei stohastiskā vidē. Pētījuma pamatā tiek izanalizēts optimalitātes intervāla izmantošanas uzdevums informācijas tehnoloģijas un piegādes ķēžu vadības sfērās.
2. Izstrādāts imitācijas modelēšanā bāzēto piegādes ķēžu plānošanas metožu pārslēgšanas algoritms, kas pamatojas uz to salīdzināšanu. Tas tika aprobēts reālā piegādes ķēdes plānošanas uzdevumā un ļauj elastīgi pārslēgties no viena plānošanas mehānisma izmantošanas uz citu produkta dzīves cikla ietvaros.
3. Balstoties uz optimalitātes novērtēšanas procedūras rezultātiem, tiek ģenerēti produkcijas likumi, kas nosaka piemērotāko plānošanas mehānismu.

Izpētot un atrisinot darba gaitā sastaptās nepilnības, līdztekus pamata jaunieguvumam ir sasniegti šādi zinātniskie rezultāti:

1. Tika izpētītas stohastiskā pieprasījuma modelēšanas metodes darbam ar lielu pieprasījuma mainīguma diapazonu.
2. Tika izanalizētas imitācijas modelēšanā bāzētas alternatīvu statistiskās salīdzināšanas metodes, kas pamatojas uz ticamības intervālu izmantošanu.
3. Imitācijas modelēšanas eksperimentu īstenošanai un produkcijas likumu

izveidošanai optimalitātes novērtēšanas procedūra tiek papildināta ar piegādes ķēdes izpildes kritēriju ietekmējošo faktoru jutīguma analīzi.

### ***Darba praktiskā nozīmība***

Darba ietvaros ir izstrādāta imitācijas modelēšanā bāzēta daudzvešelonu piegādes ķēžu plānošanas metožu optimalitātes novērtēšanas procedūra, kas atbalsta piegādes ķēžu pārslēgšanas starp plānošanas mehānismiem punkta noteikšanas algoritmu. Algoritma realizācija ļauj pilnveidot piegādes ķēžu plānošanas procesu.

Izstrādātā procedūra tiek pielietota komercdarbības gadījuma izpētē ar mērķi noteikt pārejas punktu starp plānošanas metodēm produkta dzīves cikla brieduma fāzes iestāšanās brīdī.

### ***Darba rezultātu aprobācija***

Par promocijas darba galvenajiem rezultātiem ir nolasīti referāti 8 starptautiskajās zinātniskajās konferencēs:

1. Starptautiskā konference “*12th International Conference on Computer Modelling and Simulation*” (UKsim’2010). Kembridžā, Lielbritānijā, 2010.g. 24.-26. martā.
2. Starptautiskā konference “*1st International conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation*” (ISMS’2010). Liverpūlē, Lielbritānijā, 2010.g. 27.-29. janvārī.
3. Rīgas Tehniskās universitātes 50. starptautiskā zinātniskā konference, apakšsekcija “*Informācijas Tehnoloģija un Vadības Zinātne*”. Rīgā, Latvijā, 2009.g. 12.-16. oktobrī.
4. Starptautiskā konference “*7th WSEAS International Conference on System Science and Simulation in Engineering*” (ICOSSSE’2008). Venēcijā, Itālijā, 2008.g. 21.-23. novembrī.
5. Rīgas Tehniskās universitātes 49. starptautiskā zinātniskā konference, apakšsekcija “*Informācijas Tehnoloģija un Vadības Zinātne*”. Rīgā, Latvijā, 2008.g. 13.-15. oktobrī.
6. Starptautiskā konference “*10th International Conference on Computer Modelling and Simulation*” (EUROSIM/UKsim’2008). Kembridžā, Lielbritānijā, 2008.g. 1.-3. aprīlī.
7. Rīgas Tehniskās universitātes 48. starptautiskā zinātniskā konference, apakšsekcija “*Informācijas Tehnoloģija un Vadības Zinātne*”. Rīgā, Latvijā, 2007.g. 11.-13. oktobrī.
8. Starptautiskā konference “*6th International Conference on Production Engineering*” (PE’2008). Vroclavā, Polijā, 2006.g. 7.-8. decembrī.

Pētījumu rezultāti ir atspoguļoti 8 zinātniskajās publikācijās starptautiskos Latvijas Zinātnes padomes atzītos zinātniskajos izdevumos:

1. Merkuryeva, G., Večerinska, O. Simulation-based Comparison: An Overview and Case Study// The 12th International Conference on

- Computer Modelling and Simulation (UKsim'2010). – Los Alamitos: IEEE Conference Publication Service, March 24-26, 2010. – p.186-190 (*IEEE CS Digital Library, Scopus, Compendex*).
2. Merkuryeva, G., Vecherinska, O. Randomness modelling in supply chain simulation// The 1st International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation (ISMS'2010). – Los Alamitos: IEEE Conference Publication Service, January 27-29, 2010. – p.128-133 (*IEEE CS Digital Library, Scopus, Compendex*).
  3. Merkuryeva, G., Vecherinska, O., Hatem, J. Statistical input data analysis for supply chain simulation// RTU 50<sup>th</sup> International Scientific Conference. – Riga: Publishing House of RTU, October 12-16, 2009. – p.33-38 (*EBSCO, CSA/ProQuest, VINITI RAN*).
  4. Merkuryeva, G., Napalkova, L., Vecherinska, O. Simulation-Based Analysis and Optimisation of Planning Policies over the Product Life Cycle within the Entire Supply Chain// The 13th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing. – Oxford: “IFAC Publishers”, June 3-5, 2009. – p.580-585 (*IFAC-Papers On Line*).
  5. Merkuryeva, G., Vecherinska, O. Development of Simulation- Based Switching Algorithm for Inventory Management in Multi-Echelon Supply Chain// The 7th WSEAS International Conference on System Science and Simulation in Engineering. – Venice: WSEAS Press, November 21-23, 2008.–p.399-404.
  6. Merkuryeva, G., Vecherinska, O. Simulation-Based Approach for Comparison of (s, Q) and (R, S) Replenishment Policies Utilization Efficiency in Multi-echelon Supply Chains// The 10th International Conference on Computer Modelling and Simulation (EUROSIM/UKSim'2008). – Cambridge: IEEE Computer Society, April 1-3, 2008. – p.434-440 (*Scopus, Compendex, CS Digital Library*).
  7. Merkuryeva, G., Vecherinska, O. Simulation-based Analysis of Optimality Gap Between Replenishment Policies In Supply Chains// RTU 48<sup>th</sup> International Scientific Conference. – Riga: Publishing House of RTU, October 11-13, 2007. – p.41-49 (*EBSCO, CSA/ProQuest, VINITI RAN*).
  8. Merkuryeva, G., Timmermans, S., Vecherinska, O. Evaluating the ‘Optimality Gap’ between Cyclic and Non-cyclic Planning Policies in Supply Chains// The 6th International Conference on Production Engineering (PE'2006). – Wroclaw: Publishing House of Wroclaw University of Technology, December 7-8, 2006. – p.155-162 (*CiteSeerX*).

Promocijas darba rezultāti ir izstrādāti šādu projektu ietvaros:

- 1) Eiropas Savienības 6. ietvara programmas projekts *Specific targeted research project NMP2-CT-2006-032378 ECLIPS „Extended Collaborative Integrated Life Cycle Supply Chain Planning System”*.

RTU koordinators un vadītājs: Dr.habil.sc.ing., Prof. J. Merkurjevs.  
Izpildes termiņš: 2006. – 2009.g.

- 2) Latvijas Zinātnes Padomes zinātniskais grants “*Imitācijas modelēšanā bāzēta optimizācija, pielietojot skaitļošanas intelektu*”. Projekta vadītājs: Dr.habil.sc.ing., Prof. J. Merkurjevs. Izpildes termiņš: 2009. – 2012.g.

Promocijas darba ietvaros izstrādātās procedūras un algoritma zinātnisko nozīmību apliecina sertifikāts, kuru izsniedza konsultējošā kompānija MÖBIUS Ltd. par dalību uzdevuma „Piegādes ķēdes parametru bāzēta pārslēgšanas metodoloģija” risināšanā projekta ECLIPS ietvaros. Šī projekta ietvaros promocijas darba autore uzstājās ar referātiem 10 semināros Rīgā, Ģentē, Parīzē un Brno, kā arī ir līdzautore 3 ECLIPS projekta darba rezultātu atskaites materiāliem.

### ***Promocijas darba struktūra***

Promocijas darbs satur ievadu, 5 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 1 pielikums, 43 attēlus un 20 tabulas. Promocijas darba pamatteksts ir izklāstīts uz 143 lappusēm. Literatūras sarakstā ir 113 avoti. Promocijas darba struktūra ir šāda:

***Ievadā*** ir pamatota veikto pētījumu aktualitāte, formulēts darba mērķis un uzdevumi, uzskaitītas promocijas darba izstrādē lietotās pētnieciskās metodes, aprakstīta pētījumu zinātniskā novitāte un iegūto rezultātu praktiskā nozīmība, kā arī ir izklāstīta darba rezultātu aprobācija.

***Pirmajā nodaļā “Piegādes ķēdes plānošanas procesa analīze nenoteiktības apstākļos”*** tiek apskatīts plānošanas uzdevums piegādes ķēdes vadības kontekstā, ievērojot nenoteiktības aspektu. Tai skaitā ir izanalizēti plānošanas procesi un to modeļi. Tiek piedāvāts ieskats sarežģītu sistēmu plānošanas metodēs, kā arī imitācijas modelēšanā bāzētās plānošanas iespējās. Tika formulēts plānošanas metožu analīzes uzdevums produkta dzīves cikla kontekstā ar iespēju veikt pārslēgšanos starp atsevišķām plānošanas alternatīvām.

***Otrajā nodaļā “Optimalitātes analīze piegādes ķēdes plānošanā”*** ir izanalizēts optimalitātes intervāla jēdziens un aprakstīta tā būtība, kā rezultātā optimalitātes intervāla jēdziens tiek ieviests risināmā uzdevuma kontekstā. Definētās problēmas ietvaros tiek piedāvāts ietekmējošo faktoru nozīmīgāko efektu raksturojums. Ir piedāvāta optimalitātes novērtēšanas pieeja, kas nodrošina plānošanas mehānismu imitācijas modelēšanu daudzveidīgu piegādes ķēdei. Tika izanalizētas imitācijas modelēšanā bāzētas alternatīvu salīdzināšanas metodes, papildinot tās ar gadījuma izpēti statistisko salīdzināšanas metožu izmantošanā plānošanas uzdevumā.

***Trešajā nodaļā “Divposmu piegādes ķēdes plānošanas procedūras izstrāde”*** tiek aprakstīta imitācijas modelēšanā bāzēta procedūra optimalitātes intervāla analīzei starp cikliskās un necikliskās plānošanas metodēm, kas apvieno

vairākus posmus. Piedāvātās procedūras ietvaros tiek realizēts pārslēgšanas algoritms, kura pamatā ir ticamības intervāla analīze. Bez tam, tiek piedāvāta ieejas datu analīze un tās pielietošanas iespējas imitācijas modelēšanas kontekstā, kuras mērķis ir izvēlēties piemērotāko pieeju normāli sadalīta pieprasījuma modelēšanai.

*Ceturtajā nodaļā “Jūtīguma analīzes algoritms uzdevuma kontekstā”* ir apskatīta jutīguma analīzes būtība un vispārīgā tehnoloģija uz kā pamata šī pētījuma kontekstā tika formulēta jutīguma analīzes problēma. Turklāt optimalitātes intervāla analīzes procedūra tiek paplašināta ar jutīguma analīzes posmu. Imitācijas modelēšanā bāzēta jutīguma analīzes ieviešana ļauj noteikt iespējamās ietekmējošo faktoru vērtības, pie kurām jāizanalizē iespēja veikt plānošanas alternatīvu maiņu. Tas nodrošina pārslēgšanas kārtulas izveidošanu.

*Piektajā nodaļā “Izstrādātās procedūras aprobācija daudzēšelonu piegādes ķēdes modelim”* izstrādātā procedūra ar algoritmu tiek aprobēta piegādes ķēžu plānošanas problēmas risināšanā. Šim nolūkam tiek veiktas trīs ešelonu un biznesa gadījuma izpētes, kurām par pamatu ir ķīmiskās ražošanas uzņēmuma piegādes ķēde. Šeit tiek izanalizēts procedūras darbības rezultāts, kā arī tās pilnveidošanas iespējas.

***Promocijas darba rezultāti un secinājumi***

***Literatūras saraksts***

***Pielikumi***

## PROMOCIJAS DARBA NODAĻU ĪSS IZKLĀSTS

### *Pirmā nodaļa. Piegādes ķēdes plānošanas procesa analīze nenoteiktības apstākļos*

Pirmā nodaļa ir veltīta promocijas darba tēmas pārskatam, kā arī pētāmo pamatproblēmu analīzei. Šeit uzsvars tiek likts uz plānošanas uzdevumu risināšanu piegādes ķēžu vadībā. Ievērojot nenoteiktības aspektu, tiek piedāvāts ieskats plānošanas un vadības sistēmu attīstībā, kā arī imitācijas modelēšanā bāzētas plānošanas iespējās. Ir sniegts plānošanas pieeju un metožu apskats produkta dzīves cikla ietvaros un formulēta šī pētījuma uzdevuma nostādne.

Piegādes ķēde tiek raksturota kā sarežģīta sistēma, kurai piemīt sarežģītu sistēmu četras īpašības: *integritāte, dalāmība, relācijas* starp elementiem un to *organizācija*. Izmaiņas jebkurā no piegādes ķēdes posmiem ietekmē visu ķēdi un var iespaidot materiālu un gala produktu krājumus, kā arī piegādes ķēžu kopējās izmaksas un servisa līmeni. Piegādes ķēdes sarežģītību pamatā ietekmē tajā iekļauto ešelonu skaits, elementu skaits katrā ešelonā, materiālu un informācijas plūsmu struktūra, kā arī pētījumos minētie integrācijas līmenis un informācijas pieejamība un pārvaldība [4,12,19]. Jebkura veida piegādes ķēdes pamatmērķis ir veidot uzņēmumam piemērotu elastīgo vidi ar iespēju reaģēt uz pārmaiņām patērētāju prasībās. Par to atbild piegādes ķēžu vadība ar vienu no apakšvirzieniem - *piegādes ķēžu plānošana*. Plānošanas procesu un to lēmumus piegādes ķēdēs var sadalīt pēc:

- plānošanas horizonta ilguma - operatīvā, taktiskā un stratēģiskā plānošana;
- investīciju ienesīguma;
- plāna ieviešanas sarežģītības;
- plānošanas problēmas funkcionālajām pazīmēm - materiālu, ražošanas, sadales un pārdošanas plānošana;
- sadarbības plānošanas veidiem - vertikālā un horizontālā vadības koordinācija;
- plānošanas procesu virziena – augšup un lejup straumes plānošana.

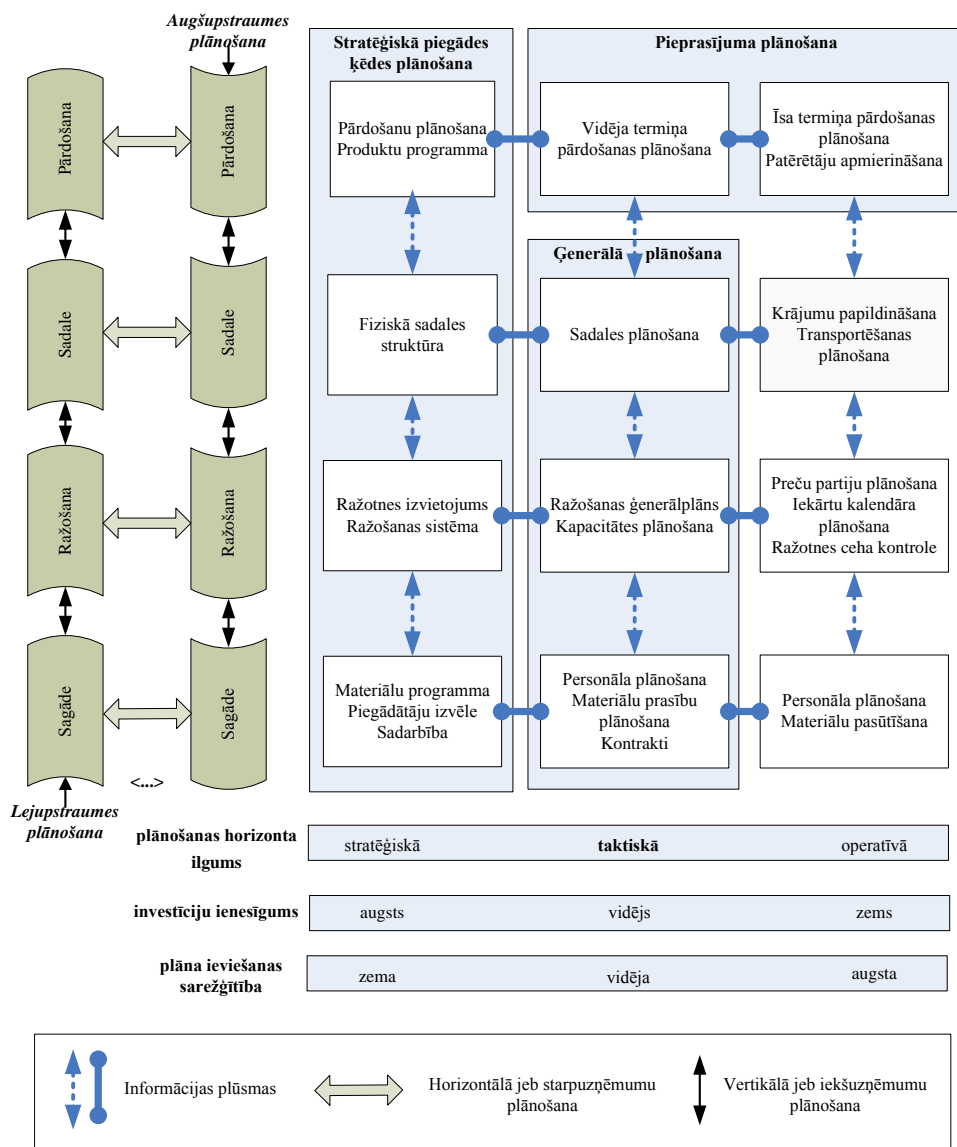
1. attēlā piegādes ķēdes pamatposmiem, t.i., sagādei, ražošanai, sadalei un pārdošanai, tiek pakārtoti tiem raksturīgie plānošanas procesi, kam ir piedāvāts sadalījums arī pēc iepriekš minētajām īpatnībām. Šī pētījuma ietvaros netiek ievēroti stratēģiskās plānošanas aspekti, uzsvars tiek likts uz taktisko plānošanu un to pārvaldību.

Piegādes ķēdē pastāvošie plānošanas procesi prasa zināmu pieeju izstrādi un pielietošanu ar mērķi atvieglot un pilnveidot plānošanas procesu konkrētās piegādes ķēdes ietvaros. Pētījumi šajā virzienā balstās uz noteiktu modeļu izveidošanu un to analīzi, pielietojot piemērotās metodes, t.i.:

- *Analītiskie izpildes modeļi* skar dinamiskās un stohastiskās vides un parasti tiek demonstrēti ar Markova ķēdēm, Petri tīkliem vai rindu

modeļiem.

- *Imitācijas modeļi* nodrošina komplekso dinamisko un stohastisko procesu analīzi.
- *Optimizācijas modeļi* pārsvarā ir determinēti, t.s., jauktās veselo skaitļu programmēšanas uzdevumi un optimizācijas algoritmi, izmantojot skaitļošanas intelektu un metaheiristikas.



### 1. att. Plānošanas procesi piegādes ķēdē

Piegādes ķēde ir dinamiska sistēma, kuras procesu pastāvīgas izmaiņas ietekmē ne tikai visas piegādes ķēdes darbību kopumu, bet arī tās plānošanu un pilnveidošanu. *Pie nenoteiktības avotiem* attiecināmi visa veida nedeterminētie ierobežojumi, izmaiņas un svārstības gan piegādes ķēdes iekšējos, gan ārējos procesos. Ražošanas un krājumu vadības sistēmu pētījumos tiek analizēti dažādi nenoteiktības avoti, t.sk., pieprasījums, piegādes un ražošanas laiki, procesu kvalitāte un peļņa [20]. Savukārt, arvien ātrāk notiek izmaiņas ražošanas tehnoloģijās tirgū, kā rezultātā plānošanas process norisinās, analizējot mazāk

informācijas un pakļaujoties lielākām soda izmaksām [10]. Papildus tam tiek pētīts procesu nenoteiktais izpildes laiks, kas rodas ražotņu dīkstāvju bojājumu un produkcijas brāķa ietekmes dēļ [31].

Ja piegādes ķēdi raksturo kā liela mēroga sistēmu ar hierarhisku lēmumu struktūru, dažādu ieejas datu un operāciju nejaušību, kā arī mijiedarbības dinamisko dabu starp piegādes ķēdes elementiem, tad attiecīgi lēmumu pieņemšanai tajā ir nepieciešams izstrādāt modelēšanas metodoloģiju, kas dotu iespēju identificēt un ievest jauninājumus vadības stratēģijās un projektēt piegādes ķēdes ar augstāko veiktspēju [21].

Analītisko modeļu izmantošana, salīdzinājumā ar imitācijas modeļiem, var būt vai nu apgrūtināta, vai arī pavisam neiespējama daudzešelonu piegādes ķēžu problēmu, sarežģītu sistēmu un liela mēroga rindošanas modeļu risināšanai. Parasti analītiskās metodes piegādes ķēdēs tiek izmantotas dinamisku un determinētu pieprasījumu analīzei, savukārt, imitācijas modelēšana nodrošina testa vidi analītiskiem risinājumiem un ļauj modelēt un optimizēt plānošanas lēmumus pie mainīga pieprasījuma un nenoteiktības nosacījumiem. Imitācijas modelēšanas tehnoloģijai arī ir zināmas priekšrocības:

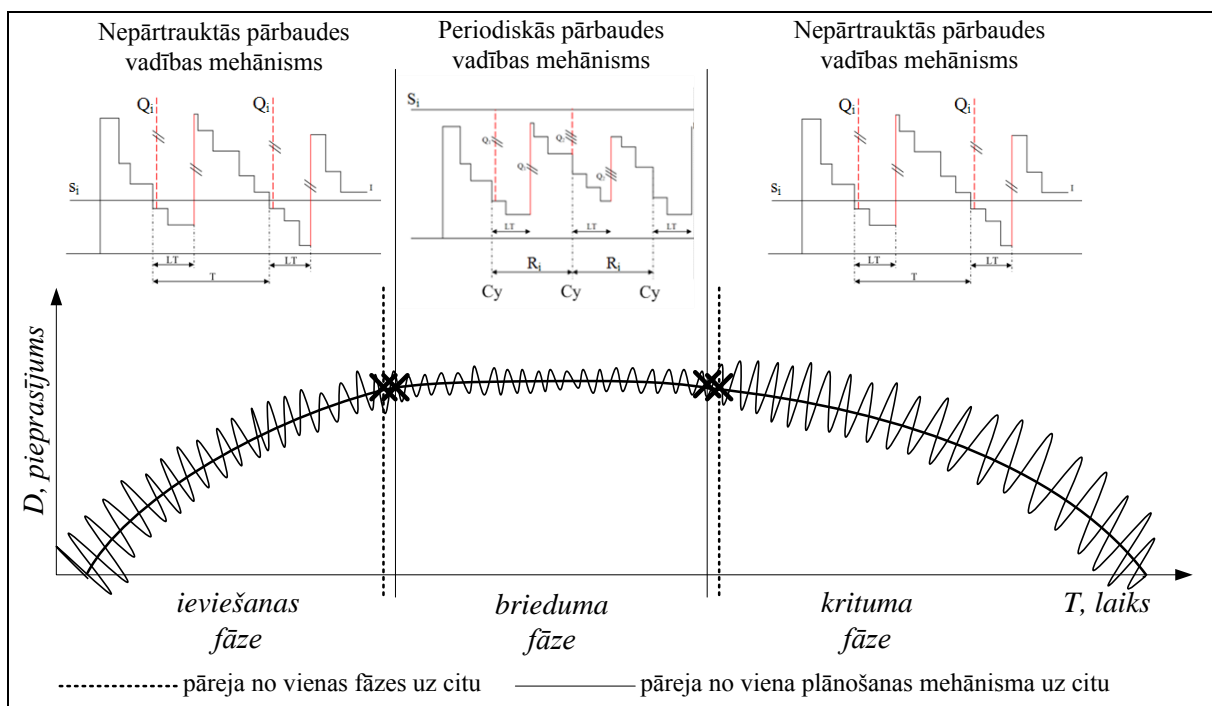
- 1) imitācijas modelēšanas un optimizācijas iespējas piegādes ķēdēm ar stohastiskajiem elementiem,
- 2) alternatīvu sistēmu salīdzināšanas iespēja, ar mērķi noteikt prasībām piemērotāko variantu,
- 3) sistēmas darbības uzlabošanas iespējas ar sistēmas funkciju mijiedarbības analīzi.

Piegādes ķēžu imitācijas modelēšanas jomā var izdalīt četras dažādas pieejas [14] piegādes ķēžu analīzei: sistēmas dinamika; izklājlapu imitācijas modelēšana; dinamisku sistēmu diskrētu notikumu imitācijas modelēšana un lietišķās imitējošās spēles. Daudzu pētījumu ietvaros ir pierādīts [1, 16], ka diskrētu notikumu imitācijas modelēšana ir efektīvākais rīks darbam ar sarežģītām stohastiskām sistēmām. Imitācijas modelēšanu apvieno ar izklājlapu izmantošanu, lai definētu piegādes ķēdes imitācijas modeļa struktūru un tā parametru vērtības.

Promocijas darbā imitācijas modelēšana tika izmantota piegādes ķēžu plānošanas metožu analīzei un salīdzinājumam krājumu vadības mehānismu kontekstā un produkta dzīves cikla ietvaros. Produkta dzīves cikla ietvaros noteiktos laika brīžus, kad iestājas pārejas starp fāzēm, saucim par pārslēgšanas punktiem. Pieprasījuma mainīgums nosaka dzīves cikla atsevišķas fāzes, kā arī pārejas no vienas fāzes uz otru un, atbilstoši, no viena plānošanas mehānisma uz otru (skat. 2.att.). Turklāt, piegādes ķēdēs produkta pieprasījums ir dinamisks un stohastisks, un brieduma fāzē tas ir stabils.

Piegādes ķēžu plānošana atsevišķās produkta dzīves fāzēs balstās uz periodisko un nepārtraukto krājumu papildināšanas mehānismiem, kam piemīt cikliskā un necikliskā uzvedība. Cikliskās plānošanas gadījumā (turpmāk *POR*) (2.att.), kuru izmanto stabilā pieprasījumā, fiksētie pasūtījuma intervālu garumi

tiek ieviesti visām krājumu vienībām, un parametri  $R_i$  – cikla garums un  $S_i$  – maksimālais krājuma līmenis ir noteikti. Savukārt, necikliskajā plānošanā (turpmāk *ROP*) pasūtīšanas intervālu garumi ir apzīmēti kā mainīgie plānošanas horizonta ietvaros un pastāvīgie parametri:  $s_i$  – atkārtots pasūtīšanas punkts un  $Q_i$  – pasūtīšanas daudzums. Pēdējā gadījumā, ievērojot produkta pieprasījuma izmaiņas, tiek aprēķināts noteikts krājumu līmenis, pie kura tiek veikts jauns konstanta lieluma pasūtījums krājumu papildināšanai. Tādā veidā šajā sistēmā pasūtījuma inicializēšanas laiks ir mainīgs. Kad krājuma līmenis sasniedz fiksēto pasūtīšanas punktu ( $s_i$ ), atkārtotas pasūtīšanas process tiek inicializēts. Tas ir veidots fiksētam pasūtījuma apjomam ( $Q_i$ ). *LT* attēlo piegādes laiku pasūtījumam un diagrammā norāda uz laika intervālu, no brīža, kad pasūtījums tiek inicializēts, līdz krājumu līmeņa palielināšanai ar iepriekš pasūtīto apjomu. *T* norāda uz laika periodu starp pasūtījumiem, kura garums šajā sistēmā mainās katrā pasūtīšanas ciklā [27].

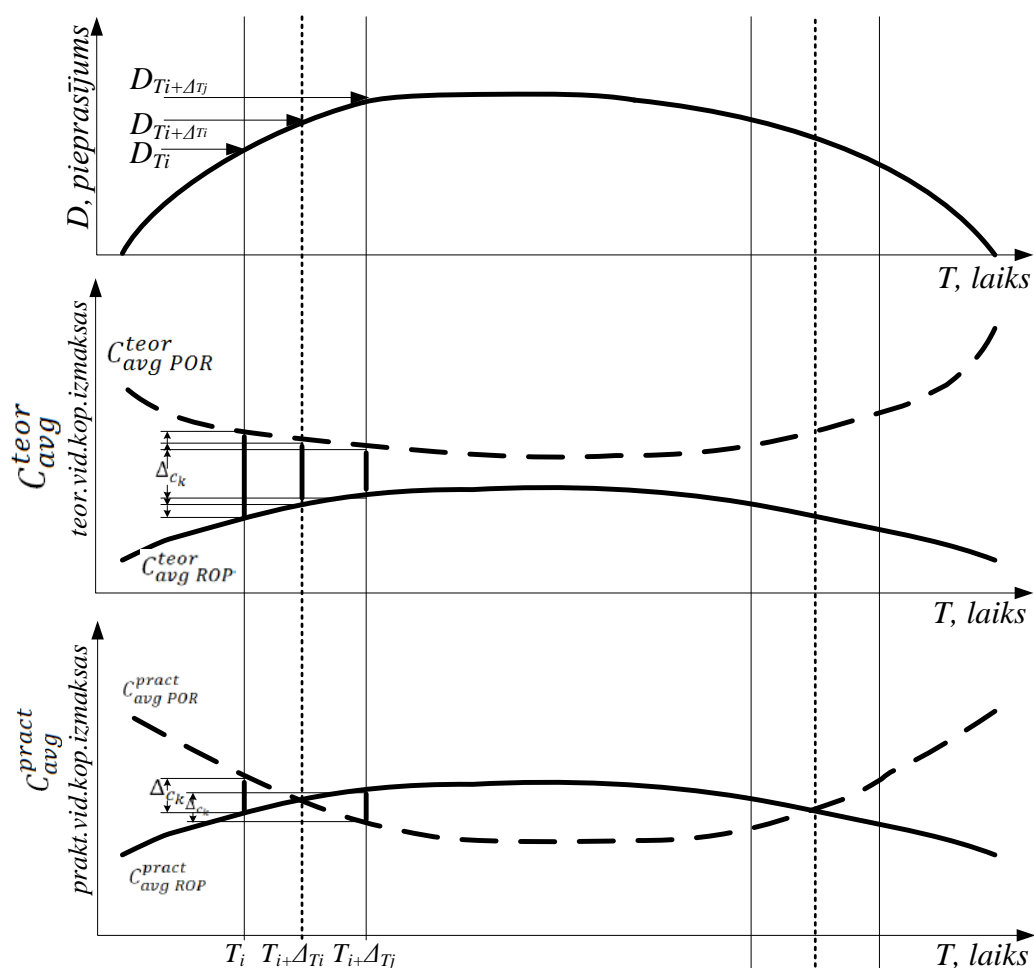


**2. att. Pārslēgšanas procesa iestāšanās moments, ievērojot produkta dzīves ciklu**

Piegādes ķēdes plānošanas procesā cikliskajam vai necikliskajam plānam tiek pakļauti visas ķēdes posmi gan ražošanas, gan glabāšanas. Cikliskās plānošanas metodes var definēt kā neciklisko metožu apakškopu, kas teorētiski netiek uzskatīta par optimālu, jo tās kopējās izmaksas ir lielākas par necikliskā plāna kopējām izmaksām. Bet cikliskajai metodei var dot priekšroku, jo necikliskās metodes ar to sarežģītāku realizāciju ir mazāk efektīvākas praksē. 3. attēlā ir parādīta iespējamā izmaksu izmaiņu dinamika, ievērojot produkta pieprasījumu, kur ar taisnām līnijām tiek atspoguļotas necikliskās izmaksas, bet ar svītrainām - cikliskās. Plānojot cikliski, uzsvars tiek likts uz ilgtermiņa ieguvumiem, kas ir sasniedzami pie nelielām pieprasījuma svārstībām, un ko

iedarbība var pārsniegt glabāšanas un iestatīšanas izmaksu minimizēšanas ietekmi, papildus mazinot materiālu apstrādes un iestatīšanas izmaksas un laiku, plānošanas un vadības izmaksas, starposmu buferu krājumus, detalizētas plānošanas sarežģītību [7].

Izvērtējot visus šajā nodaļā analizējamos aspektus: piegādes ķēdes kā sarežģītas sistēmas, pārvaldības tendence, daudzšelonu piegādes ķēžu skaita palielināšanās, dažādu nenoteiktības avotu esamība, produktu dzīves cikla ievērošana un plānošanas metožu īpatnības, ir noteikti nepieciešams izveidot optimālā plānošanas mehānisma izvēles procedūru. Uzdevumā ir jānosaka pārslēgšanas moments, kad daudzšelonu piegādes ķēdes neciklisko plānošanu var aizvietot cikliskā. Tas nozīmē, ka izstrādātās procedūras ietvaros tiek pārbaudīta iespēja izmantot ciklisko plānošanu daudzšelonu piegādes ķēdē.



**3. att. Izmaksu izmaiņu dinamika atkarībā no produkta dzīves cikla un tā pieprasījuma**

Nodaļas galvenie secinājumi ir šādi:

- piegādes ķēdes plānošanas procesa sarežģītības pieaugums, ievērojot produkta dzīves ciklu, liecina par nepieciešamību pilnveidot plānošanas procedūru;
- imitācijas modelis ar tā spēju darboties ar stohastiskajiem elementiem

nodrošina visaptverošu pārskatu par piegādes ķēdi uz piegādes ķēdi un spēj atspoguļot tās svarīgākos aspektus, it īpaši strādājot ar daudziem ešeloniem;

- pārslēgšanās process starp atsevišķām plānošanas metodēm nav pietiekami analizēts un algoritmizēts, tāpēc nepieciešams piedāvāt noteiktu mehānismu plānošanas metožu pārslēgšanas brīža novērtēšanai.

### ***Otrā nodaļa. Optimalitātes analīze piegādes ķēdes plānošanā***

Otrajā nodaļā ir izanalizēts optimalitātes intervāla jēdziens un aprakstīta tā būtība, kā rezultātā optimalitātes intervāla jēdziens tiek ieviests risināmā uzdevuma kontekstā. Optimalitātes intervāla (*optimality gap*) jēdziens pārsvarā ir sastopams optimizācijas uzdevumos (skat. 4a att.). Jauktajā veselo skaitļu programmēšanā tas apzīmē starpību starp labāko zināmo risinājumu un labāko iespējamo risinājumu sliktāko robežu un definē ar absolūto vai relatīvo vērtību [26]. Optimizācijas uzdevumos, piemēram, izlases vidējā aproksimācijas metodē, optimalitātes intervālu izmanto kā *optimālā risinājuma atrašanas algoritma apstāšanās kritēriju* [15, 25]. Lineāras programmēšanas uzdevumos šo jēdzienu izmanto *modeļu jutīguma analīzē*, aprēķinot tādus vienādojuma koeficientu vērtību intervālus, kuru ietvaros koeficientu vērtību izmaiņas neietekmē atrasto optimālo risinājumu [28]. Optimalitātes intervālu arī pielieto modeļu *validācijā*, lai novērtētu risinājuma kvalitāti un pierādītu, ka šis risinājums atbilst optimālajam risinājumam.

Promocijas darbā optimalitātes intervāls *ir pētāmo alternatīvu - plānošanas metožu - novērtējumu attiecības rādītājs, kas nosaka salīdzināmo alternatīvu starpību un tās nozīmību* (skat. 4b att.).

Piegādes ķēdēs ciklisko un neciklisko plānošanas metožu salīdzināšanai praksē izmanto [6] cikliskā risinājuma papildus izmaksu kritēriju (angl. *additional costs of cyclic solutions vai ACCS*). *ACCS* definē kā relatīvo attiecību starp kopējām izmaksām *POR* un *ROP* gadījumos, t.i.  $C_{POR}$  un  $C_{ROP}$ :

$$ACCS = \frac{C_{POR} - C_{ROP}}{C_{ROP}} \quad (1)$$

Pēc teorētiskā salīdzinājuma un iepriekšējo pētījumu analīzes *ACCS* pieņem pozitīvās vērtības.

Plānošanas risinājumu salīdzināšanai darbā tiek definēti šādi izpildes kritēriji:

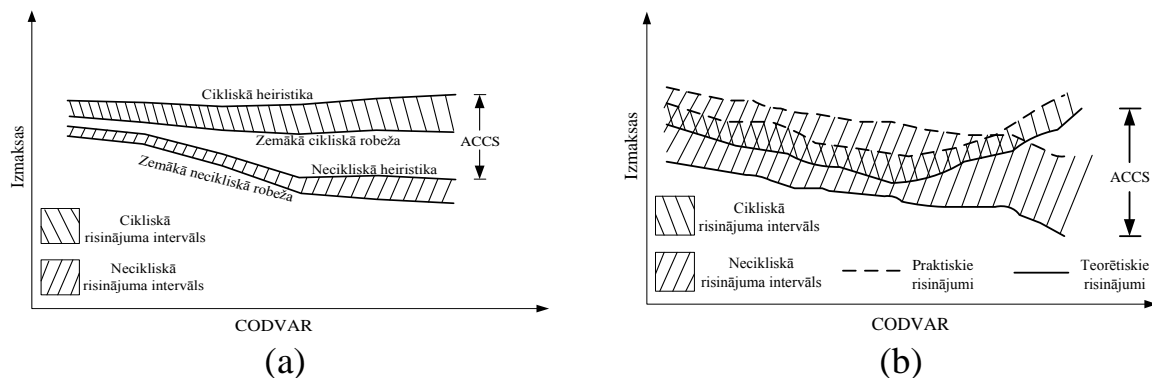
- *ACCS* parametra vidējā vērtība un ticamības intervāls;
- Cikliskā un necikliskā risinājumu kopējo izmaksu vidējās vērtības un dispersijas;
- Starpības starp risinājumu izmaksām ticamības intervāls.

Imitācijas modelēšanas eksperimenti pierāda pieprasījuma variācijas koeficienta (*CODVAR*) kritisko nozīmīgumu un tā ietekmi uz cikliskās kalendārās plānošanas papildus izmaksu lielumu [23]. Tas ir definēts kā

produkta  $i$  pieprasījuma standarta novirzes  $s_i$  attiecība pret tā vidējo pieprasījumu  $\bar{x}_i$  parasti izteikta procentos:

$$CODVAR_i \% = \frac{s_i}{\bar{x}_i} * 100\% \quad (2)$$

Jo vairāk svārstās pieprasījums, jo lielāks ir pieprasījuma variācijas koeficients, kas izpaužas necikliskās plānošanas priekšrocībā – lielāka elastība plānošanā, salīdzinot ar ciklisko plānošanu.



4. att. Optimalitātes intervāla interpretācija optimizācijas uzdevumos (a) un plānošanas alternatīvu salīdzināšanā (b)

Promocijas darbā tika izanalizēta faktoru nozīmīgo efektu kopa, kas ietekmē optimalitātes intervāla robežas, t.sk. kapacitāšu noslodze ( $CAP$ ), plānošanas periodu un ešelonu skaits, iestatīšanas un pasūtījuma izpildīšanas laiks un dažāda veida izmaksas. 1. tabulā ir piedāvāts detalizēts praktisko pētījumu apkopojums [5, 6, 7, 8], kas raksturo dažādu faktoru un to mijiedarbības nozīmīgus efektus.

1. tabula

Faktoru nozīmīgo efektu raksturojums

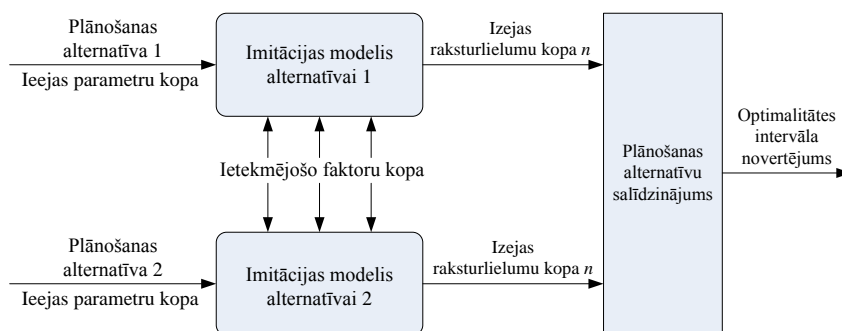
Ietekme	Faktori	Efektu raksturojums
Vienfaktora ietekme	$CODVAR$	$ACCS$ pieaug, ja necikliskā risinājuma izmaksas samazinās un $CODVAR$ palielinās.
	$CAP$	Lielāka noslodze noved pie lielākas $ACCS$ vērtības. Efekts ir mazs, salīdzinot ar $CODVAR$ ietekmi uz $ACCS$ vērtību.
Mijiedarbības ietekme	$CODVAR$ un $CAP$	$CAP$ palielināšanās stiprina $CODVAR$ ietekmi uz $ACCS$ . Abu faktoru mijiedarbība sarežģī tuvākā robežrisinājuma iegūšanu.
	Iestatīšanas laiks un $CAP$	Īsākie iestatīšanas laiki dod efektu līdzīgo kā pie lielākajām $CAP$ vērtībām, turklāt iestatīšanas laiku efekts palielinās palielinoties $CAP$ .
	$CODVAR$ un laiks starp pasūtījumiem	Lielāks pasūtījumu intervāls pie mazākām $CODVAR$ vērtībām pazemina $ACCS$ vērtību.
Daudzfaktoru ietekme	Pasūtīšanas un glabāšanas izmaksas un $CODVAR$	Pasūtīšanas un glabāšanas izmaksu apvienotā ietekme kļūst nozīmīgāka pie $CODVAR$ palielināšanās, kā rezultātā - $ACCS$ vērtība palielinās.

Analizējot iepriekš veiktos pētījumus, tiek konstatēts, ka bieži vien

piegādes ķēdēs plānošanas metožu salīdzinājums un izvēle tika veikta viena ešelona ietvaros, pamatā, plānojot ražošanas procesus ar dažāda veida heuristikām.

Plānošanas metožu efektivitātes noteikšanas tehnikas darba ietvaros tika grupētas četrās pamata pieejas: teorētiskā pārbaude, salīdzinot risinājumu izmaksas; optimalitātes novērtēšana no sarežģītības perspektīvas; eksperta vērtējumi; optimalitātes novērtēšana ar imitācijas modelēšanas eksperimentiem. Teorētiskajā pārbaudē [3, 7, 9, 23, 24] tiek ievērots esošo vidējo izmaksu zemākās robežas novērtējums ar mērķi noteikt labāko risinājumu. No sarežģītības perspektīvas novērtē risinājumu iterāciju skaitu vai skaitļošanas laiku [2, 22, 23]. Risinājumu salīdzināšanai papildus izmanto ekspertu slēdzienus [23, 24]. Savukārt, imitācijas modelēšanas eksperimenti ļauj pieprasījuma mainīguma un citiem nenoteiktības apstākļiem, kas ir cieši saistīti ar daudzēšelonu piegādes ķēdes dinamiku un tās stohastisko uzvedību, novērtēt plānošanas alternatīvas un izvēlēties ieviešanai piemērotāko. Turklāt, ir iespēja eksperimentāli veikt nozīmīgo faktoru jutīguma analīzi noteiktā parametru diapazonā, kas veicina optimalitātes intervāla izpēti.

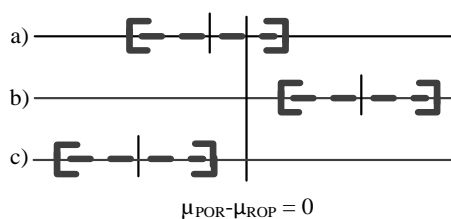
Darbā optimalitātes novērtēšanas pieeja balstās uz piegādes ķēdes imitācijas modelēšanu, izmantojot alternatīvas plānošanas metodes (skat. 5.att.), ar mērķi iegūt noteiktu izejas raksturlielumu novērtējumus pie dažādiem ieejas parametriem un faktoriem. Turklāt, plānošanas alternatīvu salīdzināšanas posms tiek izdalīts kā nozīmīgākais un optimalitātes intervāla novērtējumu izšķirošais posms.




### 5. att. Imitācijas modelēšanā bāzēta optimalitātes intervāla novērtēšana

Promocijas darbā tika izanalizētas imitācijas modelēšanā bāzētas alternatīvu salīdzināšanas metodes, t.i., vienkāršā salīdzinošā analīze, grafiskais salīdzinājums un statistiskā salīdzināšana [18]. Pie nenoteiktības apstākļiem izmanto statistiskās salīdzināšanas metodes, kur izdala *hipotēzes testus un ticamības intervālus*. Abu pieeju apvienošana veido objektīvu modeļu izejas raksturlielumu salīdzinājumu. Turklāt, starpību starp salīdzināmo raksturlielumu vidējām vērtībām novērtē ar ticamības intervālu un pārbauda alternatīvas statistiskās hipotēzes par vidējo vērtību starpības nozīmīgumu. Piemēram, ja iegūtais ticamības intervāls ietver nulli, tad pie definēta nozīmības līmeņa nav

būtiskas atšķirības starp analizējamo izejas raksturlielumu vidējām vērtībām (6a.att.).



 apzīmē noteiktu ticamības intervālu  $(\bar{x}_{POR} - \bar{x}_{ROP}) \pm hw$

## 6. att. Ticamības intervāla pozīcijas attiecībā pret nulli

Turklāt, ticamības intervāls un tā kvantitatīvās robežas raksturo modelēšanas rezultātu nenoteiktību. Svarīgi ir iegūt pēc iespējas mazāku intervālu ar lielu ticamību, kas garantēs lietderīgāku modeļu salīdzināšanu. Ticamības intervāla garumu pie uzdota nozīmības līmeņa nosaka modeļa novērojumu skaits un izejas datu dispersija. Lai samazinātu ticamības intervālu, imitācijas modelēšanā izmanto dispersijas mazināšanas metodes[16].

Divu salīdzināmo sistēmu imitācijas modelēšanai izmanto divas statistiskās tehnikas [13]: neatkarīgo izlasi un korelēto izlasi, kuru arī sauc par kopīgajiem gadījumskaitļiem. Pēdējā gadījumā vienu gadījumskaitļu virkni izmanto abu sistēmu imitācijas modelēšanai vienā replikācijā. Bieži vien praksē tas samazina novērtējamās starpības variāciju un, pie uzdotā izlases lieluma, nodrošina precīzāko starpības lieluma novērtējumu.

Divu alternatīvu statistiskās salīdzināšanas metodes, kas balstās uz ticamības intervāla, t.i., *Velča* un *pāru-t* ticamības intervālu, izmantošanu, prasa modeļu izejas datu neatkarīgumu starp alternatīvu izlasēm un normālo sadalījumu katras izlases ietvaros. Izmantojot *pāru-t* metodi, analizējamām izlasēm nav jābūt neatkarīgām, ir atbalstāma kopīgo gadījumskaitļu izmantošana, bet abu alternatīvu izlašu lielumiem jābūt vienādiem. Savukārt, *Velča* metode ļauj strādāt ar dažāda lieluma izlasēm, pie nosacījuma, ka nepastāv korelācijas starp plānošanas alternatīvu izejas datiem. Šīm metodēm atšķiras brīvības pakāpju skaits un to izskaitļošanas process.

Plānošanas alternatīvu salīdzināšanas uzdevumā ticamības intervāls starp to vidējām kopējām izmaksām pie noteikta nozīmības līmeņa  $\alpha$  tiek definēts šādā veidā:

$$P[(\bar{x}_{POR} - \bar{x}_{ROP}) - hw \leq \mu_{POR} - \mu_{ROP} \leq (\bar{x}_{POR} - \bar{x}_{ROP}) + hw] = 1 - \alpha, \quad (3)$$

kur  $(\mu_{POR} - \mu_{ROP})$  - starpība starp alternatīvu kopējo izmaksu matemātisko cerību vērtībām;  $(\bar{x}_{POR} - \bar{x}_{ROP})$  - starpība starp alternatīvu kopējo izmaksu vidējām vērtībām;  $hw$  - ticamības intervāla pus garums.

Šajā gadījumā, *pāru-t* ticamības intervāla pus garums  $hw$  tiek izskaitļots pēc formulas (4):

$$hw = \frac{t_{(n-1, \alpha/2)} * S_{(POR-ROP)}}{\sqrt{n}}, \quad (4)$$

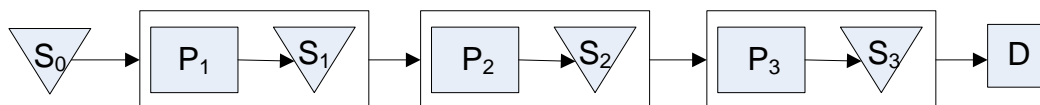
kur  $S_{(POR-ROP)}$  - kopējo izmaksu vidējo vērtību starpības standartnovirzes  $\sigma_{(POR-ROP)}$  novērtējums;  $n$  - replikāciju skaits;  $t_{(n-1, \alpha/2)}$  - Stjudenta kritērija tabulētā vērtība pie nozīmības līmeņa  $\alpha/2$  un brīvības pakāpes  $n-1$ .

Savukārt, *Velča* ticamības intervāla pus garums  $hw$  tiek izskaitļots pēc formulas (5):

$$hw = t_{df, \alpha/2} \sqrt{\frac{S_{POR}^2}{N_{POR}} + \frac{S_{ROP}^2}{N_{ROP}}}, \quad (5)$$

kur  $df$  - brīvības pakāpju skaits,  $N_{POR}$  un  $N_{ROP}$  - replikāciju skaits, modelējot salīdzināmās POR un ROP plānošanas alternatīvas un  $S_{POR}^2$  un  $S_{ROP}^2$  - attiecīgas izlašu dispersijas.

Lai izpētītu statistiskās salīdzināšanas metožu izmantošanu plānošanas alternatīvu analīzes uzdevumā, tika veikta gadījuma izpēte, modelējot trīs-ešelonu piegādes ķēdi ar cikliskās un necikliskās plānošanas metodēm (7.att.).



**7. att. Modelējamās piegādes ķēdes struktūra**

Pieprasījuma variācijas koeficients  $CODVAR = 30\%$ . Izpildes kritērijs ir perioda vidējās kopējās izmaksas. Katrai alternatīvai tika veiktas 20 imitācijas modeļa replikācijas. Nozīmības līmenis tiek definēts  $\alpha=0,05$ . Tika izanalizētas *pāru-t* ticamības intervāla metode, *Velča* ticamības intervāla metode pie vienādiem un nevienādiem izlašu lielumiem, kā arī *t*-tests divu neatkarīgo izlašu vidējo vērtību salīdzināšanai. Vidējo relatīvo standartkļūdu iegūtās vērtības  $s_{\bar{x}\%_{POR}} = 0,18\%$  un  $s_{\bar{x}\%_{ROP}} = 0,35\%$  liecina par piemērotu analizējamo datu precizitāti. *T-testa* faktiskā un kritiskā vērtības attiecīgi ir  $t_{fakt} = 17.41$  un  $t_{krit} = 2.05$ . Tā kā  $t_{fakt} > t_{krit}$ , tad ir secināts, ka atšķirība starp plānošanas alternatīvu izmaksu vidējām vērtībām ir būtiska. Tāds pats secinājums tika pieņemts, izmantojot ticamības intervāla metodes, kas balstās uz hipotēzes testēšanu un analizējamo alternatīvu izmaksu starpības ticamības intervālu novērtējumu. Turklāt, pie vienādiem izlašu lielumiem, *pāru-t* ticamības intervāla garums ir mazāks (2. tabula).

Ticamības intervālu metodes ir lietderīgas piegādes ķēdes plānošanas metožu izpildes kritēriju novērtēšanai un salīdzināšanai, izmantojot imitācijas modelēšanu. To izvēle tiek būtiski ierobežota, ja imitācijas modelēšanas laikā izmanto kopīgos gadījumskaitļus un alternatīvu izlašu garumi ir vienādi.

### Gadījuma izpētes skaitliskie novērtējumi

Statistiskās salīdzināšanas metode	Ticamības intervāla pusgarums $hw$	$\mu_{(POR-ROP)} \in [\underline{\mu}, \bar{\mu}]$
Pāru-t ticamības intervāla metode	1255	[10083;12593]
Velča ticamības intervāla metode <i>Pie vienādiem izlašu lielumiem</i>	1332	[10006;12670]
Velča ticamības intervāla metode <i>Pie nevienādiem izlašu lielumiem</i>		
Eksperiments 1	1380	[10069;12829]
Eksperiments 2	1197	[10192;12585]

Galvenie secinājumi ir šādi:

- ACCS kritērijs ir piemērots starpības starp ciklisko un neciklisko risinājumu izmaksu novērtēšanai. Šī starpība ir definēta kā optimalitātes intervāls;
- ievērojot salīdzināmo alternatīvu parametru un ārējo faktoru ietekmi uz izpildes kritēriju starpību un balstoties uz faktoru un parametru vērtību izmaiņām, ir iespējams izvēlēties plānošanas metodi, kā lēmuma pieņemšanas izšķirošo posmu;
- imitācijas modelēšana nodrošina iespēju pieņemt lēmumu par alternatīvo plānošanas metožu izvēli, balstoties uz hipotēžu testēšanu, ņemot par pamatu ticamības intervālu izskaitļošanas bāzi. *Pāru-t* ticamības intervāla metode tiek uzskatīta par piemērotāko šajā problēmvidē.

#### ***Trešā nodaļa. Divposmu piegādes ķēdes plānošanas procedūras izstrāde***

Šīs nodaļas pamatā tiek aprakstīta procedūra optimalitātes intervāla analīzei starp cikliskās un necikliskās plānošanas alternatīvām. Izstrādātajā procedūrā ir atdalāmi šādi posmi:

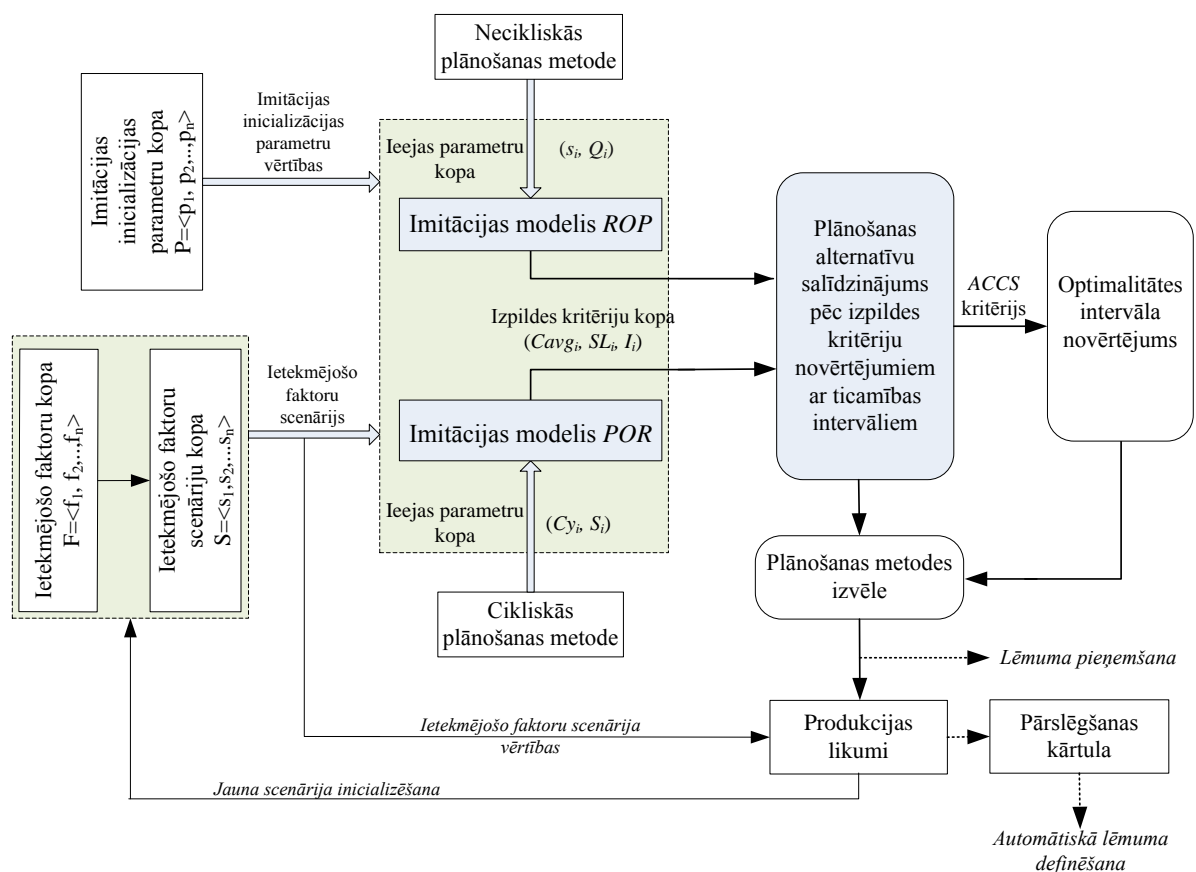
- plānošanas alternatīvu, t.i., ciklisko un neciklisko plānu, parametru un ārējo faktoru *pirmsimitācijas skaitliskā analīze*;
- piegādes ķēžu ar alternatīviem plāniem *imitācijas modelēšana*;
- imitācijas modeļu iegūto *izpildes kritēriju analīze*;
- *lēmuma pieņemšana* par efektīvās alternatīvas izmantošanu;
- *produkcijas likumu* (angl. *production rules*) *izveidošana* plānošanas lēmumu atbalstam.

Pirmsimitācijas posmā imitācijas inicializācijas un modeļu ietekmējošo faktoru un ieejas parametru vērtības tika definētas, izmantojot analītiski-skaitlisko pieeju. Ciklisko un neciklisko alternatīvu parametri tiek aprēķināti pēc formulām, kur pie vēlamā cikla servisa līmeņa ir noteikti nepieciešamie drošības krājumi. Imitācijas modelēšanas iesildīšanas posma garums un replikāciju skaits tiek ievēroti modeļu precizitātes regulēšanai un darbam ar ticamības intervāliem.

Imitācijas modelēšana tiek izmantota kā eksperimentāls paņēmiens plānošanas alternatīvu salīdzināšanas uzdevumā. Paralēli tiek iedarbināti cikliskās un necikliskās plānošanas modeļi, kuriem pie izejas tiek iegūti iepriekšdefinētie izpildes kritēriji.

Pēc imitācijas tiek veikta modelēšanas rezultātu salīdzinoša analīze. ACCS kritērija novērtējumi liecina par alternatīvo plānu praktisko efektivitāti un vēlamo pārslēgšanu no viena plāna uz otru. Analīzei šajā posmā pakļaujas arī plānošanas mehānismu krājumu vērtības un sasniegtais servisa līmenis. Rezultātā lēmums par labāko plānošanas alternatīvu ir pieņemts.

Produkcijas likumus definē ar mērķi pārvaldīt produkta dzīves cikla plānošanas procesus, balstoties uz piegādes ķēdes ietekmējošo faktoru vērtībām. Faktoru analizējamās vērtību kopas tiek apvienotas scenārijos. Iegūto produkcijas likumu kopa veido pārslēgšanas kārtulu, kas ļauj automātiski izvēlēties piemērotu plānošanas alternatīvu iepriekš izveidotajos scenārijos.

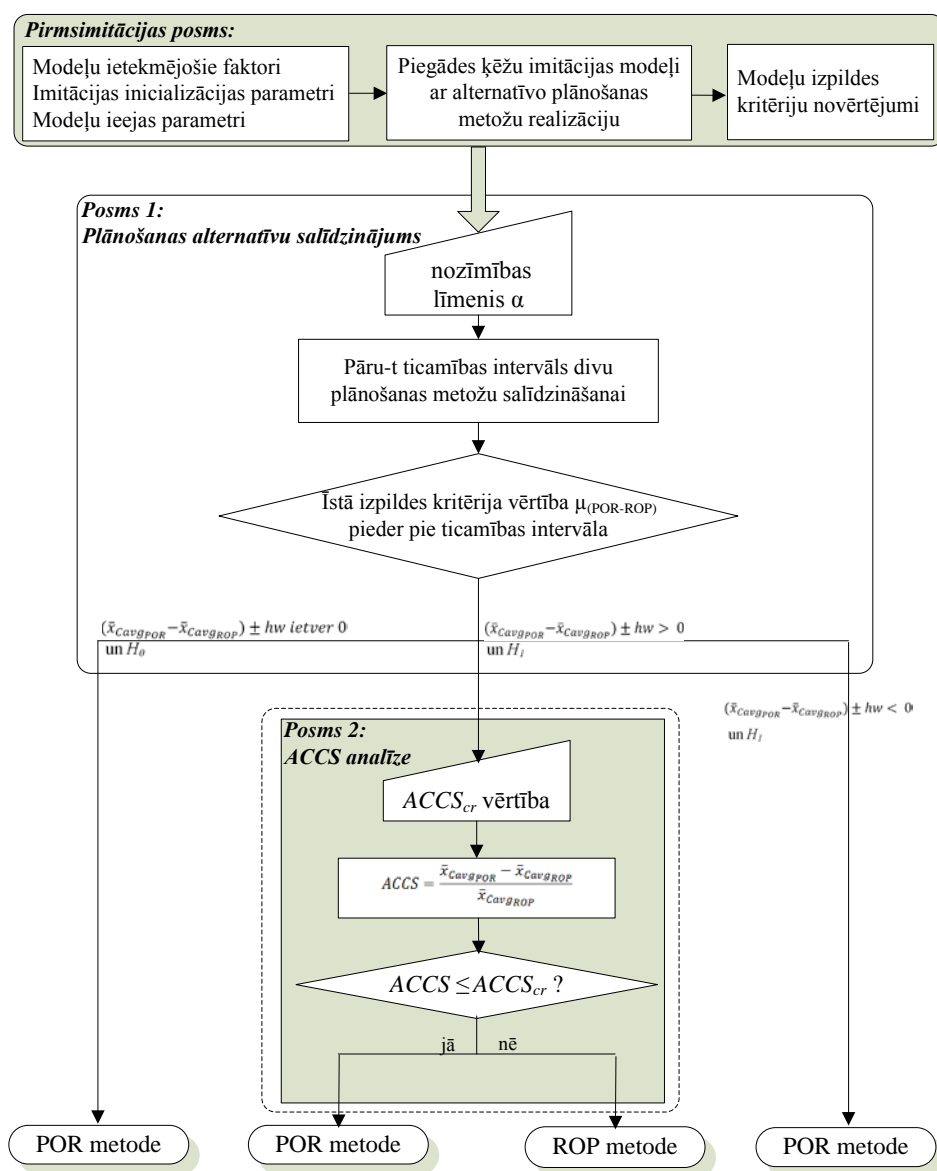


## 8. att. Imitācijas modelēšanā bāzēta optimalitātes intervāla analīzes procedūra

Pētījuma optimalitātes intervāla analīzes procedūra (8. att.) paredz: (1) imitācijas inicializācijas parametru un modeļu ieejas parametru kopu definēšanu; (2) ietekmējošo faktoru scenāriju kopas definēšanu; (3) alternatīvo modeļu imitācijas modelēšanu pie noteiktām parametru un faktoru vērtībām; (4) izpildes kritēriju salīdzinošu analīzi ar ticamības intervāla metodi; (5) ACCS

kritērija vērtības un to izmaiņu analīzi; (6) rekomendējamās plānošanas metodes izvēli; (7) pārslēgšanas kārtulas definēšanu un pilnveidošanu.

Turklāt, imitācijas modeļu izpildes kritēriju salīdzinošā analīze un plānošanas metodes izvēle tiek realizēta pēc tā sauktā pārslēgšanas algoritma (9. att.). Pretstatā punkta novērtējumam, *pāru-t* ticamības intervāls ir izmantots alternatīvu plānu izpildes kritēriju matemātisko cerību starpības novērtējumam. Analizējot *pāru-t* ticamības intervālu, tiek pieņemta vai noraidīta iepriekš izvirzītā hipotēze par to, ka atšķirība starp plānošanas alternatīvām nav būtiska. Ja hipotēze netiek noraidīta, tad izvēle ir par labu cikliskajam plānam. Otrādi, ja pie definētā nozīmības līmeņa hipotēze par divu alternatīvu starpību nenozīmīgumu tiek noraidīta, bet ticamības intervāls atrodas uz ass pa labi no nulles (6. att.), tad ACCS analīze, salīdzinot to ar kritisko vērtību  $ACCS_{cr}$ , ļauj izvēlēties piemērotāko alternatīvu. Šeit,  $ACCS_{cr}$  nosaka relatīvo starpību, kura no eksperta viedokļa ir uzskatāma par optimālu. Piemēram, literatūrā tā ir definēta ar  $ACCS_{cr} = 4.7\%$  [7].



9. att. Divposmu pārslēgšanas algoritms

Praksē kopējo nejaušo skaitļu izmantošana un izlašu vidējo relatīvo standartklūdu novērtējums ierobežo iespēju strādāt ar pārmērīgi izkliedētiem modeļu izejas datu kopām [16]. Tad, ja ticamības intervāls ietver nulli, attiecības analīze starp negatīvo un pozitīvo intervāla pusi ir lietderīga. Tā nodrošina lēmumu par cikliskā plāna ieviešanas padziļinātu analīzi, ja nepastāv nozīmīgas atšķirības starp abām alternatīvām. Pieļaujamā vērtība  $hw_{cr}$ , kas nosaka pieņemamo izkliedi no starpības vidējās vērtības, tiek definēta pēc formulas  $hw_{cr} = k * (\bar{x}_{POR-ROP})$ , kur koeficients  $k = 1.05$ . Turpmākai analīzei tiek ieviests kritērijs A:

$$A = \frac{|a_{neg}|}{a_{pos} - a_{neg}} * 100\%, \quad (6)$$

kur  $a_{neg}$  – ticamības intervāla maksimālā negatīvā vērtība,  $a_{pos}$  – ticamības intervāla maksimālā pozitīvā vērtība.

Gadījumā, kad ticamības intervāls ir simetrisks attiecībā pret nulli un atbilstoši  $A = 50\%$ , nepastāv starpība starp ciklisko un neciklisko metodi. Jo mazāka ir iegūtā relatīvā attiecība, jo lielāka intervāla daļa atrodas pozitīvajā apgabalā. Tādā gadījumā varbūtība, ka cikliskā plāna izmaksas ir lielākas par necikliskā plāna izmaksām palielinās.

Optimalitātes intervāla analīzes procedūrā, t.s., ACCS un *pāru-t* ticamības intervāla aprēķinos, tiek pieņemts, ka patērētāju pieprasījums ir normāli sadalīts. Turklāt, tiek ievērotas pieprasījuma svārstības no nebūtiskām līdz lēmumu ietekmējošām, kas sadalījuma ģenerēšanas posmā pieļauj pieprasījuma negatīvo vērtību iegūšanu. Tas prasa ieejas datu modelēšanas pieeju un metožu analīzi ar mērķi izvēlēties piemērotāko metodi imitācijas modelēšanas kontekstā nenoteiktības apstākļos. Ieejas datu modelēšanas metožu salīdzinājums atkarībā no imitācijas pētījuma konteksta un ieejas datu pieejamības ir sniegts 3. tabulā.

3. tabula

### Ieejas datu modelēšanas metožu salīdzinājums

Metode	Priekšrocības	Trūkumi
<b>Teorētiskā sadalījuma izvēle</b>	Datu attēlošana kompaktā veidā. Izlases datu nolīdzināšana. Datu ārpusizlases diapazona ģenerēšana.	Teorētiskā sadalījuma nepiemērotība izlases datiem.
<b>Empiriskā sadalījuma veidošana</b>	Izmantošana gadījumā, ja teorētiskie sadalījumi netiek piemēroti ieejas datiem.	Nevienmērīga sadalījuma veidošana mazajām datu izlasēm. Neiespējama datu ģenerēšana ārpus izlases diapazona. Neērta izmantošana lielu datu kopu imitācijā.
<b>Trasēšanas datu izmantošana</b>	Effektivitāte modeļa validācijā.	Tikai vēsturisko īpašību reprezentēšana.
<b>Datu saknēšana</b>	Īpaša piemērotība mazajām datu izlasēm.	Neiespējama datu ģenerēšana ārpus izlases diapazona.
<b>Ekspertu novērtējums</b>	Izmanto pie ieejas datu nepieejamības.	Precizitātes trūkums.

Šajā pētījumā normālais sadalījums tiek izmantots, balstoties uz pieprasījuma vēsturisko datu analīzi. Ja pieprasījuma variācijas koeficients ir pietiekami liels (piem.,  $CODVAR=1$ ), pieprasījuma negatīvo vērtību nejauša

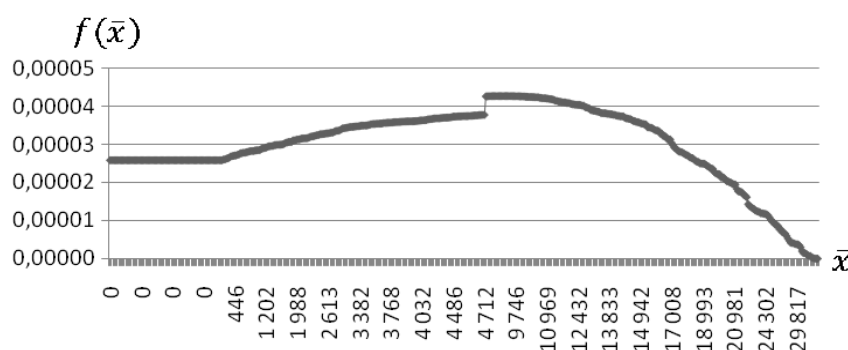
ģenerēšana neļauj korekti izmantot normālo sadalījumu pieprasījuma ģenerācijai imitācijas modelī. Lai šajā pētījumā par pamatu izmantotu normāli sadalīto pieprasījumu, tika izpētītas šādas tehnikas [17], t.i.:

- normāli sadalīta pieprasījuma iteratīvā transformācija,
- normālā nošķeltā sadalījuma ieviešana,
- alternatīvā sadalījuma izmantošana.

Normāli sadalīta pieprasījuma iteratīvā transformācija, kas novērš pieprasījuma negatīvo novērtējumu iegūšanu, tiek veikta pēc formulas (Ms EXCEL vidē):

$$x_i = x_{i-2} + x_{i-2} * \frac{x_{i-2}}{\mu} * (SIGN(x_{i-2} - \bar{x}_{i-2}) * (\frac{CODVAR}{CODVAR_{i-2}} - 1)), \quad (7)$$

kur  $x_i$  un  $\bar{x}_i$  – attiecīgi pieprasījuma transformētā sadalījuma punkta novērtējums un tā vidējā vērtība iterācijā  $i$ ,  $\mu$  – normālā sadalījuma vidējā vērtība pieprasījumam,  $CODVAR$  un  $CODVAR_{i-2}$  – attiecīgi pieprasījuma variācijas koeficients normālajam un iterācijā  $i-2$  transformētajam sadalījumam. Iegūtā iteratīvi transformētā normālā sadalījuma (10. att.) vidējā vērtība un standartnovirze sakrīt ar teorētisko sadalījumu, bet pie  $CODVAR=1$  faktiskā  $\chi^2$  vērtība pārsniedz kritisko vērtību, t.i.  $\chi^2_{de\ facta} > \chi^2_{Crit}$ .



**10. att. Transformētā normālā sadalījuma varbūtības blīvuma funkcija pie  $CODVAR = 1$**

Nošķeltā normālā sadalījuma parametri tiek izskaitļoti *MathCAD v.13* vidē, izmantojot formulas (8) – (10):

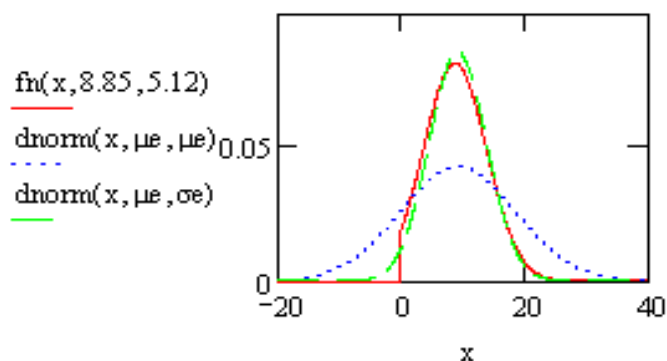
$$\mu_e = \mu + c\sigma \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\mu}{\sigma}\right)^2\right), \quad (8)$$

$$\sigma_e^2 = \sigma^2 - \mu_e(\mu_e - \mu), \quad (9)$$

$$c = \frac{1}{1 - \Phi\left(-\frac{\mu}{\sigma}\right)}, \quad (10)$$

kur  $c$  – normēšanas koeficients;  $\mu$  – izlases vidējā vērtība nošķeltajam normālajam sadalījumam;  $\mu_e$  – izlases vidējā vērtība sākuma normālajam sadalījumam;  $\sigma^2$  – izlases dispersija nošķeltajam normālajam sadalījumam;  $\sigma_e^2$  – izlases dispersija sākuma normālajam sadalījumam. Iegūtā nošķeltā normālā sadalījuma vidējā vērtība un standartnovirze atšķīrās no teorētiskā sadalījuma. Līdz ar to sadalījumu  $CODVAR$  vērtības nav vienādas. Varbūtības blīvuma

funkcijas diviem normālajiem sadalījumiem pie *CODVAR* vienādiem ar 0,5 un 1, un vienam nošķeltajam sadalījumam ir parādīti 11. attēlā. Neiekļauto vērtību laukums pa kreisi no nulles, aug līdz ar normāli sadalītā negatīvā pieprasījuma apgabala palielināšanos, kad *CODVAR* tiecas pie 1 un vairāk. Šādos gadījumos var būt neiespējami atrast parametrus attiecīgajiem nošķeltajiem normālajiem sadalījumiem. Turklāt, nošķelto normālo sadalījumu imitācijas vidē ir nepieciešams konstruēt kā empīrisko sadalījumu. Tas padara ieejas datu modelēšanu ietilpīgu laika un jaudas ziņā.



### 11. att. Normālo sadalījumu ar dažādiem parametriem varbūtības blīvuma funkciju attēlošana

Alternatīva lognormālā sadalījuma [32] parametrus  $\mu_L$  un  $\sigma_L$  pārrēķina, ja parametri  $\mu$  un  $\sigma$  normālajam sadalījumam ir zināmi.

$$\mu_L = e^{\mu + \sigma^2/2}; \quad (11)$$

$$\sigma_L^2 = e^{2\mu + \sigma^2} (e^{\sigma^2} - 1). \quad (12)$$

Savukārt, formulas (13) un (14) ļauj izskaitļot vērtības  $\mu$  un  $\sigma$  normālajam sadalījumam, ja ir zināmi lognormālā sadalījuma parametri  $\mu_L$  un  $\sigma_L$ :

$$\mu = \ln \mu_L - (\sigma^2/2); \quad (13)$$

$$\sigma = \sqrt{\ln(1 + (\sigma_L/\mu_L)^2)}. \quad (14)$$

Lognormālais sadalījums var būt izvēlēts nejaušības modelēšanai piegādes ķēdēs, jo, tāpat kā teorētiskais sadalījums, parasti tiek iebūvēts imitācijas vidēs, apmierina normalitātes nosacījumus un nesatur negatīvu vērtību apgabalus. Tomēr, izmantojot lognormālo sadalījumu un strādājot ar tā parametru nelielajām vērtībām, ir nepieciešams mērogot normālā sadalījuma parametru vērtības un atbilstoši pārrēķināt tās imitācijas modelēšanas gaitā.

Galvenie secinājumi ir šādi:

- piedāvātā optimalitātes intervāla analīzes procedūra ļauj veikt plānošanas alternatīvu analīzi ar mērķi noteikt pārslēgšanas momentu starp tām;
- pārslēgšanas kārtula nodrošina automātisku lēmumu pieņemšanu, vadoties pēc ietekmējošo faktoru izmaiņām;

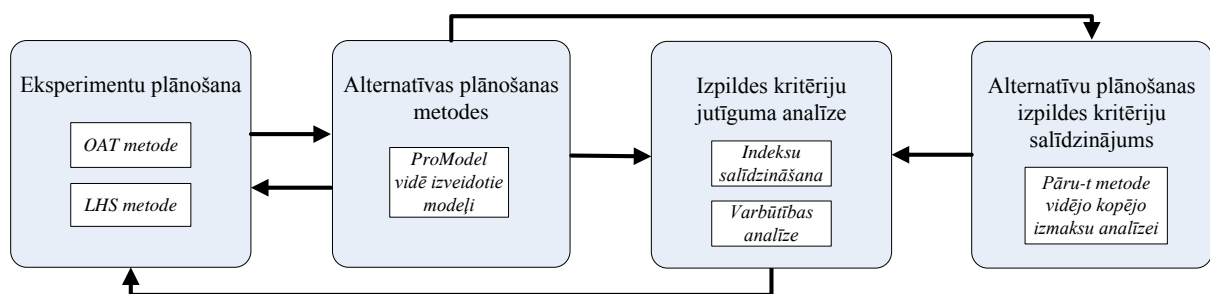
- izpētītā normāli sadalītā pieprasījuma iteratīvā transformācija nodrošina sadalījuma parametru nemainīgumu un ir pieņemta kā iespējami labākais risinājums, apejot pieprasījuma negatīvo vērtību ģenerēšanu.

### Ceturtnā nodaļa. *Jutīguma analīzes algoritms uzdevuma kontekstā*

Piegādes ķēdes vadības procesā produkta dzīves cikla ietvaros par svarīgu kļūst ārējo faktoru izmaiņu raksturs, kas ietekmē turpmāko plānošanas mehānismu vai metožu izvēli. Turklāt, imitācijas modelēšanā bāzēta jutīguma analīzes ieviešana procedūras (8. att.) ietvaros un tās realizācija ļauj noteikt iespējamās ietekmējošo faktoru vērtības, kuras jāiekļauj pārslēgšanas kārtulās un pie kurām jāizanalizē iespēja veikt plānošanas mehānisma maiņu.

Šī pētījuma kontekstā tika noformulēta jutīguma analīzes problēma. Ir jāizvēlas starp divām plānošanas alternatīvām  $A = \langle A_{por}, A_{rop} \rangle$ , ievērojot konkrētās izvēles situācijas un plānošanas alternatīvu īpašības. Vienas vai otras alternatīvas izdevīgumu katrai situācijai ietekmē dažādu faktoru kopums  $F = \langle f_1, f_2, \dots, f_n \rangle$ . Ir pieejami imitācijas modeļi plānošanas mehānismu un risinājumu modelēšanai  $M = \langle M_{por}, M_{rop} \rangle$ . Tas dod iespēju aprēķināt izstrādāto plānu vidējās kopējās izmaksas, kā arī ACCS un citu kritēriju vērtības, kas tiek pieņemtas par imitācijas modeļu izpildes kritērijiem  $K = \langle k_1, k_2, \dots, k_n \rangle$ . Attēlojot šo problēmu ar ieejas-izejas funkciju, iegūstam ieejas datu vektoru  $F = [f_1, f_2, \dots, f_n]$ , kurš noteiktā veidā ietekmē izejas datu vektoru  $K = [k_1, k_2, \dots, k_n] = [k_1(f_1, f_2, \dots, f_n), k_2(f_1, f_2, \dots, f_n), \dots, k_n(f_1, f_2, \dots, f_n)]$ .

Lai veiktu jutīguma analīzi, nepieciešams izvēlēties faktoros un novērtēt sistēmas reakciju uz šo faktoru izmaiņām. Pētot sistēmas, kurām neeksistē analogi, ir iespēja pārbaudīt visus sistēmas ieejas faktoros, lai noteiktu tos, kuru izmaiņas ietekmē izejas raksturlielumu vērtības. Šajā pētījumā tika veikta piegādes ķēdes plānošanas mehānismu izvēles ietekmējošo faktoru analīze, kur analizējamo faktoru kopa tiek veidota no faktoriem, kas bija minēti kā ietekmējošie citu speciālistu pētījumos.



**12. att. Vispārīgā jutīguma analīzes shēma optimalitātes intervāla analīzes procedūrai**

Jutīguma analīzes procesa vieta un sadarbība ar citiem procedūras pamata

blokiem tiek parādīta vispārinātajā shēmā (skat. 12. att.). Eksperimentu plānošanas bloks atbild par eksperimentu plāna izveidi gadījumos, ja nav zināma ietekmējošo faktoru kopa, kā arī optimalitātes intervāla analīzes procedūras realizēšanas posmā. Pie nosacījuma, ka nav zināmi iespējamie izpildes kritēriju ietekmējošie faktori, tiek ieviesta *OAT* (angl. *one-at-time*) metode. *OAT* metodes izmantošana sākotnējai faktoru analīzei dod vajadzīgo priekšstatu par individuālo faktoru ietekmi uz imitācijas modeļa darbu. *OAT* metode tiek pielietota arī optimalitātes intervāla analīzes procedūras ietvaros, kur, mainot katru parametru ar noteikto soli, tiek ģenerēta pārslēgšanas kārtula.

Šīs metodes integrācijas ar jutīguma indeksu izvērtēšanu ļauj novērtēt sistēmas jutīgumu pret maināmajiem faktoriem, savstarpēji salīdzināt faktoru ietekmi, sakārtot faktorus pēc jutīguma indeksa, kā arī izdalīt nebūtisko faktoru kopu. Izmantotais jutīguma indekss ir aprēķināms pēc formulas [11]:

$$SI_f = \frac{K_{fmax} - K_{fmin}}{K_{fmax}}, \quad (15)$$

kur  $K_{fmax}$  un  $K_{fmin}$  ir modeļa izejas raksturlieluma vērtības attiecīgi pie maksimālās un minimālās ieejas faktora vērtībām.

Bez indeksu salīdzināšanas pētījuma ietvaros tiek analizēta arī varbūtības rādītāju izmantošanas iespēja, ievērojot faktoru vērtības. Tas ļauj detalizēti izanalizēt katras kopas atsevišķo eksperimentu pie noteiktiem faktoriem, kas, savukārt, sniedz priekšstatu par to, ar kādu procentuālo novērtējumu lēmums par noteiktas metodes izvēli tika mainīts attiecībā pret lēmumu, kas pieņemts pēc atsevišķas kopas visu eksperimentu analīzes.

Pētījuma ietvaros jutīguma analīzes realizācijai tika aprobēta arī *LHS* (angl. *Latin Hypercube*) metode, posmā, kad tiek novērtēta ietekmējošo faktoru kopa. Tās galvenais iemesls bija vienmēr pastāvošais ierobežojums uz eksperimentēšanas laiku, ko ietekmē eksperimentu skaits. *LHS* metode šajā gadījumā ir piemērota, jo ļauj izdarīt secinājumus par faktoru ietekmi uz sistēmas izejas raksturlielumiem arī pie neliela aplūkojamo ieejas faktoru vērtību skaita. Turklāt, tā nodrošina faktoru ietekmes novērtēšanu visā to iespējamo vērtību intervālā. Salīdzinoši, izmantojot *OAT* metodi, šajā gadījumā ir nepieciešams novērtēt sistēmas izejas raksturlielumu vērtības, veicot modelēšanu pie lielāka skaita faktoru vērtību. Tomēr realizējot darbā izvirzīto mērķi, t.i., optimalitātes intervāla analīzes procedūras izstrādi, pēc *LHS* metodes izmantošanas iegūtos rezultātus ir grūti pielāgot pētāmajai problēmai un interpretēt. Tas rada nepieciešamību atkārtoti izmantot *OAT* metodi.

Balstoties uz jutīguma analīzes problēmas pētījuma rezultātiem, promocijas darbā tika izstrādāts jutīguma analīzes algoritms ar mērķi noteikt ietekmējošo faktoru kopu un scenārijus. Pārslēgšanas lēmuma izmaiņas varbūtības rādītāja izmantošana tiek paredzēta plānošanas alternatīvas izvēles blokā, kad tiek pieņemts lēmums par izmantojamo plānošanas mehānismu pie attiecīgajiem faktoriem. Ja ietekmējošo faktoru kopa ir zināma, jutīguma analīzes blokā ir

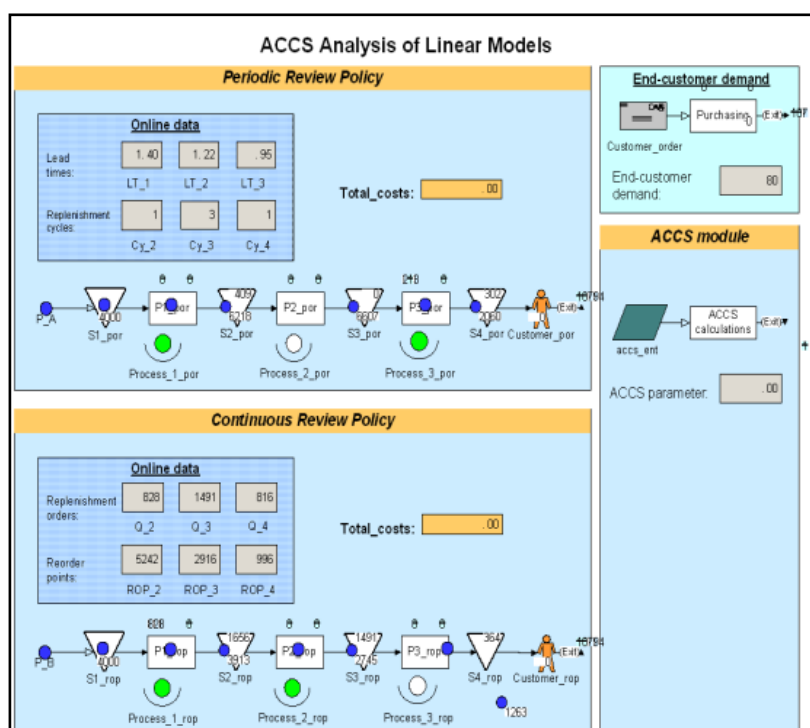
paredzētas manipulācijas ar noteikto faktoru kopu.

Galvenie secinājumi ir šādi:

- jutīguma analīzes posma ieviešana optimalitātes intervāla analīzes procedūras ietvaros ļauj atdalīt plānošanas metodes izvēli ietekmējošo faktoru kopu,
- ietekmējošo faktoru kopas noteikšana un arī eksperimentu plānošanas īstenošana nodrošina pārslēgšanas kārtulas izveidošanu,
- uzstādītajam mērķim vislabāk ir piemērota *OAT* eksperimentu plānošanas metode, kas paredz viena parametra izmaiņas veikšanu.

### ***Piektā nodaļa. Izstrādātās procedūras aprobācija daudzēšelonu piegādes ķēdes modelim***

Izstrādātā procedūra tiek aprobēta trīs ešelonu piegādes ķēdes un ķīmiskās ražošanas uzņēmuma piegādes ķēdes plānošanas uzdevumos, kuros paralēli tiek iedarbināts cikliskais un necikliskais apakšmodelis (skat. 13. att.).



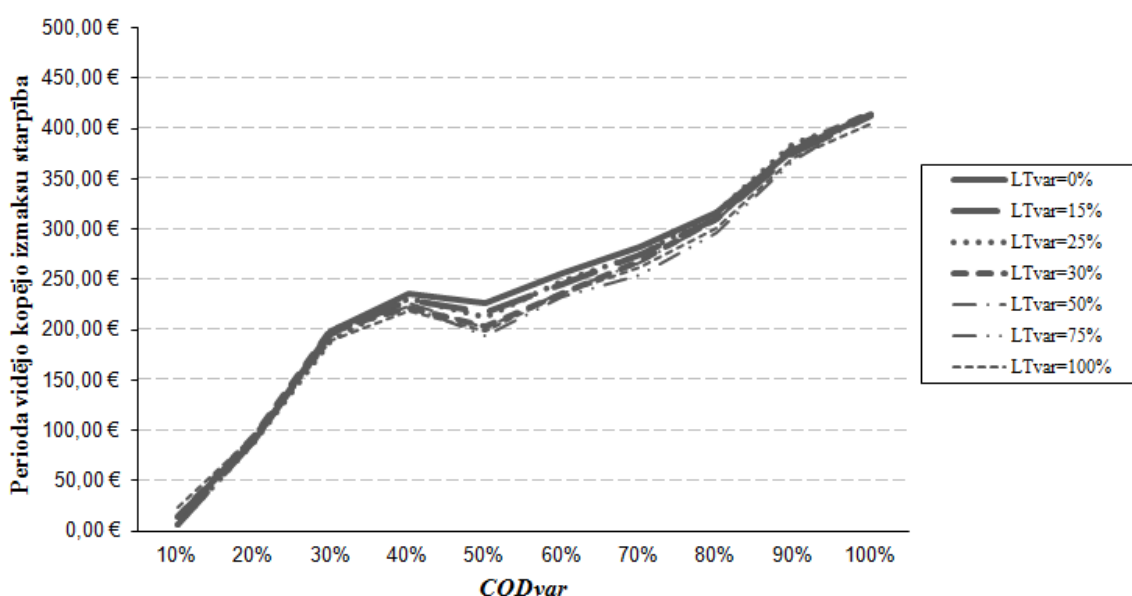
**13. att. Piegādes ķēdes trīs ešelonu imitācijas modelis**

Ar analītiski-skaitlisko metodi tiek noteikti ieejas dati un plānošanas faktoru vērtības, t.i., pieprasījuma vidējā vērtība un tā standartnovirze, pasūtījuma izpildes laiks ar tā standartnovirzi un iestatīšanas, glabāšanas, pasūtīšanas un citas izmaksas, un lēmumu mainīgie cikliskām un necikliskām plānošanas alternatīvām, kas vispirms var būt optimizēti.

Šajā gadījumā ir noteikti divi ietekmīgākie faktori, t.i., pieprasījuma variācijas koeficients (*CODvar*), kam piemīt visnozīmīgākā ietekme, un piegādes

laika variācijas koeficients ( $LTvar$ ). Abi faktori tiek svārstīti diapazonā no 0.1 līdz 1 ar soli 0.1. Kā pamata izpildes kritērijs tiek izvēlēta perioda kopējo vidējo izmaksu vērtība. Papildus vērā ņemami ir vidējais krājumu līmenis periodā un vidējais servisa līmenis.

Procedūras aprobācijai trīs ešelonu piegādes ķēdei tiek pieņemts, ka  $ACCS_{cr}=4.7\%$  un ķīmiskās ražošanas uzņēmumam  $ACCS_{cr}$  vērtība tika pārskatīta un palielināta līdz 8%. Imitācijas modelēšanā iegūtā perioda vidējo kopējo izmaksu vidējā starpības atkarība no uzstādītajiem faktoriem tiek parādīta 14. att. Cikliskais plāns pārspēj neciklisko plānu pēc perioda kopējo vidējo izmaksu vērtībām neatkarīgi no  $CODvar$  vērtības izmaiņām, tomēr perioda kopējo vidējo izmaksu starpības ziņā tā palielinās, palielinoties apskatāmo faktoru vērtībām. Katras plānošanas metodes ietvaros ir saskatāma arī  $LTvar$  faktora pakāpeniska palielināšanās.



**14. att. Perioda vidējo kopējo izmaksu starpības vidējās vērtības, ievērojot uzstādītos faktorus (testa modelis)**

Procedūras darbības rezultātā tiek izveidota rezultātu pārskata tabula (skat. 4. tabulu), kas apkopo tendenci, kā mainās  $ACCS$  novērtēšanas kritērijs, ievērojot ietekmējošo faktoru vērtības. Uz tā pamata tiek veidota pārslēgšanas kārtula ar produkcijas likumiem. Faktoru ietekmes uz izpildes kritēriju analīze dod iespēju arī novērtēt kritērija iepriekš uzstādītās kritiskās vērtības koriģēšanas iespējas. Gadījumā, kad mainās  $LTvar$  vērtība pie fiksētas  $CODvar$  vērtības,  $ACCS$  vērtības izmaiņa ir nenozīmīga, turklāt vislielākā  $ACCS$  vērtība ir novērota pie nemainīgas  $LTvar$  vērtības. Piedāvātajā tabulā ar pelēko krāsu ir iezīmētas faktoru vērtības, kur  $ACCS$  vērtība nepārsniedz iepriekš uzstādīto kritisko vērtību un tiek pieņemts lēmums par labu cikliskā jeb  $POR$  plāna izmantošanai, pretēji, tiek izteikts piedāvājums izmantot neciklisko jeb  $ROP$  plānošanas metodi. Analizējot izstrādātā algoritma darbību uz apskatāmā piemēra, pie  $CODvar = 0.1$  hipotēzi  $H_0$  nevar noraidīt un ir secināts, ka starp

divām plānošanas alternatīvām nepastāv nozīmīgas atšķirības, kas dod priekšroku cikliskā plāna ieviešanai. Pie  $CODvar = 0.2$  hipotēze  $H_0$  tiek noraidīta un pieņemta hipotēze  $H_1$ , no kā tiek secināts, ka starp divām plānošanas alternatīvām pastāv nozīmīga atšķirība, ko skaitliski novērtē ar ACCS kritēriju. Tas pie esošā  $CODvar$  svārstās intervālā  $ACCS \in [2.62\%; 2.82\%]$  ar vidējo vērtību  $ACCS_{vid} = 2.73\%$ , kas nepārsniedz iepriekš uzstādīto kritisko vērtību  $ACCS_{cr} = 4.7\%$ . Uz tā pamata tiek pieņemts lēmums par cikliskā plāna izvēli. Pie lielākajām  $CODvar$  vērtībām arī tiek pieņemta hipotēze  $H_1$  un ACCS vērtību novērtējumi pārsniedz  $ACCS_{cr}$ , tāpēc, sākot ar  $CODvar = 0.3$ , analizējamai piegādes ķēdei ir ieteicams necikliskais plāns.

4. tabula

**Novērtēšanas kritērija ACCS vērtība, ievērojot ietekmējošo faktoru vērtības (testa modelis)**

LTvar	CODvar									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
0%	0,44%	2,73%	6,17%	7,35%	7,05%	7,94%	8,74%	9,79%	11,67%	12,68%
15%	0,18%	2,65%	5,72%	6,67%	6,30%	7,04%	7,83%	8,71%	10,34%	11,16%
25%	0,21%	2,62%	5,52%	6,73%	6,16%	7,12%	7,82%	8,86%	10,53%	11,15%
30%	0,44%	2,80%	5,83%	6,44%	5,89%	6,78%	7,66%	8,72%	10,48%	11,24%
50%	0,38%	2,70%	5,79%	6,57%	5,85%	6,82%	7,59%	8,65%	10,38%	11,16%
75%	0,41%	2,82%	5,70%	6,48%	5,62%	6,66%	7,24%	8,28%	10,04%	11,17%
100%	0,68%	2,76%	5,52%	6,33%	5,75%	6,73%	7,41%	8,39%	10,08%	10,83%
Vidējais	0,39%	2,73%	5,75%	6,65%	6,09%	7,01%	7,76%	8,77%	10,50%	11,34%

Promocijas darbā izstrādātās procedūras rezultātā tiek izveidota produkcijas likumu kārtula, kuras pamatā ir ietekmējošo faktoru izmaiņu kopa un kura ļauj pārvaldīt pārslēgšanas procesu analizējamai piegādes ķēdei. 5. tabulā ir parādīta produkcijas likumu kārtula, kas tiek izveidota uz trīs ešelonu piegādes ķēdes pamata.

5. tabula

**Produkcijas likumu kārtula trīs ešelonu piegādes ķēdes modelim**

CODvar	LTvar	Pārslēgšanas posms	Rekomendējama plānošanas metode
...	...	...	...
0.2	0%	Nē	POR
0.3	0%	Jā	ROP
...	...	...	...
0.2	15%	Nē	POR
0.3	15%	Jā	ROP
...	...	...	...
0.2	25%	Nē	POR
0.3	25%	Jā	ROP
...	...	...	...
0.2	30%	Nē	POR
0.3	30%	Jā	ROP
...	...	...	...
0.2	50%	Nē	POR
0.3	50%	Jā	ROP

Piedāvātās produkcijas likumu kārtulas ietekme uz produkta dzīves ciklu tiek izanalizēta, izskaitļojot kopējās izmaksas pie iespējamiem dzīves cikla scenārijiem. Tā kā  $LTvar$  parametra izmaiņu ietekme ir nebūtiska, tas tiek pieņemts kā nemainīgs. Prognozējamās izmaksas pēc dažādiem scenārijiem ir apkopotas 6. tabulā. Balstoties uz procedūras realizācijas rezultātiem, pārslēgšanās process tiek rekomendēts pie  $CODvar = 0.3$ . Ir redzams, ka kopējo izmaksu vērtība ir atkarīga no produkta dzīves cikla īpatnības, turklāt maksimālā starpība starp izmantotajiem scenārijiem visā produkta dzīves ciklā ir 11 505 €, pie relatīvas izmaksu attiecības starp maksimālo un minimālo izmaksu vērtībām vienādas ar  $ACCS = 3.5\%$ . Realizētā analīze apliecina nepieciešamību izstrādāto procedūru, precīzi  $ACCS$  kritērija kritisko vērtību, pārvērtēt, izejot no prognozētā produkta dzīves cikla.

6. tabula

### Pārslēgšanas momenta ietekme uz kopējām izmaksām pēc produkta dzīves cikla scenārija

Pārslēgšanas moments $CODvar$ vērtība	Dzīves cikla scenāriji						
	1	2	3	4	5	6	7
tikai POR	€ 337 619	€ 338 461	€ 339 680	€ 339 472	€ 340 947	€ 340 672	€ 340 766
tikai ROP	€ 336 124	€ 334 260	€ 333 451	€ 332 405	€ 331 133	€ 330 536	€ 329 261
1	--	--	€ 339 265	--	€ 340 533	--	--
0,9	--	--	€ 338 886	--	€ 340 153	--	--
0,8	--	--	€ 338 569	--	€ 339 837	--	--
0,7	--	--	€ 338 287	--	€ 339 272	€ 340 108	--
0,6	--	--	€ 337 774	€ 338 960	€ 337 991	€ 339 083	€ 340 253
0,5	--	--	€ 337 321	€ 338 280	€ 336 859	€ 337 724	€ 339 574
0,4	--	€ 337 754	€ 336 850	€ 337 102	€ 335 680	€ 335 839	€ 338 396
0,3	--	<b>€ 336 361</b>	<b>€ 335 855</b>	<b>€ 335 111</b>	<b>€ 333 690</b>	<b>€ 333 848</b>	<b>€ 332 423</b>
0,2	--	€ 335 456	€ 334 498	€ 333 302	€ 331 880	€ 331 134	€ 329 710

Veicot analīzi modelī, kas reprezentē reāla uzņēmuma daudzvešonu piegādes ķēdi, ir secināts, ka starpība starp plānošanas metožu izmaksām palielinājās, savukārt,  $ACCS$  vērtība būtiski samazinājās. Var secināt, ka pēc  $ACCS$  kritērija novērtējumā, pat sasniedzot  $CODvar=1$  vērtību, tiek rekomendēta cikliskā plāna izmantošana. Savukārt, līdz  $CODvar=0.25$  ieskaitot, hipotēzi  $H_0$  nevar noraidīt un ir secināts, ka starp divām plānošanas metodēm nepastāv nozīmīgas atšķirības. Pie lielākām  $CODvar$  vērtībām tiek novērtēts  $ACCS$  kritērijs, kas eksperimentu gaitā esošajam modelim nepārsniedza  $ACCS_{max} = 3.85\%$ .

Galvenie secinājumi ir šādi:

- piegādes ķēdes struktūra un īpašības būtiski ietekmē plānošanas iznākumus;
- novērtēšanas kritērija kritiskā vērtība jādefinē ekspertam, ievērojot atsevišķas piegādes ķēdes uzvedību un izredzes;
- aprobācijas laikā bija lietderīgi analizēt plānošanas metodes izmantošanu no kopējo izmaksu perspektīvas produkta dzīves cikla ietvaros.

## DARBA REZULTĀTI UN SECINĀJUMI

Promocijas darbā ir izstrādāta daudzvešelonu piegādes ķēžu plānošanas metožu optimalitātes intervāla analīzes procedūra, kas ir paredzēta piegādes ķēžu pārslēgšanas punkta starp plānošanas alternatīvām noteikšanai. Procedūras pamatā ir imitācijas, kā efektīvas daudzvešelonu piegādes ķēdes modelēšanas tehnikas izmantošana. Izstrādātā procedūra nodrošina pārslēgšanas vadības mehānismu un rezultātā uzlabo piegādes ķēdes produkta dzīves cikla pārvaldību.

Izstrādātās procedūras pamatā tiek izveidots plānošanas metožu pārslēgšanas algoritms, kur lēmuma pieņemšana par vienas vai otras plānošanas alternatīvas izmantošanu ietver gan statistiskās salīdzināšanas procesu, gan arī optimalitātes kritērija ACCS analīzi. Optimalitātes intervāla analīze ļauj pilnveidot plānošanas vadības procesu un atbalsta elastīgāku plānošanas metodes izvēli. Izmaksu, ko ietekmē piegādes ķēdes parametri, piemēram, pieprasījuma un pasūtījuma izpildes laika variācijas koeficienti, salīdzināšanas algoritms nodrošina pārslēgšanas kārtulas izstrādi automātiskās pārslēgšanas starp metodēm īstenošanai.

Risinot promocijas darba uzdevumus, ir sasniegti šādi rezultāti:

- Izstrādāta optimalitātes intervāla analīzes procedūra, kas paredzēta daudzvešelonu piegādes ķēžu plānošanas metožu analīzei stohastiskā vidē. Pētījuma pamatā tika izanalizēta optimalitātes intervāla izmantošana piegādes ķēžu vadības sfērā.
- Izstrādāts imitācijas modelēšanā bāzēts piegādes ķēžu plānošanas alternatīvu pārslēgšanas algoritms, kas tika aprobēts reālā piegādes ķēdes plānošanas uzdevumā un ļauj elastīgi pārslēgties no vienas alternatīvas izmantošanas uz citu produkta dzīves cikla ietvaros.
- Balstoties uz realizētā algoritma rezultātiem, pārslēgšanas procedūra tiek paplašināta ar pārslēgšanas kārtulas ieviešanu, kas ietver produkcijas likumu kopu un nodrošina plānošanas metodes izvēli pie noteiktiem sistēmu ietekmējošiem faktoriem.
- Pētījuma ietvaros tika izanalizētas ieejas datu, t.i., stohastiskā pieprasījuma, modelēšanas pieejas darbam ar pieprasījuma mainīguma lielo diapazonu, kā arī imitācijas modelēšanā bāzētas alternatīvu statistiskās salīdzināšanas metodes modeļu izejas datu pēcapstrādei.
- Imitācijas modelēšanas eksperimentu īstenošanai un pārslēgšanas kārtulas izveidošanai tika veikta piegādes ķēdes izpildes kritēriju ietekmējošo faktoru nozīmīgo efektu un jutīguma analīze.

Darbs noslēdzas ar izstrādātās procedūras aprobāciju. Daudzvešelonu piegādes ķēžu gadījumu izpētēs tiek apskatīti modeļi, kuru pamatā ir eksistējošu pasaules mēroga uzņēmumu piegādes ķēdes. Aprobācijas laikā tiek secināts, ka piegādes ķēdes struktūra un īpašības būtiski ietekmē plānošanas analīzes iznākumus, turklāt, novērtēšanas kritērija kritiskā vērtība jādefinē ekspertam,

ievērojot atsevišķas piegādes ķēdes uzvedību un perspektīvas.

Izstrādāto procedūru var pielāgot arī imitācijas modelēšanā bāzētu alternatīvu salīdzināšanai citās nozarēs.

Pēc darba rezultātu apkopošanas ir iespējams saskatīt tālākas piedāvātās pieejas pilnveidošanas un attīstīšanas iespējas, piemēram: a) no produkta dzīves cikla puses padziļinātu plānošanas metožu izvēles analīze; b) pirms- un pēc-pārslēgšanas periodu plānošanas procesu analīze ar mērķi izvairīties no neparedzētām dīkstāvēm; c) optimalitātes intervāla analīzes procedūrā analizējamo alternatīvu skaita un/vai īpašību paplašināšana; d) jutīguma analīzes procedūras pilnveidošana pārslēgšanas kārtulas struktūras uzlabošanai.

## LITERATŪRAS SARAKSTS<sup>1</sup>

1. Banks J., Carson J.S. Discrete-event system simulation.- New Jersey:Pearson Prentice Hall, 4th ed., 2005 - 608p.
2. Begnaud J., Benjaafar S., Miller L. The Multi-level Lot Sizing Problem with Flexible Production Sequences// IIE Transactions.- 2009.- No.41, P.702-715.
3. Beraldi P. et al. Scenario-based Planning for Lot-sizing and Scheduling with Uncertain Processing Times // International Journal of Production Economics.- 2006.- No. 101, P.140–149.
4. Bozarth C.C., Warsing D.P., Flynn B.B., Flynn E.J. The impact of supply chain complexity on manufacturing plant performance// Journal of Operations Management.-2009.-No.27.-P.78-93.
5. Buzdy B. R., Campbell G. M., Webb I. Cyclical schedules for one-warehouse, multi-retailer systems with dynamic demands // Journal of the Operational Research Society. –1999.- Vol. 50, No. 8, P.850.-856.
6. Campbell G.M. Cyclic assembly schedules for dynamic demands// IIE Transactions.- 1996.- No.28, P.643-651.
7. Campbell G.M. and Mabert V.A. Cyclical schedules for capacitated lot sizing with dynamic demands // Management Science.- 1991.- No. 37(4), P.409 - 427.
8. Federgruen A. and Meissner J. Probabilistic Analysis of Multi-Item Capacitated Lot Sizing Problems// Working paper, Columbia University and Lancaster University Management School.- 2005.
9. Giannelos N. and Georgiadis M. Efficient Scheduling of Consumer Goods Manufacturing Processes in the Continuous Time Domain // Computers and Operations Research.- 2003.- No. 30, P.1367–1381.
10. Handfield R.B., Nichols E.L. Introduction to Supply Chain Management. - New Jersey: Prentice Hall, 1999. – 192p.
11. Hoffman E.O., Gardner R.H. Evaluation of Uncertainties in Environmental Radiological Assessment Models// Radiological Assessments: a Textbook on Environmental Dose Assessment. - Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1983.
12. Isik F. Complexity in Supply Chains: A New Approach to Quantitative Measurement of the Supply-Chain-Complexity// Supply Chain Management. -2011.-P.417-432.
13. Kelton W.D. Statistical Analysis of Simulation Output// Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference. - IEEE press, Dec. 1997.- P.23-30.

---

<sup>1</sup> Kopsavilkumā ir sniegts saīsināts literatūras saraksts. Promocijas darba literatūras sarakstā ir 113 nosaukumi

14. Kleijnen J. Supply chain simulation tools and techniques: a survey // International Journal of Simulation and Process Modelling. – 2005. – Vol. 1., Issue 1/2 – P.82-89.
15. Kleywegt A.J., Shapiro A., Homem-de-Mello T. The Sample Average Approximation Method for Stochastic Discrete Optimization// Journal of Optimisation.-2001.-Vol.12, No.2, P.479-502.
16. Law A.M. Simulation Modeling and Analysis. - Boston: McGraw-Hill, 4th ed., 2006. - 800p.
17. Merkurjeva G., Vecherinska O. Randomness modelling in supply chain simulation// The 1st International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation. – Los Alamitos: IEEE Conference Publication Service, January 27-29, 2010. – P.128-133.
18. Merkurjeva G., Vecherinska O. Simulation-based Comparison: An Overview and Case Study// The 12th International Conference on Computer Modelling and Simulation (UKsim'2010). – Los Alamitos: IEEE Conference Publication Service, March 24-26, 2010. – P.186-190.
19. Milgate M. Supply chain complexity and delivery performance: an international exploratory study// Supply Chain Management: An International Journal.-2001.- Vol.6 (3).-P.106–118.
20. Moinzadeh K., Aggarwal P. Analysis of a Production/Inventory System Subject to Random Disruptions // Management Science. – 1997. - Vol. 43, No.11. – P.1577 - 1588.
21. Narahari Y., Biswas S. Performance Measures and Performance Models for Supply Chain Decision making // Measuring Supply Chain Performance, ICFAI, University Book Series, 2007.
22. Pundoor G., Integrated Production – Distribution Scheduling in Supply Chain, Ph.D.Dissertation // Faculty of the Graduate School, University of Maryland, 2005.
23. Roundy R. A 98%-effective integer-ratio lot-sizing for one-warehouse multi-retailer systems// Management Science.- 1985.- No. 31(11), P.1416-1430.
24. Roundy R. A 98%-effective lot-sizing rule for a multi-product, multi-stage production/inventory system// Mathematics of Operations Research.- 1986.- No.11(4), P.699-727.
25. Santoso T., Ahmed S., Goetschalckx M., Shapiro A. A Stochanic Programming Approach for Supply Chain Network Design under Uncertainty// European Journal of Operational Research.-2005.-No.167, P.96-115.
26. Shapiro J.F. Modeling the Supply Chain. – Belmont: Thomson, 2nd ed., 2007. – 608p.
27. Silver E.A., Pyke D.F., Peterson R. Inventory Management and Production Planning and Scheduling. – New York: John Wiley & Sons, 3rd ed.,1998. – 784p.

28. Taha H.A. Operations Research: An Introduction. - New Jersey: Pearson Prentice Hall, 8th ed., 2006 - 813p.
29. The Sixth Framework Programme. The specific programme for research, technological development and demonstration: "Integrating and strengthening the European research area" (2002-2006) / Retrieved from - [http://ec.europa.eu/research/fp6/index\\_en.cfm?p=0\\_docs](http://ec.europa.eu/research/fp6/index_en.cfm?p=0_docs)
30. The Seventh Framework Programme for Research and Technological Development (2007-2013) / Retrieved from - [http://ec.europa.eu/research/industrial\\_technologies/index\\_en.cfm](http://ec.europa.eu/research/industrial_technologies/index_en.cfm)
31. Van Landeghem H., Vanmaele H. Robust planning: a new paradigm for demand chain planning // Journal of Operations Management. – 2002. – Vol.20. - P.769-783.
32. Андронов А.М., Копытов Е.А., Гринглаз Л.Я. Теория вероятностей и математическая статистика. Учебник для вузов.-СПб. Питер, 2004.-461 с.