

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

**Jans JEĻINSKIS**

**FAZILOĢIKAS BALSTĪTA PIEKĻUVES VADĪBA MPLS-TE/GMPLS  
TĪKLOS**

**Promocijas darba kopsavilkums**

**Rīga 2011**

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

Elektronikas un telekomunikāciju fakultāte

Telekomunikāciju institūts

**Jans JEĻINSKIS**

Doktora studiju programmas „Telekomunikāciju un datoru tīkli” doktorants

**FAZILOĢIKAS BALSTĪTA PIEKĻUVES VADĪBA MPLS-TE/GMPLS  
TĪKLOS**

**Promocijas darba kopsavilkums**

Zinātniskais vadītājs

Dr. sc. ing., profesors

**G.LAUKS**

**Rīga 2011**

UDK 004.7:510.6(043.2)

Je 344 f

Jeļinskis J. Faziloģikas balstīta piekļuves vadība MPLS-TE/GMPLS tīklos. Promocijas darba kopsavilkums.-R.:RTU, 2011.-44 lpp.

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

Iespiests saskaņā ar ETF promocijas padomes „RTU P-08” 2011.gada 15. septembra lēmumu, protokols Nr. 5

**ISBN .....**

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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2011.g. 15. decembrī, Rīgas Tehniskās universitātes Elektronikas un Telekomunikāciju fakultātē, Āzenes ielā 12, 210 auditorijā.

**OFICIĀLIE RECENZENTI**

Profesors, Dr.Habil.Math. Aleksandrs Šostaks

Latvijas Universitāte, Rīga, Latvija

Profesors, Dr.habil.sc.ing. Ernests Pētersons

Rīgas Tehniskā universitāte, Rīga, Latvija

Profesors, Dr.habil.sc.ing. Manfrēds Šneps-Šnepe

Ventspils Augstskola, Rīga, Latvija

**APSTIPRINĀJUMS**

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

Jans Jeļinskis .....(Paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 4 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 2 pielikumus, 90 zīmējumus un ilustrācijas, kopā 174 lappuses. Literatūras sarakstā ir 148 nosaukumi.

## VISPĀRĒJAIS DARBA RAKSTUROJUMS

### Tēmas aktualitāte

Mūsdienu trafika valdības uzdevumu loks aptver daudzas neatrisinātas problēmas, kas skar ātrgaitas optisko sakaru tīklu trafika inženieriju. Ar multimediju aplikāciju straujo attīstību [15] servisa kvalitātes (QoS) nodrošināšana galalietotājiem ir kļuvusi par vienu no svarīgākajām problēmām sakaru jomā. Trafika vadība piekļuves tīklu un mazu apakštīklu līmenī nerada būtiskas problēmas, jo pārsvarā šādas interneta tīkla apakšsekcijas netiek nemitīgi pārslogotas. Savukārt maģistrālo tīklu līmenī efektīvai un proaktīvai trafika vadībai ir noteicoša loma, lai nodrošinātu tīkla efektīvu izmantošanu un QoS parametru saglabāšanu pieļaujamās robežās. Mūsdienās maģistrālo tīklu līmenī noteicošu lomu spēlē daudzprotokolu iezīmju komutācija ar trafika inženieriju (MPLS-TE), kas nākotnē pārtaps par vispārināto MPLS (GMPLS) un nodrošinās datu pārraidi superātros optiskajos pārraides tīklos balstoties uz FTTx un PON transporta tehnoloģijām [6], [3], [4], [13], [17], [5], [7].

LSP iestatīšana MPLS-TE tīklos var tikt realizēta ar RSVP-TE protokola palīdzību. RSVP-TE ir detalizēti aprakstīts IETF RFC3209 un papildināts RFC5151. Tas ļauj, pieņemot CAC lēmumu, iestatīt LSP tuneli MPLS-TE tīklā, ņemot vērā tādus ierobežojošos parametrus kā pieejamā caurlaides josla un precīzs lēkumu skaits. 2003. gada februārī IETF MPLS darba grupa nolēma atteikties no alternatīvā CR-LDP (RFC3212) signalizācijas protokola attīstības un koncentrējās vienīgi uz RSVP-TE protokola attīstību (RFC3469), jo 2002. gada jūnijā publicēts pārskats par pirmajām GMPLS realizācijām parādīja, ka no 22 risinājumiem 21 pielietoja RSVP-TE protokolu un tikai 1 lietoja CR-LDP [56]. Tātad RSVP-TE protokola attīstība un modifikācijas ir attiecināmas arī uz GMPLS tīklu vadības plakni, kas ir definēta kā NGN tīklu vadības pamata tehnoloģija.

Ņemot vērā visu iepriekš minēto, šodien īpaši aktuāls kļūst jautājums par trafika vadību MPLS-TE tīklu gadījumā. Mūsdienu MPLS tīklos LSP tiek iestatīti pārsvarā manuāli, rezervējot resursus ar RSVP-TE protokola palīdzību. Trafika maršrutēšana notiek pa iepriekš iestatītiem LSP, balstoties uz iepriekš definētām QoS klasēm.

Problēmas šinī gadījumā rodas, kad konekcijas laikā, rezervējot resursus ar RSVP-TE protokolu, CAC kontrole notiek, balstoties uz klasisko sliekšņa-CAC algoritmu, saskaņā ar kuru pieslēgums tiek atļauts, ja linkā brīvo resursu skaits pārsniedz pieprasīto resursu apjomu. Pieslēgums tiek atteikts, ja pieprasīto resursu apjoms ir mazāks par linkā esošajiem brīvajiem resursiem. Šāda LSP vadības politika neņem vērā aplikācijas QoS prasības un tīklu raksturojošās QoS parametru

vērtības. Jaunas LSP plūsmas tiek pieslēgtas, neskatoties uz to, kādai QoS klasei pieder aplikācijas sakaru sesijas dati un vai šo datu transportam var tikt nodrošināti tādi QoS raksturojoši parametri kā pakešu aiztures, pakešu aizturu trīce un pakešu zudumi.

Šis promocijas darbs piedāvā modifikācijas RSVP-TE protokola darbībā ar nolūku nodrošināt selektīvu LSP tuneļu iestatīšanu MPLS-TE tīklā. Piedāvātās modifikācijas ļauj MPLS-TE tīklu vadībā realizēt dinamisku, aplikāciju vadītu LSP pieslēgšanu, nodrošinot QoS parametru kontroli konkrētas iestatīšanas brīdī.

Lai būtu iespējams nodrošināt selektīvu trafika plūsmu vadību, pamatā var pielietot divas pieejas:

- var izmantot masīvas lēmumu pieņemšanas sistēmas, kas balstās uz daudzu kritēriju secīgu izvērtēšanu un liela apjoma IF-THEN kārtulu zināšanu bāzēm;
- var pielietot neskaidras loģikas jeb faziloģikas lēmējmehānismu.

Pēdējās dod iespēju pielietot kompaktu IF-THEN kārtulu zināšanu bāzi, sniedz ātru atbildi, kas balstās vienlaicīgi uz daudziem kritērijiem, un neprasa ieejas fazi izvedumu sistēmas lingvinistisko mainīgo vērtības ar lielu precizitātes pakāpi.

Mūsdienu pētījumos CAC vadībai ir veltīta liela uzmanība. Tā skar plašu telekomunikāciju jomu [19], [20], [18], [21], [55], [27], [2], [54]. Arī CAC vadība MPLS tīklos ir apskatīta dažos nesenos pētījumos [14], [1]. Tomēr faziloģikas pielietojums CAC vadībai MPLS tīklos, pēc šī promocijas darba autora ziņām, ir piedāvāts tikai vienā pētījumā [25], un arī tas nenodrošina QoS kontroles mehānismu LSP iestatīšanas momentā.

Visas iepriekš aprakstītās problēmas motivēja šī promocijas darba autoru risināt minēto problēmu, kā rezultātā tapa šis promocijas darbs. Tas ir veltīts faziloģikas pielietojumam CAC uzdevuma risinājumā NGN tīklos ar MPLS-TE/GMPLS vadības plakni, pielietojot RSVP-TE protokolu.

## **Darba mērķis un uzdevumi**

Balstoties uz prognozēm par multimediju trafika īpatsvara straujo pieaugumu mūsdienu sakaru tīklos, tiek noteiktas jaunas prasības trafika vadības paradigmai MPLS-TE vadības plātnē, tādas kā spēja nodrošināt aplikāciju vadītu LSP dinamisku iestatīšanu un proaktīvu trafika vadību, saglabājot QoS parametrus pieļaujamās robežās.

Šīs prasības rada nepieciešamība meklēt jaunus risinājumus dinamiskajai LSP plūsmu vadībai, saglabājot QoS prasības „gals-gals” slēgumā.

Šo iemeslu dēļ promocijas darba mērķis bija izveidot jaunu fazi-CAC projektēšanas metodi, kas novērš minētos trūkumus, kā arī novērtēt konstruētā fazi-CAC pielietošanas iespējas MPLS-TE (GMPLS) trafika pārraides/vadības sistēmā ar RSVP-TE protokolu, nodrošinot dinamisko LSP iestatīšanu.

Lai sasniegtu minēto mērķi bija nepieciešams atrisināt šādus uzdevumus:

- analizējot literatūru, atrast efektīvus risinājumus sistēmās ar nenoteiktību un proaktīvu vadību un piemērot tos konkrētajam uzdevumam;
- noteikt mūsdienu trafika vadības paradigmas ierobežojumus;
- definēt MPLS-TE un Fazi-CAC modeļi eksperimentāliem pētījumiem, kas būtu par pamatu simulācijas shēmas un eksperimentālā tīkla realizācijai, kā arī noteikt MPLS-TE QoS ierobežojošos faktorus un to robežas, pamatojoties uz esošo SLA (angl. *Service Level Agreement*) datiem un izvēlēta modeļa īpatnībām;
- pielietojot modeļi ietvertos ierobežojumus, ar heuristisko pieeju konstruēt fazi izvedumu sistēmu, kas nodrošina selektīvu LSP iestatīšanu un QoS parametru saglabāšanu definēto robežu ietvaros;
- izveidot eksperimentālu MPLS-TE sakaru sistēmas tīklu un simulācijas vidi, kā arī veikt klasiskā sliekšņa-CAC un fazi-CAC algoritmu praktiskās realizācijas identiskos apstākļos ar mērķi veikt turpmāko rezultātu salīdzinošu analīzi;
- izanalizēt iespējamās fazi-CAC adaptācijas mehānismus, tādus kā ieejas parametru lingvinistisko mainīgo deklarāciju izmaiņas un fazi-CAC atbildes pēcapstrāde.

## Pētījumu metodika

Tika definēti fazi-CAC fazi izvedumu sistēmas (FIS) un MPLS-TE tīkla modeļi. Eksperimentālajā daļā ir veikta MPLS-TE sakaru sistēmas izpēte, pielietojot RSVP-TE protokola CAC vadību ar klasisko sliekšņa un faziloģisko CAC realizāciju ar turpmāko rezultātu salīdzinošu analīzi. Ātrai fazi-CAC fazi izvedumu sistēmas prototipēšanai, kā arī plūsmu analīzes pētījumiem tiek pielietoti arī simulācijas pētījumi.

Izvirzīto uzdevumu risināšanai ir izmantota heuristiska atlases, kļūdu un mēģinājumu pētījuma metode un eksperimentālie mērījumi.

## **Pētījumu rezultāti un zinātniskā novitāte**

Darba zinātniskais jauninājums ir MPLS-TE sakaru sistēmas RSVP-TE protokola CAC vadības projektēšanas metode, kura balstās uz faziloģikas bāzes.

Autora izstrādātais fazi-CAC risinājums dod iespēju iestatītām LSP tuneļu plūsmām nodrošināt šādus vēlamos QoS parametrus: pakešu aizture, pakešu aizturu trīce un pakešu zudumi. Pēc promocijas darba autora ziņām, tas ir pirmais uz faziloģiku balstīts CAC algoritms un risinājums LSP iestatīšanai MPLS-TE tīklos, kurā tiek pielietotas šāda veida fazi-CAC ieejas un izejas parametru fazikopas un zināšanu bāze IF-THEN kārtulu formā. Šī pētījumu rezultātā, pēc autora ziņām, pirmo reizi tika radīta veiktspējīga un izvirzītām prasībām atbilstoša fazi-CAC praktiskā realizācija MPLS-TE sakaru sistēmas eksperimentālā tīklā. Šis promocijas darbs ir pirmais pētījums par fazi-CAC pielietojumu efektivitāti MPLS-TE sakaru sistēmā, un tas ietver ne tikai teorētiskus un simulācijas pētījumus, bet arī eksperimentāli pārbauda piedāvātā fazi-CAC algoritma efektivitāti pakešu līmenī. Šim nolūkam tika izveidots MPLS-TE sakaru sistēmas eksperimentāls tīkls.

### **Jaunieguvums**

- Ir izstrādāta jauna fazi-CAC vadības projektēšanas metode, nodrošinot MPLS-TE (GMPLS) tīklos RSVP-TE protokola vadību ar fazi-CAC.
- Ir atrasta optimāla (pēc utilizācijas kritērija un ierobežojumiem) fazi-CAC FIS struktūra, kas ietver sevī
  - fazi-CAC ieejas un izejas parametru lingvinistiskos mainīgos;
  - lingvinistisko mainīgo piederības funkciju tipus un parametrus;
  - IF-THEN kārtulu zināšanu bāzi;
  - ieejas parametru fazifikācijas līkņu tipus un parametrus;
  - izejas parametra defazifikācijas metodes.
- Balstoties uz šiem pētījumiem, ir izstrādātas rekomendācijas katra FIS struktūrelementa pielietojuma apgabaliem.
- Ir piedāvāts oriģināls risinājums fazi-CAC atbildes stāvokļu kopai, kas satur 3 dažādas atbildes
  - atteikt LSP iestatīšanu;
  - atļaut LSP iestatīšanu;
  - atļaut LSP iestatīšanu ar papildu resursu rezervēšanu.

Dotais risinājums ļauj izveidot t.s. „drošības spilvenu” augstās prioritātes LSP plūsmām linkā, kas ir tieši proporcionāls augstās prioritātes LSP plūsmām linkā.

- Ir atrastas likumsakarības starp RSVP-TE rezervētiem resursiem linkā, fazi-CAC atteikto plūsmu pieslēgumu skaitu un piedāvātā fazi-CAC risinājuma FIS atbildes pēcapstrādes sliekšņa vērtību. Šie dati ļauj veikt momentānās fazi-CAC politikas korekcijas atkarībā no apkārtējās vides izmaiņām.
- Izstrādātā projektēšanas metode ļauj realizēt adaptīvus algoritmus attiecībā pret ārējās vides izmaiņām.
- Ar fazi-CAC, selektīvi iestatot LSP tuneļus, linka utilizācija, salīdzinot ar sliekšņa-CAC, pazeminās, vienlaicīgi saglabājot QoS parametrus definētās robežās.

### **Darba praktiskā vērtība**

- Ir izveidots fazi-CAC FIS modelis, kā arī ir veikta izveidotā modeļa verifikācija un validācija.
- Ir izveidota praktiskā fazi-CAC realizācija RSVP-TE protokola vadībai MPLS-TE tīklā, kas ir eksperimentāls produkts.
- Eksperimentālais MPLS-TE sakaru sistēmas tīkls ar RSVP-TE protokola faziloģikas balstītu CAC kontroli, dod tehnoloģisku pamatu plaša loka pētījumiem par fazi-CAC pielietojumu, saglabājot vēlamos QoS parametrus.
- Uz eksperimentālā MPLS-TE sakaru tīkla bāzes, pielietojot vairāku maršrutētāju fazi-CAC vadību ar attiecīgu starpprogrammatūru (piemēram, JADE), var realizēt vairāku fazi-CAC aģentu sadarbību multiāģentu slēgumā.
- Eksperimentālais tīkls un tam piesaistītais programmatiskais nodrošinājums tiek pielietots bakalaura un maģistra darbu izstrādei.
- Ir izveidota metodika MPLS-TE maršrutētāja darbības korekcijai, nodrošinot RSVP-TE protokola vadību ar fazi-CAC fazi izvedumu sistēmu (FIS).

### **Izstrādājot promocijas darbu, ir iegūti šādi galvenie zinātniskie rezultāti:**

- Tika konstatēts, ka RSVP-TE protokola CAC lēmuma pieņemšanas politika MPLS-TE tīklos balstās vienīgi uz linka pieejamo caurlaides joslu. Šāda pieeja nenodrošina efektīvu trafika vadību MPLS-TE tīklos. Darbā ir atrasts CAC vadības veids, kas balstās uz faziloģisko lēmēj mehānismu, kas nodrošina vienlaicīgu vairāku QoS parametru analīzi lēmuma pieņemšanas momentā. Tas nodrošina selektīvu LSP tuneļu iestatīšanu attiecībā uz aplikācijas puses QoS prasībām un tīkla QoS raksturojošiem parametriem.

Vienlaicīgi tiek nodrošināta QoS parametru saglabāšana pieļaujamās robežās.

- Uz faziloģiku balstīts CAC risinājums nodrošina mazāku skaitu LSP plūsmu pieslēgumu atteikumu, kā arī lielāku skaitu augsta QoS līmeņa plūsmu pieslēgumu, vienlaicīgi saglabājot QoS parametrus pieļaujamās robežās.
- Fazi-CAC risinājums ar trim CAC lēmumiem, kas ietver sevī arī LSP plūsmas pieslēgumu ar papildu resursu rezervēšanu, nodrošina proaktīvu trafika vadības politiku, veidojot t.s. „drošības spilvenu” LSP plūsmām, kura „izmērs” ir tieši proporcionāls pieslēgtām augstās prioritātes LSP plūsmām un ļauj saglabāt QoS parametrus pieļaujamās robežās.
- Fazi-CAC algoritma darbības novērtējums MPLS-TE eksperimentālā tīklā, vadot RSVP-TE protokola resursu rezervēšanu LSP tuneļu iestatīšanas brīžos, parāda, ka arī stipri pārslogotā tīklā „uzliesmojošā” fona trafika gadījumā fazi-CAC nodrošina selektīvo LSP plūsmu kontroli un mazākus QoS parametru degradācijas lielumus.
- Tika konstatēts, ka ir iespējams veikt ātru fazi-lēmēj mehānisma atbildes pēcapstrādi, definējot konkrētas fazi-CAC atbildes sliekšņa vērtības, momentāni mainot fazi-CAC algoritma politiku, nemainot ieejas lingvinistisko mainīgo piederības funkcijas un/vai IF-THEN kārtulu zināšanu bāzi.
- Ir konstatēts, ka, pielietojot SOM, MOM un LOM izvada piederības funkciju defazifikācijas metodes, samazinās informācijas daudzums par IF-THEN kārtulu definētiem lēmumiem, kas neļauj pielietot fazi-CAC atbildes efektīvu pēcapstrādi.

### **Aizstāvamās tēzes**

- Uz faziloģiku balstīts CAC algoritms, salīdzinot ar klasisko sliekšņa-CAC algoritmu, vadot RSVP-TE resursu rezervēšanu MPLS-TE tīklā (arī GMPLS nākotnē), spēj nodrošināt maksimālo vidējo linka utilizāciju pie uzdotiem QoS parametru degradācijas ierobežojumiem.
- Salīdzinot ar klasisko sliekšņa-CAC algoritmu, uz faziloģiku balstīts CAC risinājums spēj nodrošināt selektīvu trafika plūsmu izvēli LSP tuneļu izveidei MPLS-TE tīklos (arī GMPLS nākotnē) un palielināt augstu QoS klašu plūsmu pieslēgumu skaitu, vienlaicīgi nodrošinot plūsmu apkalpošanai attiecīgus QoS parametrus.
- Pielietojot MPLS-TE (arī GMPLS nākotnē) tīklos fazi-CAC algoritmu klasiskā sliekšņa-CAC algoritma vietā, ir iespējams samazināt tādu plūsmu pieslēgumus, kas neatbilst linka QoS nodrošinājuma iespējam LSP iestatīšanas brīdī, tādā veidā mazinot pieslēgto datu plūsmu priekšlaicīgus atslēgumus QoS parametru neatbilstības dēļ.

- Salīdzinot ar klasisko sliekšņa-CAC algoritmu, uz faziloģiku balstīts CAC risinājums spēj dod iespēju tiešsaistes režīmā nodrošināt ātru un efektīvu trafika vadības politikas maiņu MPLS-TE maršrutētājos (arī GMPLS nākotnē), adaptējoties pie mainīgajiem tīkla apstākļiem.

### **Darba rezultātu aprobācija**

Fazi-CAC darbības efektivitāte ir pārbaudīta attiecībā pret RSVP-TE pielietoto klasisko sliekšņa-CAC algoritmu gan plūsmu gan pakešu līmenī, pierādot tā spēju nodrošināt selektīvu LSP iestatīšanas politiku un proaktīvu trafika vadības paradigmu.

Promocijas darba galvenie rezultāti tika prezentēti šādās konferencēs

1. Electronics and Electrical Engineering, Lithuania, Kaunas, 21.-23. maijs, 2007.
2. RTU 48. starptautiskā zinātniskā konference 12. oktobris, 2007.
3. Electronics and Electrical Engineering, Lithuania, Kaunas, 20.-22. maijs, 2008.
4. Electronics and Electrical Engineering, Lithuania, Kaunas, 13.-15. maijs, 2009.
5. IEEE Region 8 International Conference on Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering, Russia, Irkutsk, Listvjanka, 11.-15. jūlijs, 2010.
6. Electronics and Electrical Engineering, Lithuania, Kaunas, 18.-20. maijs, 2010.
7. 18th Telecommunications Forum TELFOR 2010, Serbia, Belgrade, 23.-25. novembris, 2010.
8. Electronics and Electrical Engineering, Lithuania, Kaunas, 17.-19. maijs, 2011.
9. 11th International Conference on Telecommunications, ConTEL 2011, Graz, Austria, 15.-17. jūnijs, 2011.
10. 12th IEEE International Conference on High Performance Switching and Routing, Spain, Cartagena, 4. – 7. jūlijs, 2011.

Kopumā ir publicēti 14 zinātniski raksti dažādos zinātniskos izdevumos

1. Jeļinskis J., Lauks G. Optimal Policy for LSP Control in MPLS Networks // Electronics and Electrical Engineering, LIETUVA, Kaunas, 21.-23. maijs, 2007. 65-68. lpp.

2. Jeļinskis J. Heuristic algorithm for optimal LSP set up policy in MPLS Networks // RTU zinātniskie raksti. 7. sēr., Telekomunikācijas un elektronika. - 7. sēj. (2007). 23.-26. lpp.
3. Jeļinskis J., Lauks G. Approximation of Internet Traffic Using Robust Wavelet Neural Networks // Electronics and Electrical Engineering 6(86), Lithuania, Kaunas, 20.-22. maijs, 2008. 81.-84. lpp.
4. Jeļinskis J., Lauks G. Data Mining for Managing Intrinsic Quality of Service in MPLS // Electronics and Electrical Engineering 5(85), Lithuania, Kaunas, 20.-22. maijs, 2008. 33.-36. lpp.
5. Jeļinskis J. Heuristic algorithm for Robust Approximate Hurst Parameter Estimation with Wavelet Analysis and Neural Networks // Scientific Journal of RTU. 7. series., Telekomunikācijas un elektronika. - 8. vol. (2008), 12.-15. lpp.
6. Bobrovs V., Jeļinskis J., Ivanovs Ģ., Lauks G. Research of Traffic Management in FTTx Optical Communication Systems // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences . - 2. (2009) 41.-55. lpp.
7. Lauks G., Jeļinskis J. Metamodelling of Queuing Systems Using Fuzzy Graphs // Electronics and Electrical Engineering Nr. 4(92) ISSN 1392-1215, Electronics and Electrical Engineering, Lithuania, Kauņa, 13.-15. maijs, 2009. 61.-64. lpp.
8. Jeļinskis J., Lauks G. Detection of Trends of Internet Traffic Using Sequential Patterns // Electronics and Electrical Engineering Nr. 4(93) ISSN 1392-1215, Electronics and Electrical Engineering, Lithuania, Kauņa, 13.-15. maijs, 2009. 3.-6. lpp.
9. Jeļinskis J., Lauks G. Fuzzy Approach for QoS Aware Application Driven Traffic Control in GMPLS Networks // IEEE Region 8 International Conference on Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering, Volume I, Krievija, Irkutska, Listvjanka, 11.-15. jūlijs, 2010. 199.-203. lpp.
10. Jeļinskis J., Rutka G., Lauks G. Fuzzy-CAC for LSP Setup in GMPLS Networks // Electronics and Electrical Engineering 2010, Nr.5(101), Lithuania, Kauņa, 18.-20. maijs, 2010. 31.-34. lpp.
11. Jeļinskis J., Lauks G. Fuzzy CAC Adaptation for Effective Traffic Control in GMPLS Networks // 18th Telecommunications Forum TELFOR 2010, Serbija, Belgrade, 23.-25. novembris, 2010. 10.-13. lpp.
12. J. Jelinskis, A. Skrastins, G. Lauks. Practical Fuzzy-CAC Realization for Effective Traffic Engineering in MPLS-TE Network // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija, 2011. – No. 4(110). 30.-34. lpp.
13. J. Jelinskis, A. Skrastins, G. Lauks. Fuzzy-CAC based Traffic Management in MPLS-TE Networks // 11th International Conference on Telecommunications, ConTEL 2011, Graz, Austria, 15-17 jūnijs, 2011. 389.-395. lpp.

- 14.J. Jelinskis, A. Skrastins, G. Lauks. Fuzzy-CAC Driven MPLS-TE Realization // 12th IEEE International Conference on High Performance Switching and Routing, Spain, Cartagena, 4.–7. jūlijs, 2011, 146.–150. lpp.

### **Promocijas darba rezultāti izstrādes laikā tika izmantoti vairāku projektu pētījumu daļas realizācijā**

1. Trafika apvienošanas izpēte „IP virs WDM” tīklos. Projekta Nr.: ZP2008/16 (2008/2009).
2. Valsts pētījumu programmas „Informācijas Tehnoloģijas projekts” nr. 5 „Jaunas elektronisko sakaru tehnoloģijas” novirziens – elektrosakaru sistēmu drošums un drošība. RTU projekts Nr V7408.1. (2007, 2008, 2009).
3. Trafika vadības izpēte „dzīsla līdz mājai” optiskajā sakaru sistēmā. Projekta Nr.: ZP2007/13 (2007/2008)
4. Nr. 05.1649 „Optimālās maršrutizācijas algoritmi uzklātos tīklos” (2007, 2008).

### **Darba apjoms un struktūra**

Promocijas darba apjoms ir 176 lappuses. Darbs sastāv no ievada, 4 nodaļām, izmantotās literatūras saraksta un pielikumiem.

**Ievadā** ir dots īss ieskats mūsdienu trafika inženierijas problēmās, kā arī ir pamatota promocijas darbā veikto pētījumu aktualitāte un tiek definēts promocijas darba mērķis un uzdevumi.

**Pirmajā nodaļā** promocijas darba autors sniedz īsu ieskatu mūsdienu sakaru sistēmu vadības paradīgmā, uzsverot tās vājās un stiprās puses un norādot faziloģikas pielietojuma iespējamus plusus un mīnus. Tālāk tiek sniegts ieskats faziloģikas pamatkonceptijā un dots faziloģikas kā zinātnes attīstības īss apskats, kā arī ir norādītas faziloģikas pielietojuma svarīgākās sfēras un fazi-vadības sistēmu piemēri. Tiek dots arī fazi izvedumu sistēmas pamatelementu detalizēts apraksts: lingvinistisko mainīgo piederības funkcijas, pamata faziloģiskās operācijas, ievada parametru fazifikācijas paņēmieni un izvada parametru defazifikācijas metodes. Tālāk promocijas darba autors dod īsu literatūras apskatu par faziloģikas pielietojumu telekomunikāciju dažādās sfērās, īpašu uzmanību veltot esošajiem faziloģikas pielietojumu piemēriem CAC uzdevumu risinājumos.

**Darba otrajā nodaļā** sniegts pētāmās MPLS-TE sakaru sistēmas un fazi-CAC fazi izvedumu sistēmas atsauču modelis. Šī nodaļa satur arī fazi-CAC fazi izvedumu sistēmas veiktspējas mērķu definīcijas, kā arī to sasniegšanai pieļaujamo QoS parametru degradāciju ierobežojumus un to pamatojumus. Dots heuristiskās atlases pētījumu metodes apraksts, kā arī ātrai fazi-CAC lēmējsistēmas

prototipēšanai nepieciešamās MPLS-TE sakaru sistēmas modeļa simulācijas vides shēma. Rezultātā ir pamatota ieejas parametru fazifikācijas līkņu izvēle un promocijas darba autora piedāvātās fazi-CAC lēmējsistēmas ieejas un izejas parametru lingvinistisko mainīgo piederības funkciju deklarācijas. Uzrādīta arī izvēlētā IF-THEN kārtulu zināšanu bāze, kā arī sniegts fazi-CAC atbildes pēcapstrādes metodes un pašas fazi sistēmas tipa izvēles pamatojums un iegūtās fazi-CAC lēmumu virsmas.

**Trešajā nodaļā** sniegts MPLS-TE sakaru sistēmas eksperimentālā tīkla realizācijas detalizēts apraksts, kas ietver sevī gan MPLS-TE tīkla daļu, gan fazi-CAC algoritma vadības bloku, kā arī trafika ģenerējošo un uztverošo pusi. Dots eksperimentu scenāriju apraksti un analizējamo QoS parametru definīcijas. Šī nodaļa satur arī detalizēti izklāstītus eksperimentu rezultātus, salīdzinot darba autora piedāvātā fazi-CAC algoritma darbības efektivitāti ar klasisko sliekšņa-CAC algoritmu.

**Ceturtajā nodaļā** promocijas darba autors apskata piedāvātā fazi-CAC algoritma adaptācijas mehānismus, kas nodrošinātu efektīvas algoritma pielāgošanās spējas ātri mainīgajai ārējai videi. Tiek apskatīta iespēja tiešsaistē pielāgot fazi-CAC algoritma darbības politiku, modificējot lingvinistisko mainīgo piederības funkciju deklarācijas. Autors apskata arī lēmuma pieņemšanas sliekšņa izmaiņas ietekmi uz MPLS-TE sakaru sistēmas darbību. Sliekšņa modifikācijas tiešā veidā neietekmē fazi-lēmējsistēmas darbību, tomēr var tikt pielietotas, lai nodrošinātu ļoti ātru un efektīvu fazi-CAC „uzvedības” tiešsaistes korekciju.

**Darba noslēgumā** ir dots promocijas darba galveno secinājumu apkopojums, kā arī ir definēts turpmāko pētījumu virziens.

**Pielikumos** ir doti svarīgākie programmatisko risinājumu pirmkodi, kas tika pielietoti fazi-CAC algoritma realizācijai eksperimentālā tīklā, nodrošinot saskarni ar Cisco 2800 sērijas maršrutētāju, kā arī FIS Matlab pirmkods un fazi-CAC testēšanai pielietotā MPLS-TE modeļa Matlab simulācijas vides pirmkods.

## DARBA ATSEVIŠĀ NODAĻU IZKLĀSTS

### **Pirmā nodaļa**

Faziloģika faktiski ir standarta loģikas paplašinājums, kur tiek apskatīta iespēja darboties ar daļējās patiesības jēdzienu. Faziloģika mūsdienās aizvien plašāk kļūst par vienu no veiksmīgākajiem tehnoloģiskajiem risinājumiem komplekso vadības sistēmu izstrādē. Tā faktiski ir modelēšanas metodoloģija, kas var tikt pielietota, lai risinātu reālās dzīves problēmas. Fazikopu teorija, kas ir pamatā faziloģikas koncepcijai, atgādina cilvēka spriešanas, jeb lēmumu pieņemšanas taktiku un pielieto aptuvenu jeb daļēju informāciju par sistēmas stāvokli un ieejas mainīgajiem. Tā tika pamatā pielietota, lai matemātiski attēlotu nenoteiktību un aptuvenu informāciju par apskatāmajiem parametriem, kā arī lai

piedāvātu rīkus, kas būtu spējīgi darboties ar neprecizitātēm, kuras ir sastopamas ļoti daudzās trafika inženierijas problēmās [12].

Galvenā faziloģikas īpatnība ir spēja pārnest ieejas parametru veidoto momentāno ainu uz izejas parametra vērtībām, balstoties uz IF-THEN kārtulām. Faziloģika spēj tikt galā ar daudzu problēmu matemātisko sarežģītību. Tā strādā ar fazi terminiem, fazi kopām un fazi operācijām un ļauj pieņemt lēmumus, balstoties uz fazi noteikumiem, kas ir aprakstīti ar IF-THEN kārtulām [22].

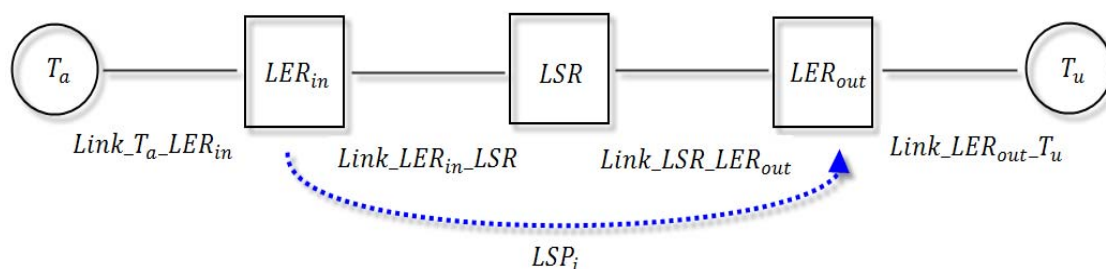
Izsmēlošu informāciju par faziloģikas teorētiskajiem pamatiem, tās matemātisko aparātu un plašiem pielietojuma aspektiem ir iespējams iegūt no daudzajām tās pamatlicēja profesora *Lotfali Askar-Zadeh* zinātniskajām publikācijām. [30 - 53]

## Otrā nodaļa

Šī promocijas darba autors pilnībā abstrahējās no maršrutēšanas uzdevumiem, rezultātā visi autoru interesējošie pētījumi var tikt veikti pēc vienkāršotas shēmas, kas nodrošina LSP iezīmes komutējamā ceļa iestatīšanas iespējas starp divām tīkla iekārtām.

### *MPLS-TE sakaru sistēmas atsauču modelis*

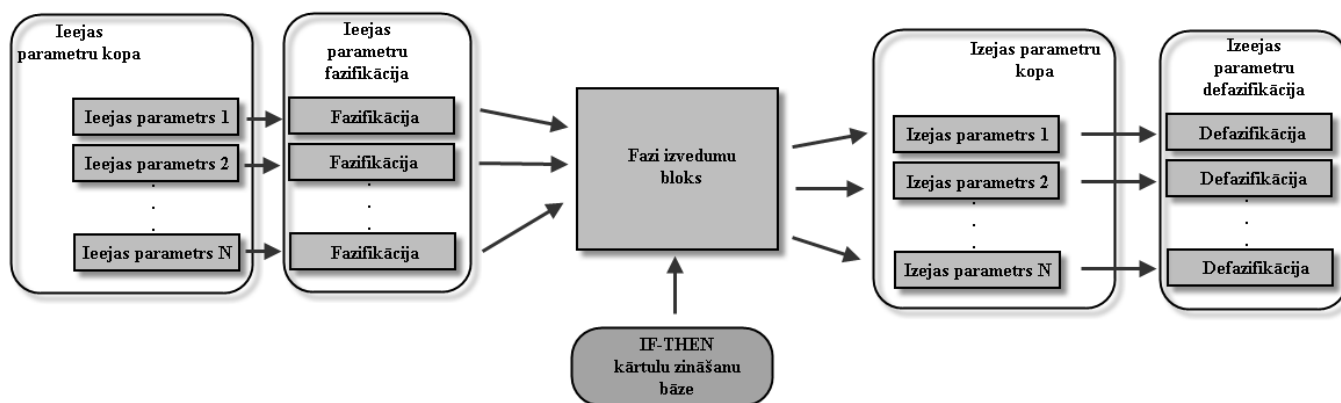
LSP iestatīšana tiek ierosināta robežapgabala iezīmes komutējamajā maršrutētājā (LER), tad tas LSP šķērso vienu vai vairākus iezīmes komutējamus maršrutētājus (LSR) MPLS apgabala iekšienē un tad izbeidzas citā LER, tad minimālais nepieciešamais maršrutētāju skaits ir 3 – divi LER un viens LSR (1. att.). Tie nodrošinās divus pilnvērtīgus lēkumus maģistrālajā apgabalā un divus piekļuves tīkla apgabala lēkumus.



1. att. MPLS-TE sakaru sistēmas eksperimentālā maketa pamatelementu slēguma shēma

## Fazi-CAC atsauču modelis

Fazi-CAC atsauču modeļa pamatā ir standarta fazi izvedumu sistēmas shēma, kas spēj pārnest ieejas parametru veidoto momentāno ainu uz izejas parametra vērtībām, balstoties uz IF-THEN nosacījumu kārtulām. Fazi-CAC atsauču modelis kalpo par pamatu konkrētai fazi izvedumu sistēmas (FIS) realizācijai, kas tiks pielietota salīdzinošajā analīzē ar klasisko sliekšņa-CAC algoritmu. Šī promocijas darba piedāvātā fazi-CAC mehānisma atsauču modelis ir attēlots zīmējumā 2.



2. att. Fazi-CAC atsauču modeļa shēma

Šī promocijas darba autora piedāvātais fazi-CAC risinājums pielieto 3 ieejas parametrus.

1. Pieprasītās un pieejamās caurplūdes joslas platumu attiecība CAC lēmuma pieņemšanas momentā  $t_i$ , ko apzīmēsim ar  $Bw_r(t_i)$ .
2. QoS klase jeb līmenis, ko pieprasa aplikācija CAC lēmuma pieņemšanas momentā  $t_i$ . Apzīmēsim ar  $QoS_c(t_i)$ .
3. Pakešu aiztures starp  $LER_{in}$  un  $LER_{out}$  – momentānās pakešu aizturu vērtības CAC lēmuma pieņemšanas momentā starp  $LER_{in}$  un  $LER_{out}$  robežapgabala iezīmes komutējamajiem maršrutētājiem, kuras apzīmēsim ar  $Delay_l(t_i)$ .

Autora piedāvātais fazi-CAC risinājums pielieto vienu izejas parametru, kas nosaka fazi-CAC lēmumu.

**Fazi-CAC atbilde – fazi izvedumu bloka atgrieztā vērtība pēc defazifikācijas, ko apzīmēsim ar  $CAC_f(t_i)$ .**

Šī promocijas darba autors piedāvā pielietot fazi-CAC risinājumam 3 dažādus stāvokļus, kas nosaka CAC reakcijas uz ieejas parametru vērtību kopu:

- a. Atļaut LSP iestatīšanu;
- b. Atteikt LSP iestatīšanu;
- c. Atļaut LSP iestatīšanu ar papildus resursu rezervēšanu.

Ņemot vērā visas iepriekš definētās ieejas parametru vērtības un fazi-CAC stāvokļu kopu, šī promocijas darba autora pielietotā fazi-CAC darbība var tikt attēlota ar tālāk dotu pseidokodu:

**START fazi-CAC**

FOR  $i = 0$  TO  $n$  STEP 1

    READ  $Bw_{rq}(t_i)$

    READ  $Bw_{aw}(t_i)$

    READ  $Delay_l(t_i)$

    READ  $QoS_l(t_i)$

    CALCULATE  $Bw_r(t_i)$

    CALCULATE  $CAC_f(t_i)$

    IF  $CAC_f(t_i) < 5 - s_1$

        THEN  $f_{CAC} = \text{„Atteikt”}$  AND  $LSP_i = 0$ ;

    ESLE IF  $CAC_f(t_i) > 5 - s_1$  AND  $CAC_f(t_i) < 5 + s_2$

        THEN  $f_{CAC} = \text{„Atļaut”}$  AND  $LSP_i = Bw_{rq}(t_i)$

    ESLE IF  $CAC_f(t_i) > 5 + s_2$

        THEN  $f_{CAC} = \text{„Atļaut ar papildu rezervēšanu”}$  &&  $LSP_i = Bw_{rq}(t_i) \cdot k$

    END IF

NEXT  $t_i$

AND FOR

**END fazi-CAC**

kur

- $Bw_{rq}(t_i)$  – aplikācijas pieprasītie resursi CAC lēmuma pieņemšanas momentā  $t_i$  [Mb/s];
- $Bw_{aw}(t_i)$  – linkā pieejamie resursi CAC lēmuma pieņemšanas momentā  $t_i$  [Mb/s];
- $Delay_l(t_i)$  – pakešu vidējās aiztures starp CAC lēmuma pieņemšanas momentiem  $t_i$  un  $t_{i-1}$  [ms];
- $QoS_l(t_i)$  – aplikācijas pieprasītā apkalpošanas klase CAC lēmuma pieņemšanas momentā  $t_i$ ;
- $LSP_i$  - RSVP-TE rezervētie LSP resursi CAC lēmuma pieņemšanas momentā  $t_i$  [Mb/s];
- $s_1$  un  $s_2$  – ir fazi-CAC atbildes sliekšņa vērtības;
- $k$  – papildus resursu rezervēšanas koeficients.

Tālāk tiek definēti vēlamie mērķi fazi-CAC efektīvai darbībai ar nolūku izvēlēties optimālo vai arī tam tuvu risinājumu fazi-CAC fazi izvedumu sistēmas izveidē.

- 1. Nodrošināt maksimālo vidējo linka utilizāciju pie uzdotiem QoS parametru degradācijas ierobežojumiem.**
- 2. Nodrošināt selektīvu trafika plūsmu izvēli LSP tuneļu izveidei ar nolūku palielināt augstas QoS klases plūsmu pieslēgumu skaitu, pie uzdotiem QoS parametru degradācijas ierobežojumiem.**
- 3. Mazināt tādu plūsmu pieslēgumus, kas neatbilst linka QoS nodrošinājuma iespējām LSP iestatīšanas brīdī.**

Fazi-CAC veikspējas mērķu definīcijā minētie QoS parametru degradācijas ierobežojumi balstās uz lielo maģistrālo tīklu operatoru definētās servisa līmeņa līgumiem jeb SLA. Tālāk ir doti dati par diviem Eiropas maģistrālā tīkla SLA, ko pārstāv NNT Communication – NNT Europe [23] un Sprint Network [26]. Pēdējie piedāvā atšķirīgus SLA MPLS tīkliem. Tālāk ir publicēti dati par ASV maģistrālo tīklu SLA, ko pārstāv Internap [16], Qest [24] un Verio [29].

Verizon, AT&T un Sprint Networks topoloģijas īpašības [11] nosaka vidējo lēkumu skaitu konekcijām maģistrālā tīkla robežās, kas ir 2,7. Koriģējot SLA datus attiecībā uz 2 lēkumiem eksperimentālajā MPLS-TE tīklā, nonākam pie fazi-CAC algoritma parametru izvēles QoS ierobežojumiem, definējot vēlamo fazi-CAC algoritma uzvedību (1. tabula)

1. Tabula

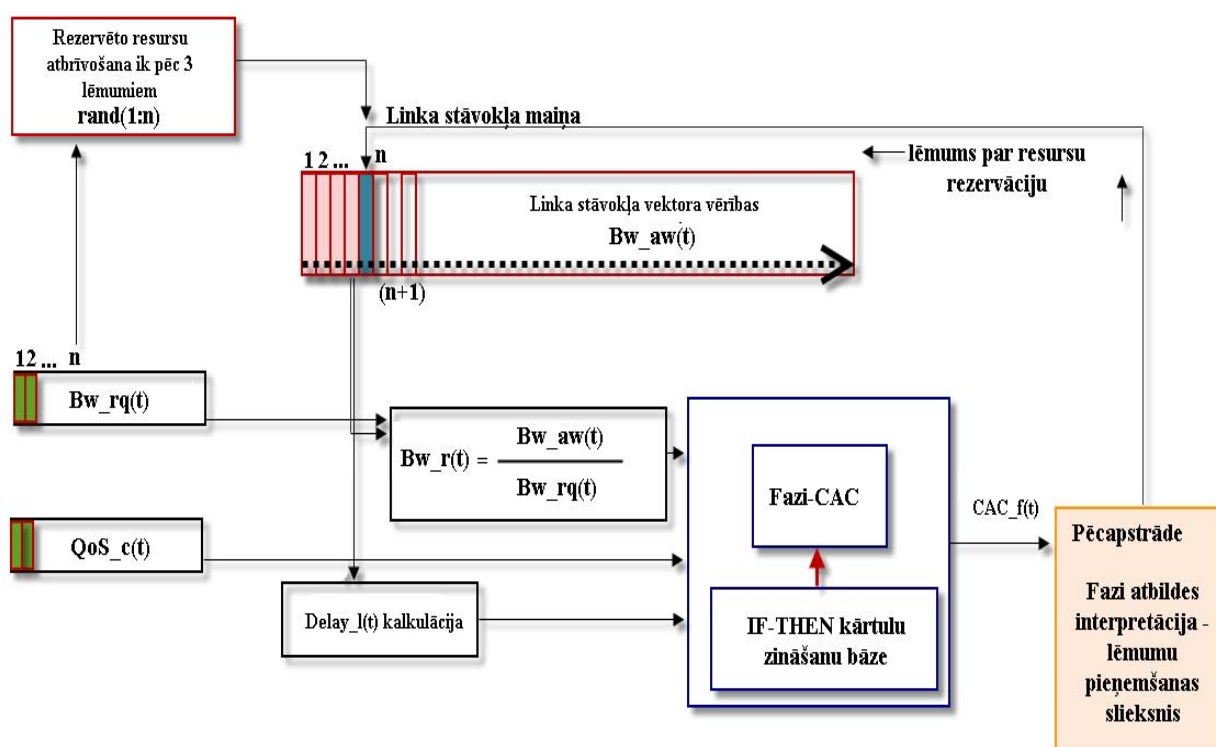
PMT pakešu aiztures	PMT pakešu zudumi tīklā	PMT vidēja trīce
33 ms	0,15 %	0,7 ms

### ***Heiristiskā FIS izvēle***

Ņemot vērā uzdevuma lielu komplicētību iepriekš doto mērķu sasniegšanai, promocijas darba autors ir izvēlējies heiristisko atlasas pētījuma metodi, mēģinājumu un kļūdu rezultātā nonākot pie optimumam tuvāka risinājuma. Izvēlētā heiristiskā atlasas pētījuma metode balstās uz sākuma rupjo fazi-CAC lēmējsistēmas modeļa vairāku realizāciju kopu, kas tika izveidota un pārbaudīta, pamatojoties uz promocijas autora izveidoto MPLS-TE sakaru sistēmas vienkāršu simulācijas modeli Matlab vidē (Att. 3). Labākie no modeļa realizācijas variantiem tika modificēti un papildināti, līdz tika sasniegti rezultāti, kas bija vistuvākie izvīzītiem fazi-CAC risinājuma veikspējas mērķiem.

Tālāk ir doti fazi-CAC modeļa parametri, kuru vērtību atrašana ir nepieciešama izvīzīto mērķu sasniegšanai.

- Katra ieejas parametra lingvinistisko mainīgo skaits un lingvinistisko mainīgo piederības funkciju deklarācijas.
- Izejas parametra lingvinistisko mainīgo skaits un lingvinistisko mainīgo piederības funkciju deklarācijas.
- Ieejas parametru fazifikācijas likņu definīcijas.
- Izejas parametra defazifikācijas metodes izvēle.
- IF-THEN kārtulu zināšanu bāzes definīcija.
- Fazi lēmējsistēmas veids – *Mamdani, Tugaki-Sugeno*.
- Iespējamais izejas parametra pēcapstrādes veids.

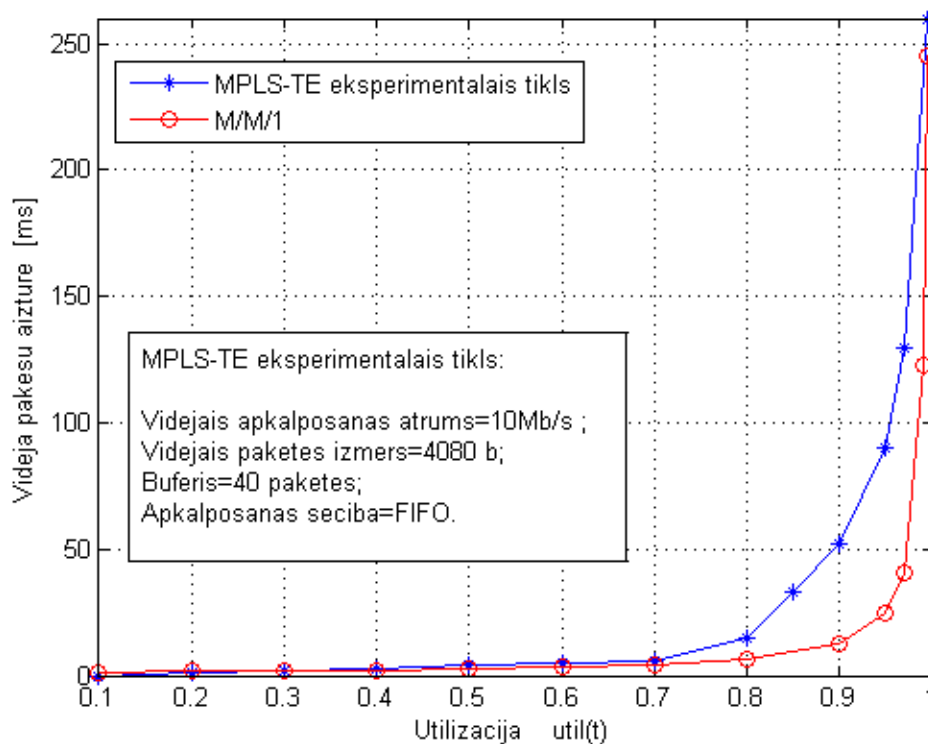


3. att. MPLS-TE sakaru sistēmas modeļa simulācijas algoritma blokshēma

Ar nolūku nodrošināt MPLS-TE tīkla simulācijas vides korektu darbību par pamatu simulācijas vidē  $Delay\_l(t_i)$  aprēķinātām vērtībām pirms fazifikācijas tika pieņemta MPLS-TE tīklam raksturīgā pakešu apkalpošanas laika likumsakarība (4. att.).

MPLS-TE sakaru sistēmas modeļa simulācijas vide tika izmantota ar nolūku ātri atlasīt labākos fazi-CAC lēmējsistēmas risinājumus, kas pēc turpmākām

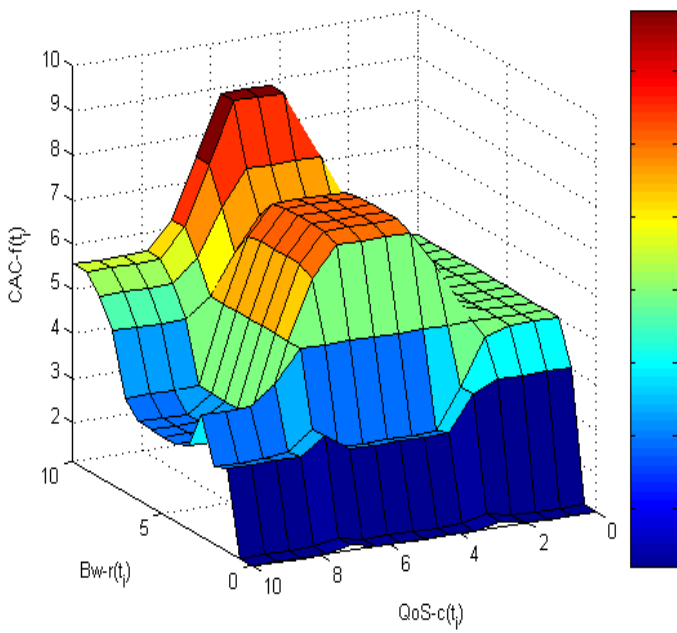
lingvinistisko mainīgo deklarāciju izmaiņām, kā arī IF-THEN kārtulu zināšanu bāzes modifikācijām tika pārbaudītas praktiskajā MPLS-TE sakaru sistēmas eksperimentālā tīklā.



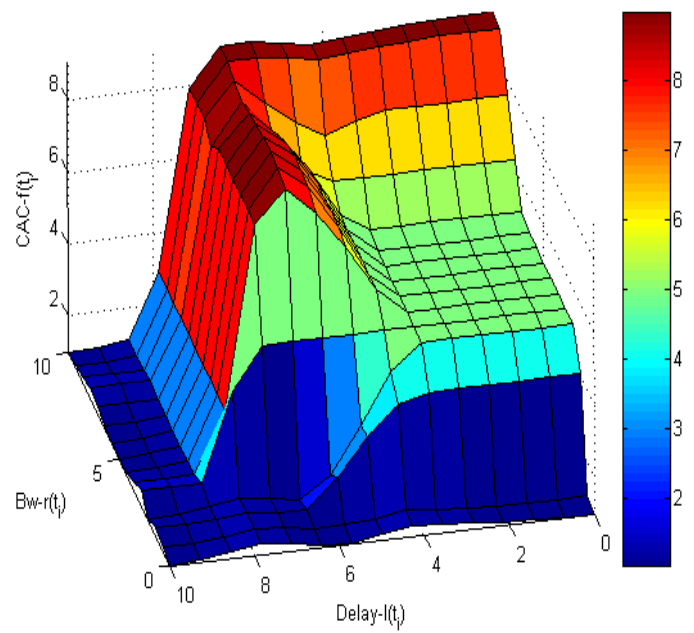
4. att. MPLS-TE eksperimentālā tīkla pakešu aizturu atkarība no linka utilizācijas

Dotā fazi-CAC algoritma konkrētajā realizācijā, pielietojot defazifikācijas procesā gravitācijas centra metodi, tika iegūtas šādas lēmumu virsmas, kuras apraksta fazi lēmējsistēmas reakciju visām iespējamām ieejas vērtību variācijām, pielietojot iepriekš noteiktas fazi IF-THEN kārtulas (5., 6., 7., att.).

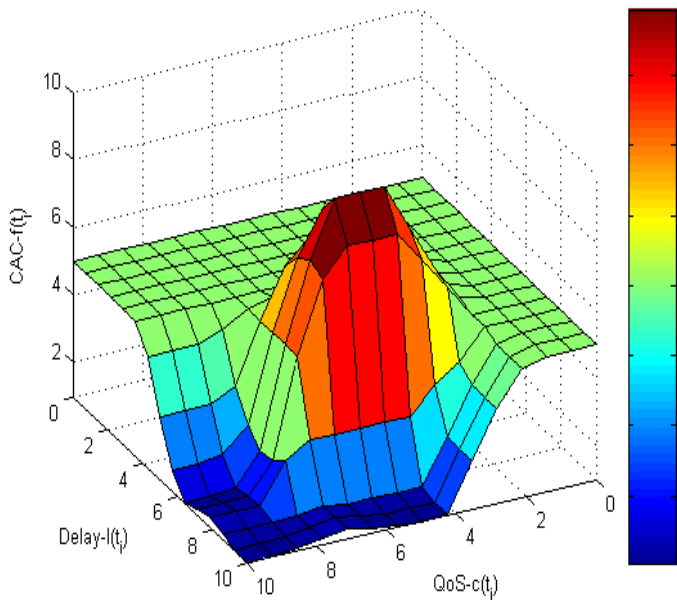
Defazifikācijas tehnikai, kas spētu saglabāt visu fazi atbilžu sniegto informāciju, ir jāņem vērā visu fazikopu rezultāti. Šādu rezultātu sniedz, piemēram, t.s. centroida, jeb COG defazifikācijas metode, kas defazifikācijas rezultātā atgriež virsmas centra punktu zem piederības funkciju līknes, un kā defazificētā vērtība tiek pielietota X koordināta. Šī promocijas darba fazi-CAC algoritma realizācijā tika pielietota COG defazifikācijas metode (8. att.)



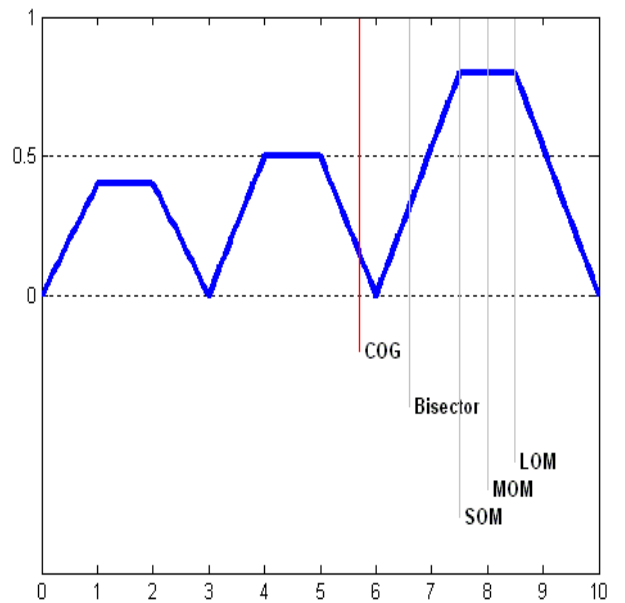
5. att. Fazi-CAC lēmējmehānisma lēmumu virsma QoS\_c(t) un Delay\_l(t) ieejas mainīgo vērtību gadījumā



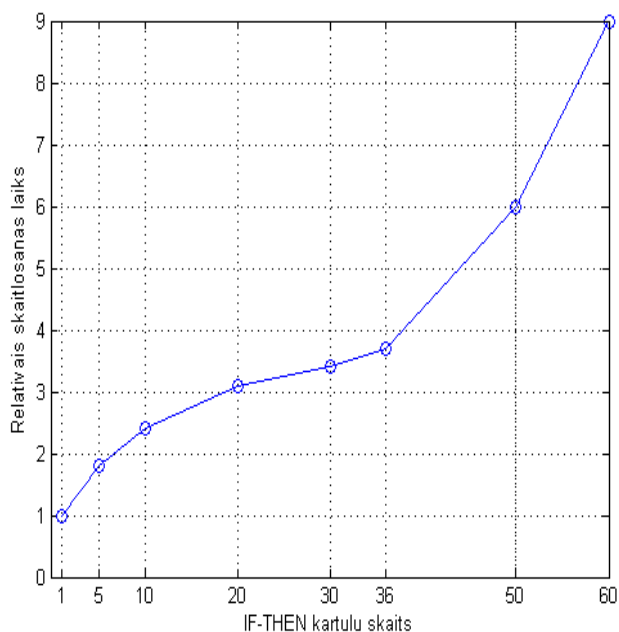
6. att. Fazi-CAC lēmējmehānisma lēmumu virsma Delay\_l(t) un Bw\_r(t) ieejas mainīgo vērtību gadījumā



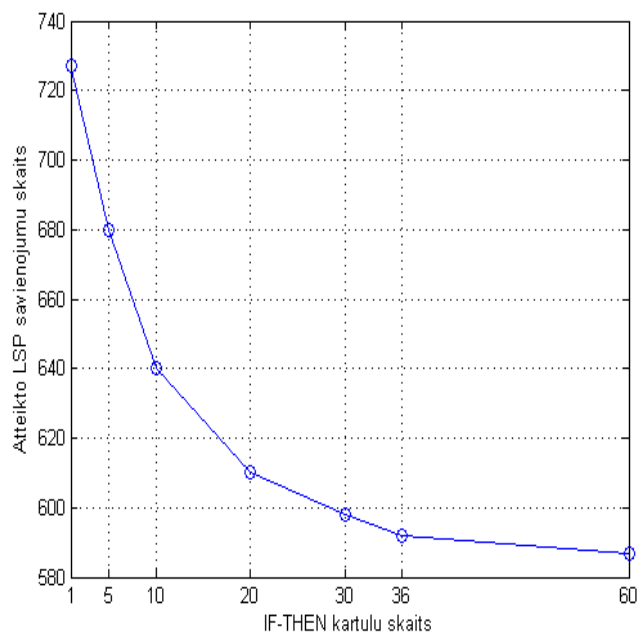
7. att. Fazi-CAC lēmējmehānisma lēmumu virsma QoS\_c(t) un Bw\_r(t) ieejas mainīgo vērtību gadījumā



8. att. Defazifikācijas metožu COG, Bisector, SOM, MOM un LOM rezultāti



9. att. Atteikto LSP savienojumu skaits atkarībā no pielietoto IF-THEN kārtulu skaita fazi-CAC lēmēj mehānisma implementācijā 1500 lēmumiem



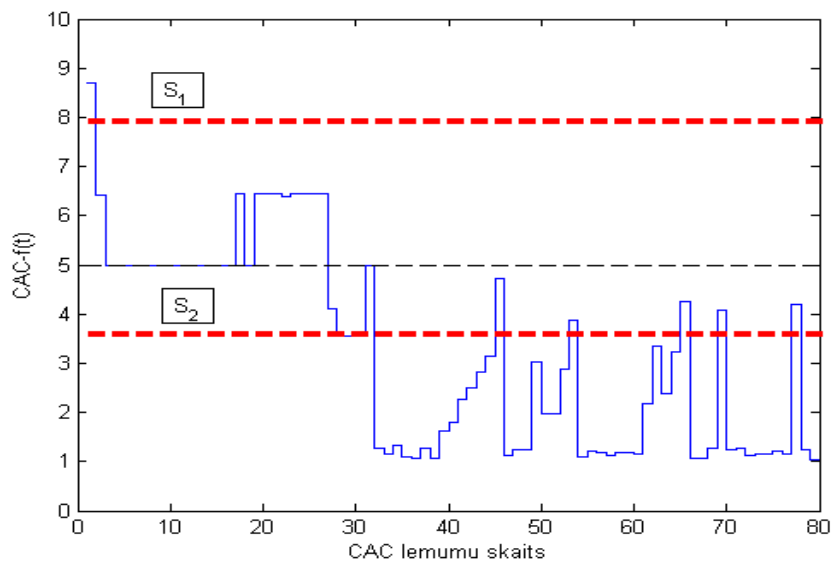
10. att. Lēmuma pieņemšanai nepieciešamā relatīvā skaitļošanas laika pieaugums atkarībā no pielietoto IF-THEN kārtulu skaita 1500 lēmumiem

Balstoties uz atlasē heuristiskās pētījumu metodes rezultātiem, lai sasniegtu iepriekš definētus fazi-CAC lēmēj sistēmas efektivitātes mērķus, tika izvēlēta IF-THEN kārtulu zināšanu bāze, kas sastāv no 36 kārtulām. IF-THEN kārtulu zināšanu bāzes izmēra izvēle ir pamatota ar skaitļošanas laika straujo pieaugumu un vienlaicīgi atteikto LSP plūsmu skaita lēno samazinājumu (9. un 10. att.)

### ***Fazi-CAC lēmuma pēcapstrāde***

Fazi-CAC atbildes  $CAC_f(t_i)$  vērtības pēcapstrāde nodrošina tās pārbaudi attiecībā uz sliekšņa vērtību, kas atšķir LSP pieslēguma atteikuma, atļaujas un atļaujas ar papildu resursu rezervēšanu.

Tā kā  $CAC_f(t_i)$  vērtība pēc defazifikācijas ir robežās no 0 līdz 10, ir jāizvēlas kādas noteiktas sliekšņa vērtības  $s_1$  un  $s_2$ , attiecībā uz kurām var nodrošināt  $CAC_f(t_i)$  pārbaudi un iegūt konkrētus CAC lēmumus (11. att.)



11. att. Sliekšņa vērtības  $CAC_f(t_i)$  pēcapstrādei

Fazi izvedumu sistēmas atbildes pēcapstrāde noteiktā veidā ierobežo  $CAC_f(t_i)$  sniegto informāciju par vēlamu CAC atbildi, tomēr tas ir nepieciešams, lai saņemtu precīzi definētus CAC lēmumus konkrēti definētu skaitļu veidā.

Mainot  $s_1$  un  $s_2$  vērtības, ir iespējams pielāgot fazi-CAC trafika vadības politiku, nodrošinot vēlamu LSP selektivitātes pakāpi. Atstājot pārāk lielu  $CAC_f(t_i)$  vērtību nogriezni CAC lēmumam „atteikt”, tiek nepilnīgi utilizēts links. Turpretim, atstājot pārāk lielu  $CAC_f(t_i)$  vērtību nogriezni CAC atbildei „atļaut”, links resursi tiek utilizēti labāk vienlaicīgi ar QoS parametru nepieļaujamu degradācijas pakāpi. Savukārt, atstājot pārāk lielu  $CAC_f(t_i)$  vērtību nogriezni CAC atbildei „atļaut ar papildu resursu rezervēšanu”, „drošības spilvena” īpatsvars ierobežotos linka resursos rezultātā dos nepamatoti zemu utilizētu linku.

Rezultātā, veicot fazi-CAC algoritma uzbūves izvēli atlasēs veidā, promocijas darba autors nonāca pie secinājuma, ka simetriskā sliekšņa vērtība  $s_1 = s_2 = s = 2$  dod vēlamu fazi-CAC algoritma izvedumu sistēmas darbību.

### ***Papildu resursu rezervēšanas koeficients***

Gadījumā, kad tiek pieņemts lēmums „Atļaut ar papildu resursu rezervēšanu”, LSP plūsmas pieprasījums tiek akceptēts, bet RSVP-TE rezervē vairāk resursu, nekā tiek norādīts aplikācijas pieprasījumā. Šādā veidā augstas QoS prasības kombinācijā ar zemām pakešu aizturēm un lielu  $Bw_r(t_i)$  vērtību rezultātā nodrošina t.s. „drošības spilvenu”. Tas palīdz uzturēt pieprasītus QoS parametrus ne tikai no jauna pieslēgtām LSP plūsmām, bet arī visām linkā esošajām

konekcijām. Turklāt dotais „drošības spilvens” ir tieši proporcionāls augstas prioritātes aktīvām LSP plūsmām linkā.

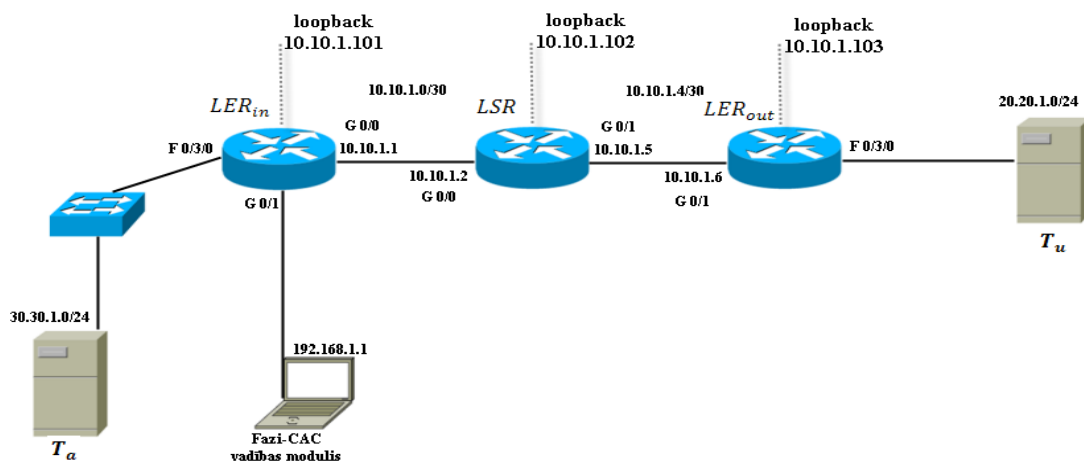
Ir svarīgi izvēlēties rezervēšanas koeficientu  $k$ , kas nodrošinātu fazi-CAC vēlamu efektivitāti. Heuristiskās atlasēs, kļūdu un mēģinājumu metodes rezultātā tika determinēta vērtība  $k = 2$ . Tas nozīmē, ka lēmuma „Atļaut ar papildu resursu rezervēšanu” gadījumā RSVP-TE rezervēs 2 reizes vairāk resursu linkā, nekā ir prasīts no aplikācijas puses.

## Trešā nodaļa

Fazi-CAC algoritma darbības efektivitātes pārbaudei, salīdzinot to ar klasisko sliekšņa-CAC algoritmu, tika veikta praktiskā fazi-CAC algoritma darbības realizācija uz reālā maršrutēšanas aprīkojuma. Šī uzdevuma izpildei tika izveidots MPLS-TE sakaru sistēmas eksperimentāls tīkls un nepieciešamais programmatiskais nodrošinājums, kas ļāva praktiski pārlicināties par autora piedāvātā fazi-CAC risinājuma darbības efektivitāti un iegūt nepieciešamos QoS tīkla parametru raksturojošos datus.

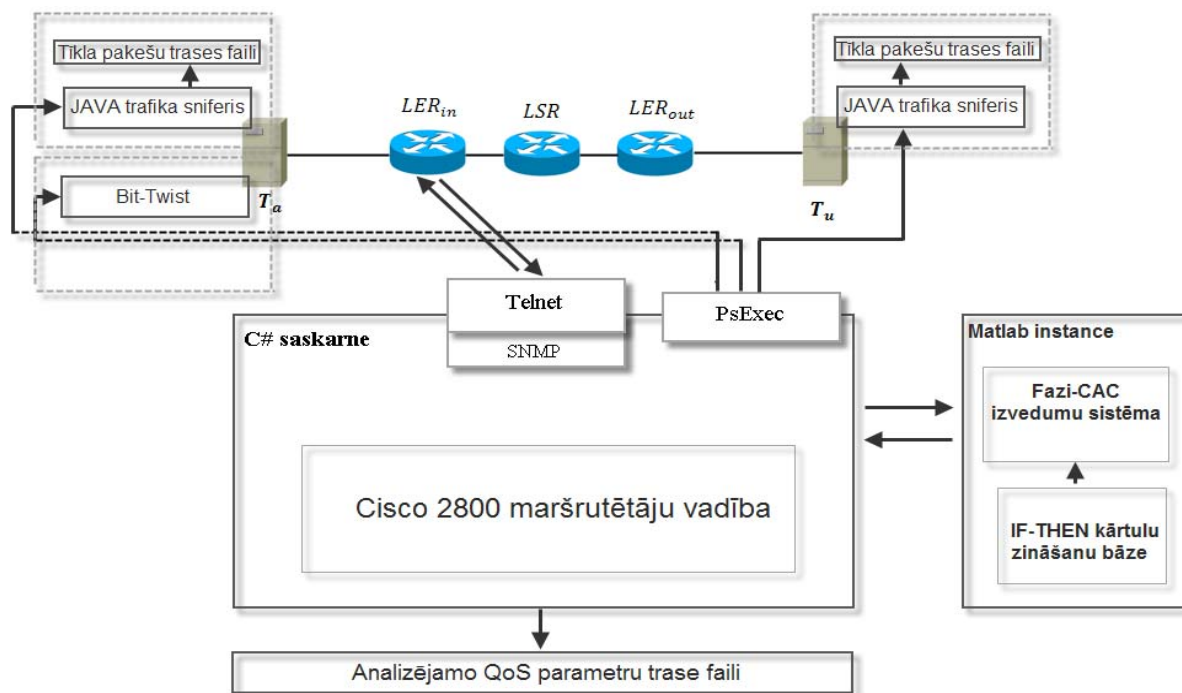
### *Esperimentālais MPLS-TE tīkls*

MPLS-TE sakaru sistēmas eksperimentālā tīkla realizācijai (12. att.) tika izvēlēti RTU, Elektronikas un Telekomunikāciju fakultātes, Telekomunikāciju institūta, maršrutēšanas laboratorijas aprīkojumā esošie 3 CISCO 2800 sērijas maršrutētāji, kas dod iespēju veidot un analizēt nelielu MPLS-TE tīklu. Eksperimentālie dati par šī tīkla robežās iestatītajām un atteiktajām LSP konekcijām, RSVP protokola rezervētiem resursiem un pamata trafika QoS parametru izmaiņām, ejot caur testa tīkla segmentiem, dod iespēju izdarīt svarīgākos secinājumus par fazi-CAC algoritma efektivitāti salīdzinājumā ar klasisko sliekšņa-CAC algoritmu.



12. att. Fazi-CAC algoritma pārbaudes eksperimentālā tīkla fiziskā slēguma shēma

No  $LER_{in}$  uz  $LER_{out}$ , pielietojot fazi-CAC algoritmu un klasisko sliekšņa-CAC algoritmu tiek iestatīti LSP tuneļi, kā arī tiek nodrošināta ģenerēto datu plūsmu transportēšana no trafika ģenerējošās puses  $T_a$  uz trafika uztverošu pusi  $T_u$ .

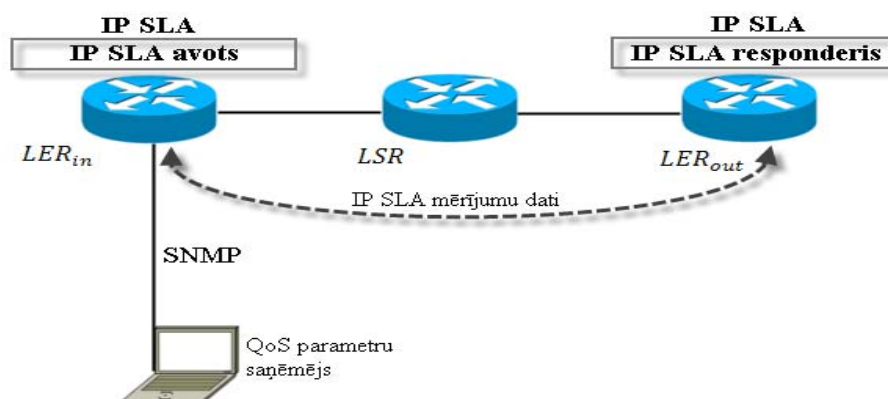


13. att. Fazi-CAC algoritma pārbaudes eksperimentālā maketa programmatiskās realizācijas elementu slēguma shēma

Eksperimentālā tīkla fazi-CAC vadības programmatiskās realizācijas shēma ir parādīta 13. attēlā. Galvenais fazi-CAC vadības bloks eksperimentālā tīklā ir uz C# bāzes veidota saskarne ar CISCO 2800 sērijas maršrutētāju, kas tiek nodrošināta caur Telnet protokolu. CISCO 2800 sērijas maršrutētājs strādāja MPLS-TE režīmā. Maršrutētājs varēja saņemt vadības komandas, kā, piemēram, LSP tuneļa iestatīšanas komandu, un arī atgriezt visu CAC algoritma darbībai un tā efektivitātes pārbaudei nepieciešamo informāciju, kā, piemēram, aktīvo un neaktīvo LSP tuneļu sarakstu, maršrutētāja bufera stāvokļa datus, informāciju par aizturēm linkā, zaudēto pakešu skaitu, informācijas par pakešu aizturu trīci utt.

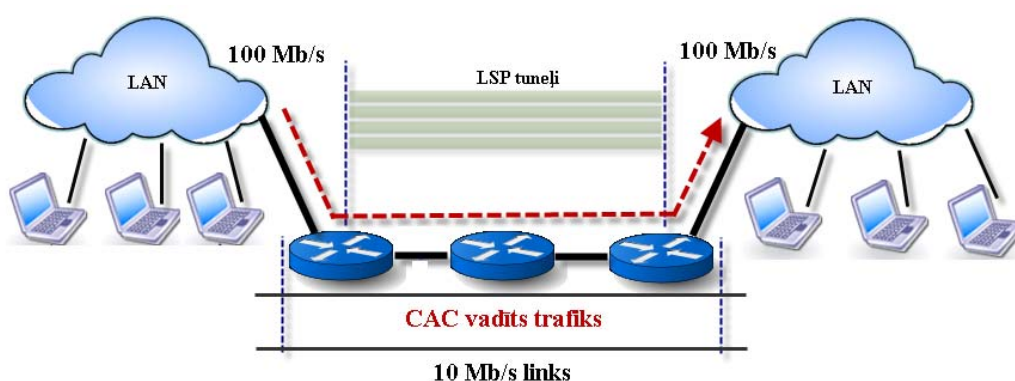
## Mērījumi

MPLS-TE sakaru sistēmas eksperimentālā tīkla realizācijā vairums nepieciešamo QoS parametru sakaru sistēmas darba efektivitātes novērtējumam tika iegūti, pielietojot Cisco IOS IP Service Level Agreements [9] (14. att.). Informācija par Cisco IOS IP SLA mērījumu metodoloģiju un mērījumu precizitāti ir atrodamā tālāk dotajos literatūras avotos [10] [8] [28].



14. att. Cisco IP SLA mērījumu shēma QoS parametriem uz MPLS-TE sakaru sistēmas eksperimentālā maketa

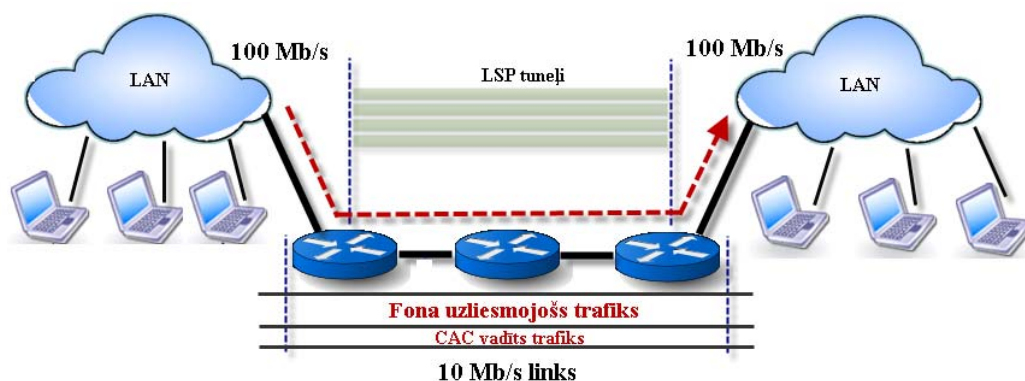
Fazi-CAC algoritma praktiskās realizācijas pārbaude tika veikta, definējot divus pamata scenārijus. Pirmais jeb optimistiskais scenārijs izslēdza uzliesmojošā fona trafika klātbūtni un paredzēja tikai un vienīgi pieprasīto plūsmu pieslēgšanu pie sākotnēji tukša 10Mb/s kanāla, kas tika papildīts, balstoties tikai un vienīgi uz fazi-CAC vai arī klasiskā sliekšņa-CAC algoritma sniegtajiem vērtējumiem par plūsmu pieslēgšanu vai noraidīšanu (15. att.).



15. att. Eksperimenta optimistiskā scenārija linka piepildīšanas politikas shēma

Otrais jeb pesimistiskais scenārijs paredzēja fazi-CAC un sliekšņa-CAC algoritmu darbības efektivitātes analīzi, pielietojot 10Mb/s linku, kas tika papildīts

ar vidēji 6 Mb/s uzliesmojošo datu plūsmu. Šajā gadījumā uz CAC algoritma darbības pamata tika vadīta paliestošās 4 Mb/s caurplūdes joslas utilizācija, kas rezultātā deva iespēju izvērtēt fazi-CAC un sliekšņa-CAC algoritmu darbību pie kritiskiem apstākļiem, kad pakešu zudumi maršrutētājā ir ievērojami un maršrutētāja buferis ir lielāko eksperimenta daļu daļēji vai arī pilnīgi aizņemts (16. att.).



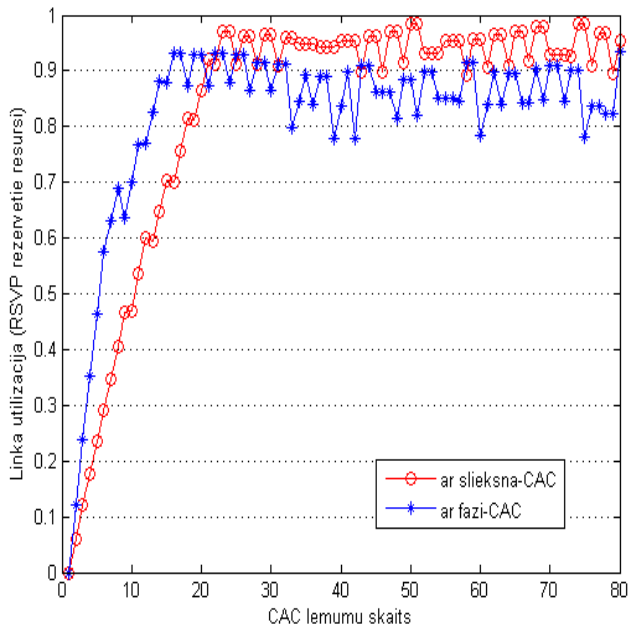
16. att. Eksperimenta pesimistiskā scenārija linka piepildīšanas politikas shēma

### Rezultāti

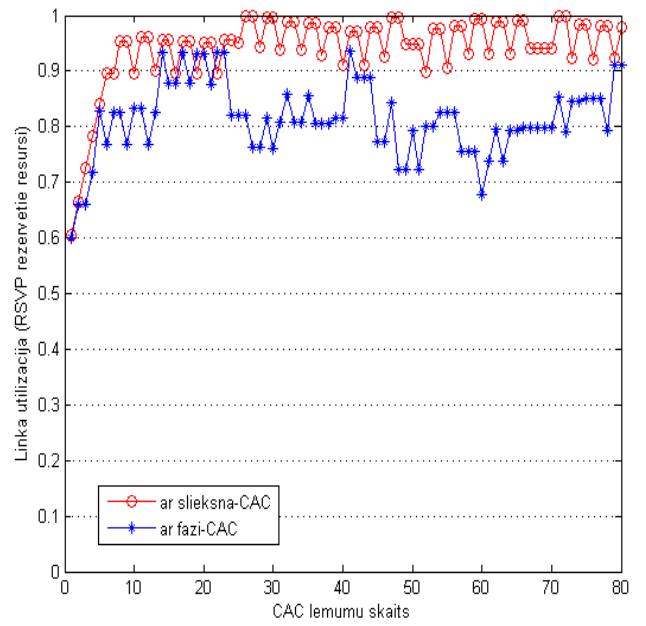
Tālāk ir doti salīdzinoši rezultāti par fazi-CAC un klasiskā sliekšņa-CAC darbību raksturojošiem QoS parametriem 3000 lēmumiem. Kā var redzēt no eksperimenta rezultātu vidējām vērtībām, tad, vidējam utilizācijas līmenim stabilizējoties 0,84 līmenī, QoS degradācijas ierobežojumos definētā 33 ms pakešu aizturu robeža jau tika sasniegta, pielietojot fazi-CAC algoritmu. Pakešu zudumu un pakešu aizturu trīces vērtības joprojām bija zemākas par QoS degradācijas ierobežojumos definētām vērtībām, un, veidojot fazi-CAC lēmējsistēmas struktūru, kas ļautu pietuvoties QoS degradācijas ierobežojumiem šiem parametriem, pakešu aiztures vienmēr kļuva lielākas par degradācijas ierobežojumu 33 ms.

Eksperimentālā fazi-CAC realizācijas parāda, ka

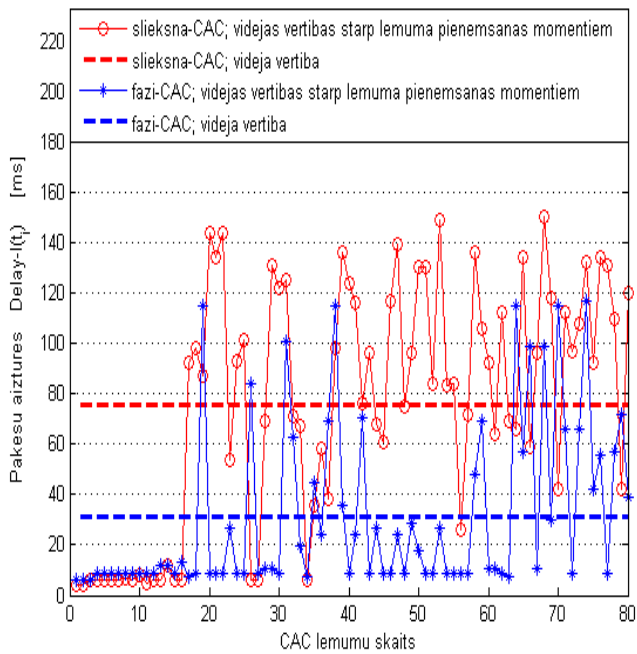
- salīdzinot ar klasisko sliekšņa-CAC, linka utilizācija (RSVP-TE rezervētie resursi), pielietojot fazi-CAC:
  - samazinās par  $\approx 10\%$  optimistiska scenārija gadījumā (17. att.);
  - samazinās par  $\approx 15\%$  pesimistiska scenārija gadījumā (18. att.).
- pakešu aiztures starp LERin un LERout, pielietojot fazi-CAC:
  - samazinās  $\approx 2,3$  reizes optimistiska scenārija gadījumā (19. att.);
  - samazinās  $\approx 2,6$  reizes pesimistiska scenārija gadījumā (20. att.).



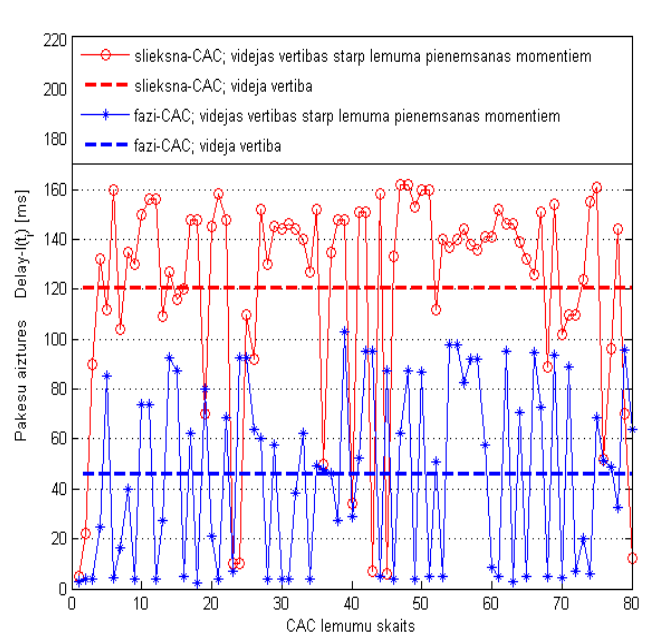
17. att. Linka utilizācija / LSP tuneļu RSVP-TE rezervēti resursi – optimistiskais scenārijs



18. att. Linka utilizācija / LSP tuneļu RSVP-TE rezervēti resursi – pesimistiskais scenārijs

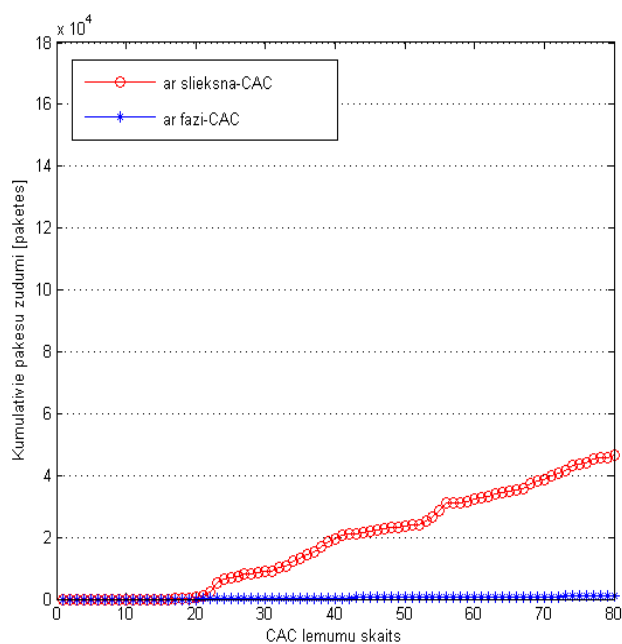


19. att. Pakešu aiztures tīklā – vidējās vērtības starp lēmumu pieņemšanas momentiem un 3000 lēmumu vidējās vērtības – optimistiskais scenārijs

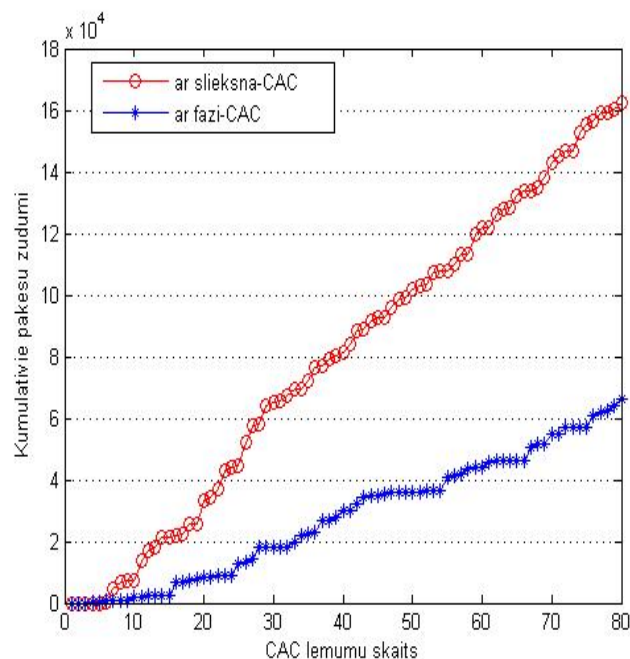


20. att. Pakešu aiztures tīklā – vidējās vērtības starp lēmumu pieņemšanas momentiem un 3000 lēmumu vidējās vērtības – pesimistiskais scenārijs

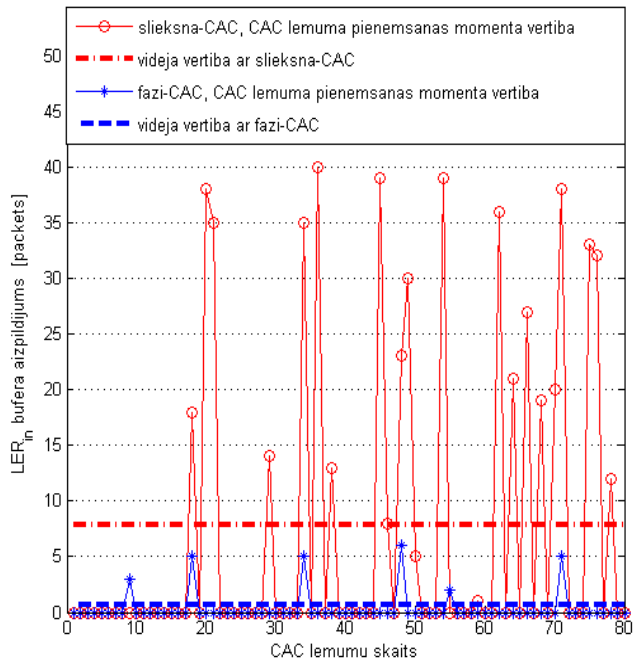
- pakešu kumulatīvie zudumi starp LERin un LERout, pielietojot fazi-CAC:
  - samazinās  $\approx 30$  reizes optimistiska scenārija gadījumā (21. att.);
  - samazinās  $\approx 3$  reizes pesimistiska scenārija gadījumā (22. att.).
  
- LERin bufera aizpildījums, pielietojot fazi-CAC:
  - samazinās  $\approx 8$  reizes optimistiska scenārija gadījumā (23. att.);
  - samazinās  $\approx 2$  reizes pesimistiska scenārija gadījumā (24. att.).
  
- Pakešu aizturu trīce starp LERin un LERout, pielietojot fazi-CAC:
  - samazinās  $\approx 5$  reizes optimistiska scenārija gadījumā (25. att.);
  - samazinās  $\approx 3$  reizes pesimistiska scenārija gadījumā (26. att.).



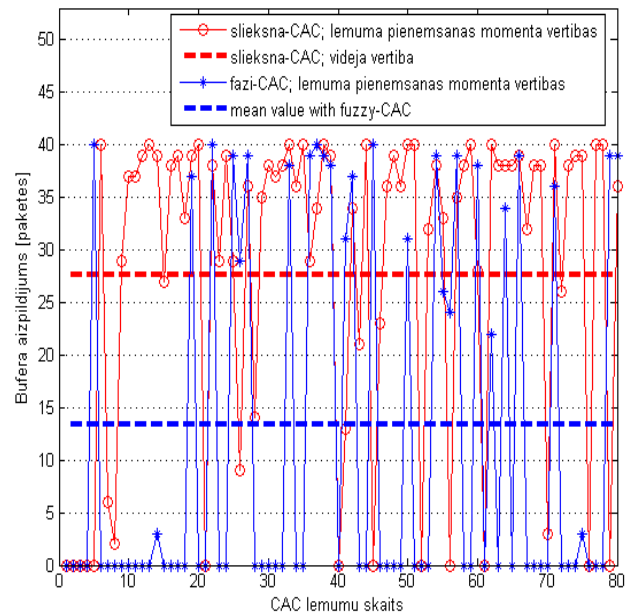
21. att. Pakešu zudumu kumulatīvā sadalījuma statistika – optimistiskais scenārijs



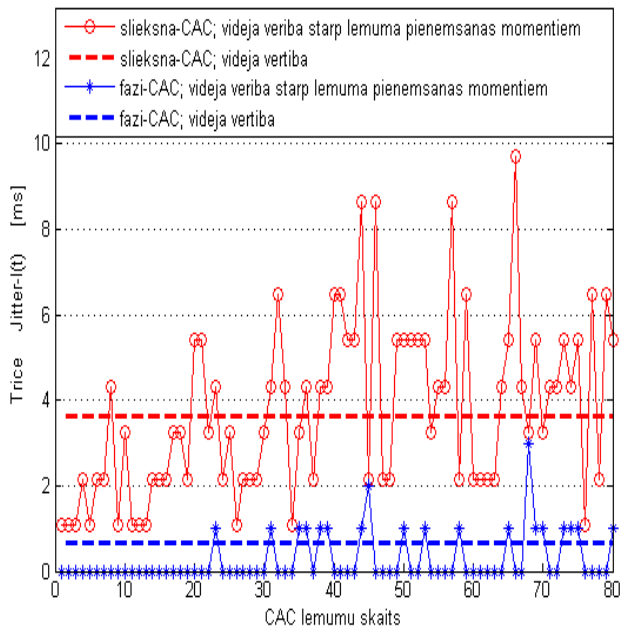
22. att. Pakešu zudumu kumulatīvā sadalījuma statistika – pesimistiskais scenārijs



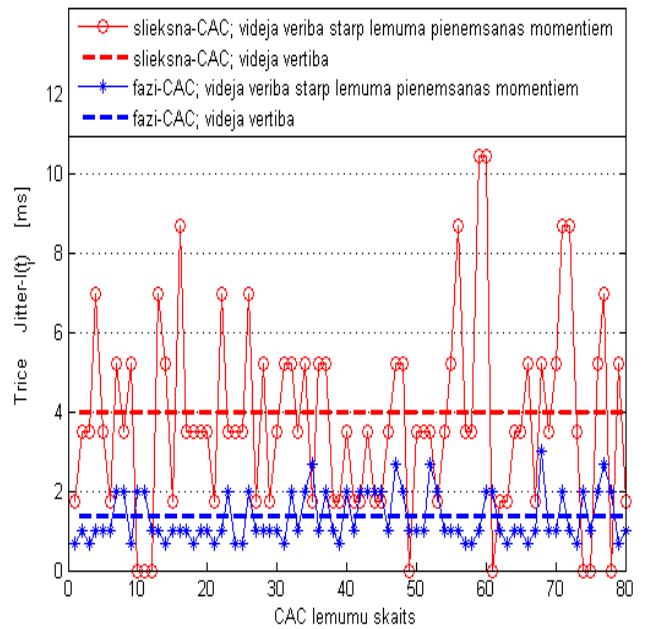
23. att. LSRin maršrutētāja bufera aizpildījuma momentānās un vidējā vērtība.  
 Bufera izmērs – 40 paketes – optimistiskais scenārijs



24. att. LSRin maršrutētāja bufera aizpildījuma momentānās un vidējā vērtība.  
 Bufera izmērs – 40 paketes – pesimistiskais scenārijs



25. att. Trīces vērtības CAC lēmuma pieņemšanas brīdī – optimistiskais scenārijs



26. att. Trīces vērtības CAC lēmuma pieņemšanas brīdī – pesimistiskais scenārijs

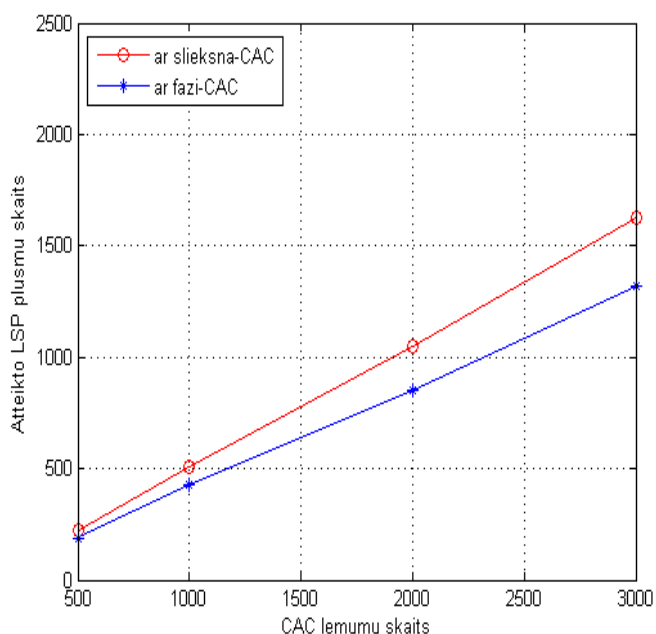
Zemāk ir doti salīdzinoši eksperimentālie dati par fazi-CAC un klasiskā sliekšņa CAC darbību raksturojošiem QoS parametriem 3000 lēmumiem pesimistiskā un optimistiskā scenārija gadījumā (Tabulas 2 un 3).

2. Tabula

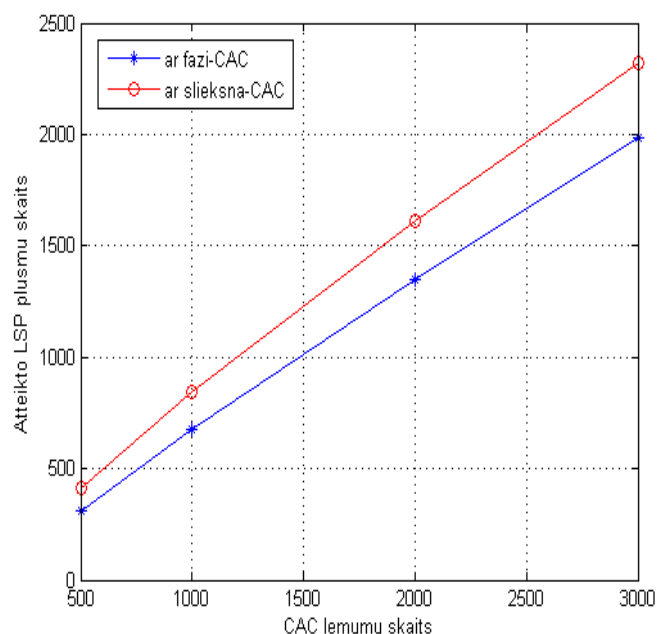
Eksperimenta rezultāti 3000 lēmumiem – optimistiskais scenārijs – vidējās parametru vērtības		
Parametrs	Sliiekšņa-CAC	Fazi-CAC
Linka vidējā utilizācija	<b>0,94</b>	<b>0,84</b>
Pakešu zudumi	<b>3,10 %</b>	<b>0,10 %</b>
Trīce	<b>3,3 ms</b>	<b>0,6 ms</b>
Bufera aizpildījums	<b>8 paketes</b>	<b>1 pakete</b>
Pakešu aiztures	<b>77 ms</b>	<b>33 ms</b>

3. Tabula

Eksperimenta rezultāti 3000 lēmumiem – pesimistiskais scenārijs – vidējās parametru vērtības		
Parametrs	Sliiekšņa-CAC	Fazi-CAC
Linka vidējā utilizācija	<b>0,97</b>	<b>0,82</b>
Pakešu zudumi	<b>11,80 %</b>	<b>3,90 %</b>
Trīce	<b>4,0 ms</b>	<b>1,3 ms</b>
Bufera aizpildījums	<b>28 paketes</b>	<b>14 paketes</b>
Pakešu aiztures	<b>121 ms</b>	<b>46 ms</b>

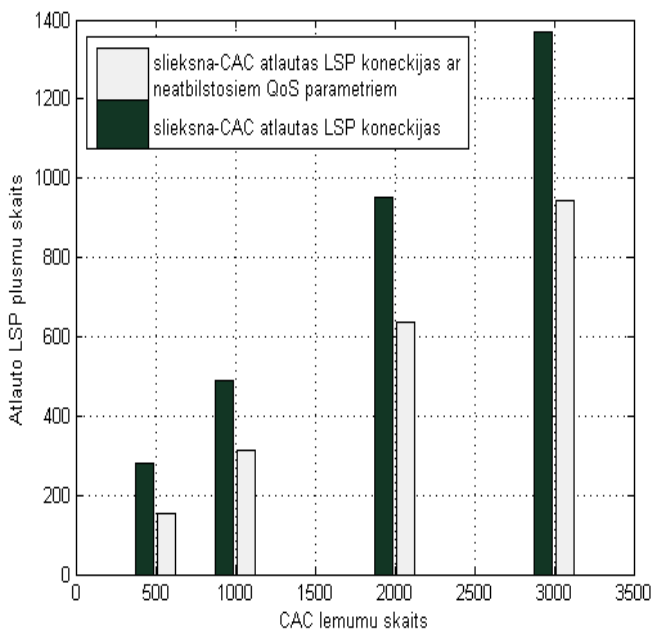


27. att. Atteikto LSP plūsmu skaits sliekšņa-CAC un fazi-CAC gadījumā – optimistiskais scenārijs

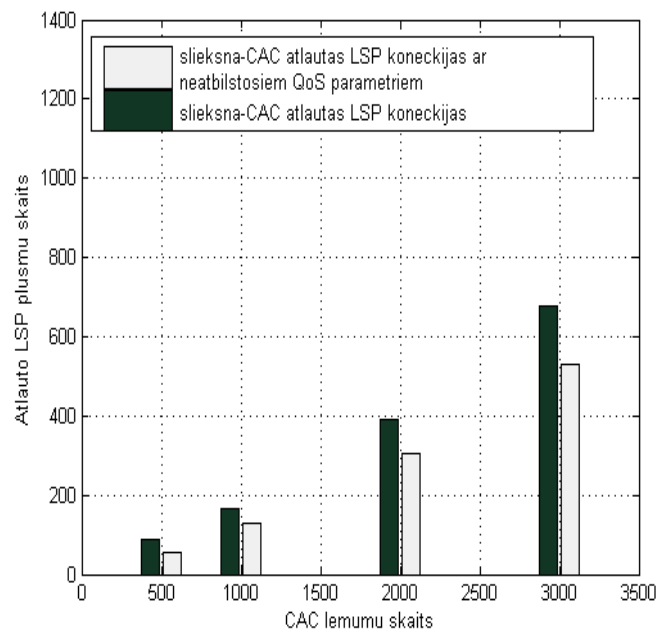


28. att. Atteikto LSP plūsmu skaits sliekšņa-CAC un fazi-CAC gadījumā – pesimistiskais scenārijs

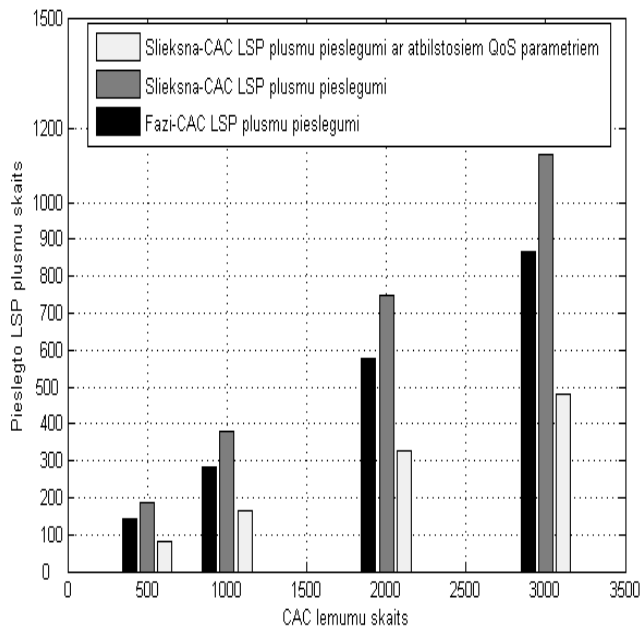
- Atteikto LSP plūsmu skaits, pielietojot fazi-CAC:
  - samazinās par  $\approx 15\%$  optimistiska scenārija gadījumā (27. att.);
  - samazinās par  $\approx 18\%$  pesimistiska scenārija gadījumā (28. att.).
  
- Sliekšņa-CAC:
  - $\approx 60\%$  gadījumos pieslēdz LSP plūsmas, kuras tiek atteiktas fazi-CAC gadījumā (optimistiskais scenārijs) (29. att.);
  - $\approx 80\%$  gadījumos pieslēdz LSP plūsmas, kuras tiek atteiktas fazi-CAC gadījumā (pesimistiskais scenārijs) (30. att.).



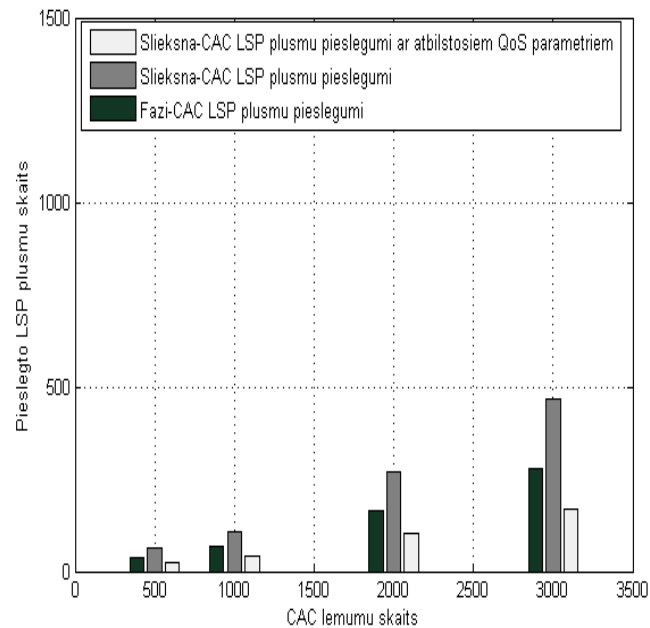
29. att. Sliekšņa-CAC visu atļauto konekciju salīdzinājums ar sliekšņa-CAC atļautām konekcijām ar neatbilstošiem QoS parametriem – optimistiskais scenārijs



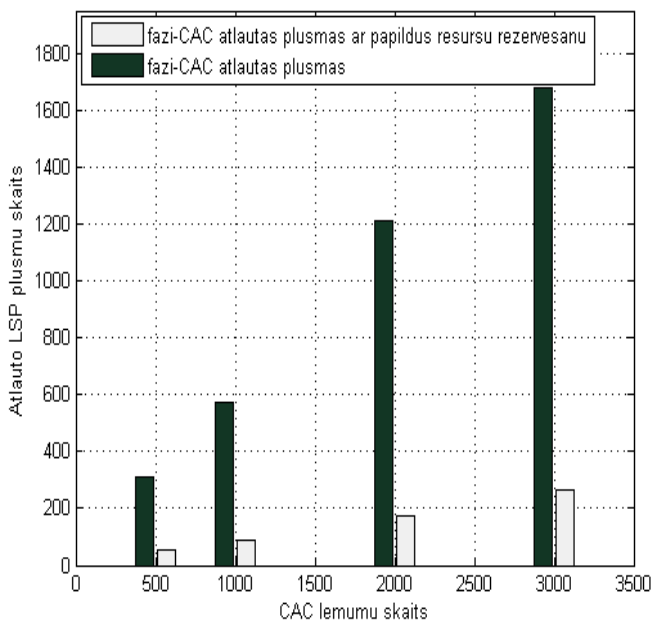
30. att. Sliekšņa-CAC visu atļauto konekciju salīdzinājums ar sliekšņa-CAC atļautām konekcijām ar neatbilstošiem QoS parametriem – pesimistiskais scenārijs



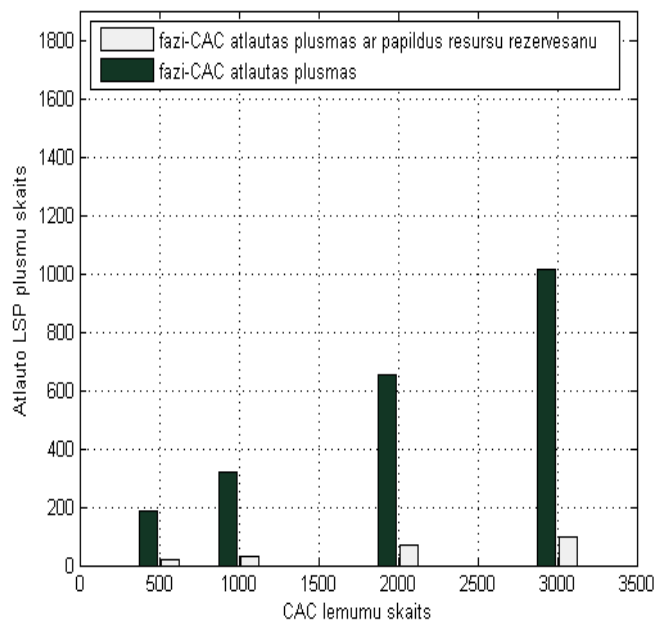
31. att. LSP plūsmu pieslēgumi fazi-CAC un sliekšņa-CAC gadījumā ar neatbilstošiem QoS parametriem – optimistiskais scenārijs



32. att. LSP plūsmu pieslēgumi fazi-CAC un sliekšņa-CAC gadījumā ar neatbilstošiem QoS parametriem – pesimistiskais scenārijs



33. att. Fazi-CAC atļautās LSP plūsmas un LSP plūsmas ar papildu resursu rezervēšanu – optimistiskais scenārijs



34. att. Fazi-CAC atļautās LSP plūsmas un LSP plūsmas ar papildu resursu rezervēšanu - pesimistiskais scenārijs

- Pielietojot fazi-CAC:
  - tiek pieslēgts vidēji par  $\approx 76\%$  vairāk prioritāro LSP plūsmu optimistiska scenārija gadījumā (31. att.);
  - tiek pieslēgts vidēji par  $\approx 60\%$  vairāk prioritāro LSP plūsmu pesimistiska scenārija gadījumā (32. att.).
  
- Pielietojot fazi-CAC:
  - ar papildus resursu rezervēšanu tie pieslēgtas  $\approx 15\%$  no visām atļautām plūsmām – optimistiska scenārija gadījumā (33. att.);
  - ar papildus resursu rezervēšanu tie pieslēgtas  $\approx 10\%$  no visām atļautām plūsmām – pesimistiska scenārija gadījumā (34. att.).

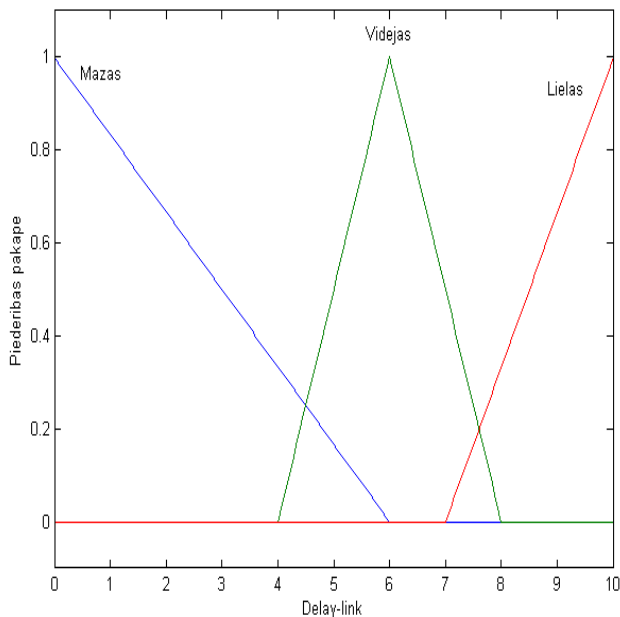
## Ceturrtā nodaļa

Tā kā Fazi-CAC lēmējsistēma nodrošina lēmuma pieņemšanu apstākļos, kad tīkla parametru vērtības un trafika kopējais raksturs ir lielā mērā neparedzams, ir jāpēta fazi-CAC algoritma adaptācijas mehānismi, kas nodrošinātu efektīvas algoritma pielāgošanas spējas ātri mainīgajai ārējai videi.

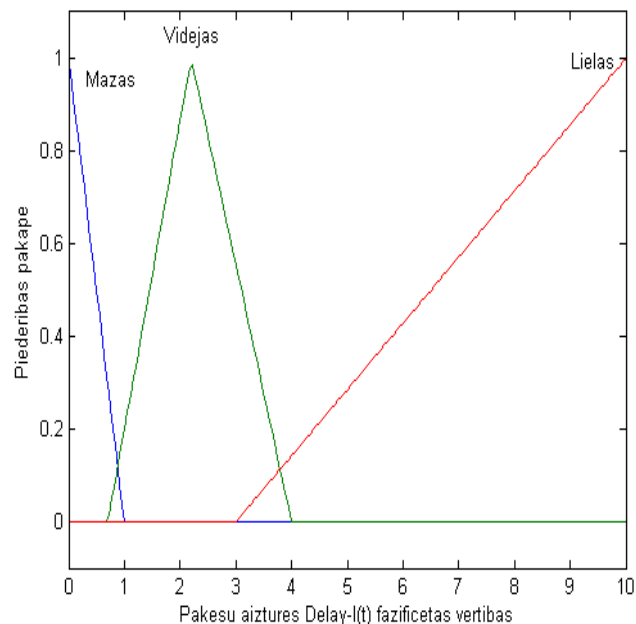
### *Piederības funkciju deklarāciju modifikācijas*

Šī eksperimenta mērķis ir mainīt ieejas parametru lingvinistisko mainīgo piederības funkciju deklarācijas pētāmajā fazi-CAC sistēmā ar nolūku modificēt kopējo fazi-CAC algoritma lēmuma pieņemšanas raksturu. Tas dos iespēju palielināt fazi-CAC selektivitāti attiecībā uz jauno LSP tuneļu izveidi datu plūsmu transportam caur datu linku, nemainot IF-THEN kārtulu zināšanu bāzi.

Tātad, lai padarītu fazi-CAC vadības politiku vairāk selektīvu, mēs varam modificēt kādu no iepriekš dotās fazi izvedumu sistēmas ieejas parametru lingvinistisko mainīgo piederības funkciju deklarācijām. Šajā gadījumā, lai padarītu fazi-CAC algoritma darbību vairāk selektīvu un mazinātu QoS parametru degradāciju, tiks iznalizēta  $Delay_l(t_i)$  mainīgā ietekme uz lēmuma pieņemšanas loģiku, mainot tā deklarāciju šādā veidā (35. un 36. att.).



35. att.  $\text{Delay}_l(t_i)$  ieejas parametra lingvinistisko mainīgo piederības funkciju deklarācijas pirms modifikācijas

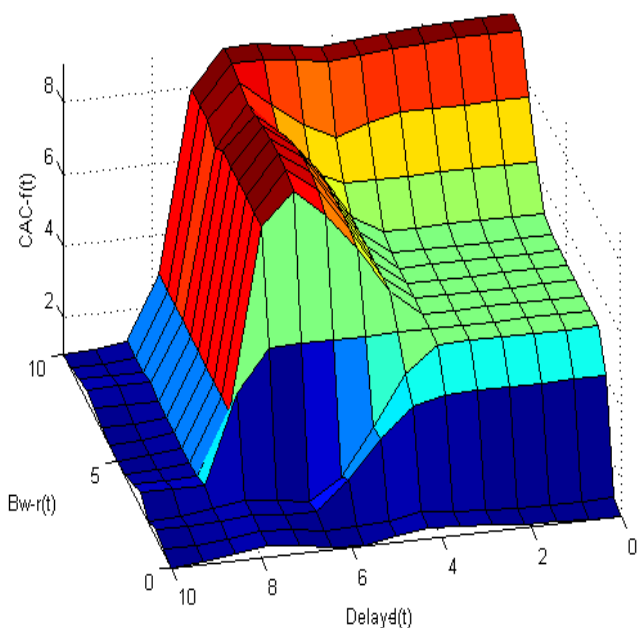


36. att.  $\text{Delay}_l(t_i)$  ieejas parametra lingvinistisko mainīgo piederības funkciju deklarācijas pēc modifikācijas

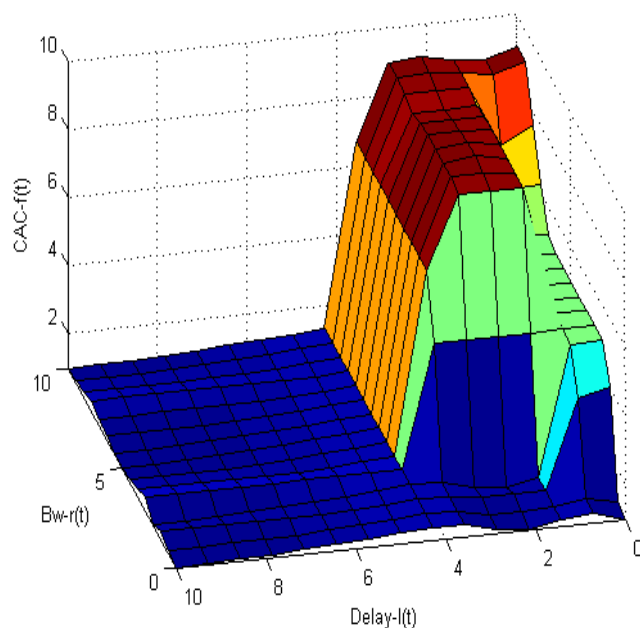
Rezultātā lielākā daļa fazificēto  $\text{Delay}_l(t_i)$  ieejas mainīgā vērtību fazi izvedumu laikā tiks klasificētas kā „lielas”. Tas savukārt nozīmē, ka tās IF-THEN kārtulas, kas definē konkrētās fazi algoritma atbildes gadījumā, kad  $\text{Delay}_l(t_i)$  ir „lielas”, kļūs noteicošās lēmuma pieņemšanas brīdī.

Mainīgais  $\text{Delay}_l(t_i)$  tika izvēlēts, jo tam ir definēta liela ietekme konkrētās fazi sistēmas IF-THEN kārtulu zināšanu bāzē, un tas ļoti labi attēlo veikto izmaiņu ietekmi uz kopējo fazi-CAC fazi izvedumu sistēmas darbības efektivitāti.

Tālāk ir doti modificētās fazi izvedumu sistēmas lēmumu virsmu attēli (37. un 38. att.), kas parāda lēmumu virsmas pirms un pēc lingvinistisko mainīgo piederības funkciju modifikācijas.



37. att. Delay\_l(t<sub>i</sub>) un Bw\_r(t<sub>i</sub>) ieejas mainīgo fazi-CAC lēmuma pieņemšanas virsma pirms Delay\_l(t<sub>i</sub>) lingvinistisko mainīgo piederības funkciju modifikācijas



38. att. Delay\_l(t<sub>i</sub>) un Bw\_r(t<sub>i</sub>) ieejas mainīgo fazi-CAC lēmuma pieņemšanas virsma pēc Delay\_l(t<sub>i</sub>) lingvinistisko mainīgo piederības funkciju modifikācijas

#### 4. Tabula

Eksperimenta rezultāti 3000 lēmumiem – vidējās parametru vērtības		
Parametrs	Fazi-CAC pirms modifikācijas	Fazi-CAC pēc modifikācijas
Linka vidējā utilizācija (RSVP-TE rezervētie resursi)	<b>0,82</b>	<b>0,79</b>
Pakešu zudumi	<b>3,90 %</b>	<b>0,15 %</b>
Trīce	<b>1,3 ms</b>	<b>0,6 ms</b>
Bufera aizpildījums	<b>14 packet</b>	<b>5 packet</b>
Pakešu aiztures	<b>46 ms</b>	<b>29 ms</b>

Analizējot atteikto plūsmu skaitu (4. tabula), varam redzēt, ka fazi-CAC risinājums pēc Delay\_l(t<sub>i</sub>) lingvinistisko mainīgo piederības funkciju modifikācijām rezultātā dod  $\approx 17\%$  atteikto plūsmu skaita pieaugumu.

5. tabula

Atteikto LSP plūsmu skaits		
Lēmumu skaits	Fazi-CAC pirms modifikācijas	Fazi-CAC pēc modifikācijas
500	<b>312</b>	<b>378</b>
1000	<b>679</b>	<b>769</b>
2000	<b>1348</b>	<b>1583</b>
3000	<b>1987</b>	<b>2343</b>

6. tabulā ir parādīti fazi-CAC darbības rezultāti, pieslēdzot LSP plūsmas ar papildus resursu rezervēšanu. Fazi-CAC risinājums pēc  $\text{Delay}_l(t_i)$  lingvinistisko mainīgo piederības funkciju modifikācijām dod  $\approx 55\%$  LSP plūsmu pieslēgumu samazinājumu, kas tiek pieslēgtas ar papildu resursu rezervēšanu. Fazi-CAC palielināta LSP plūsmu pieslēgumu selektivitāte veicina lielāku LSP plūsmu atteikumu skaitu un QoS prasīgo LSP plūsmu pieslēgumu samazinājumu. Tādā veidā tiek nodrošināta QoS parametru saglabāšana pieļaujamās robežās.

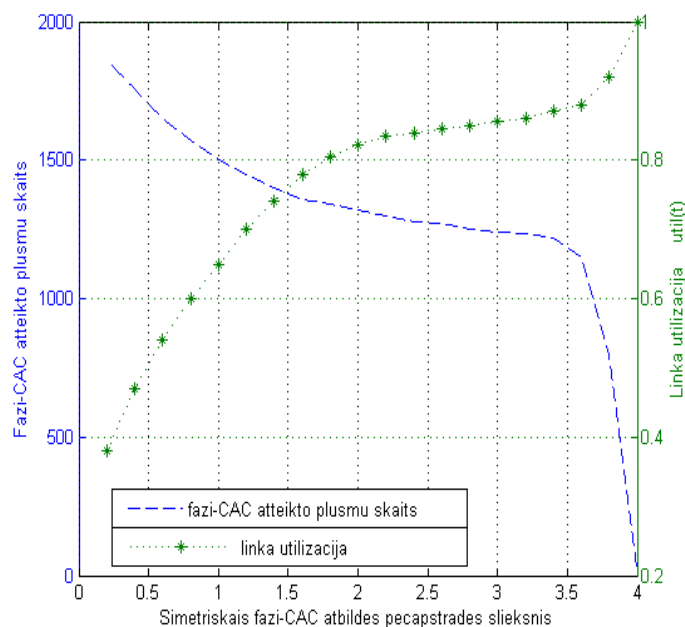
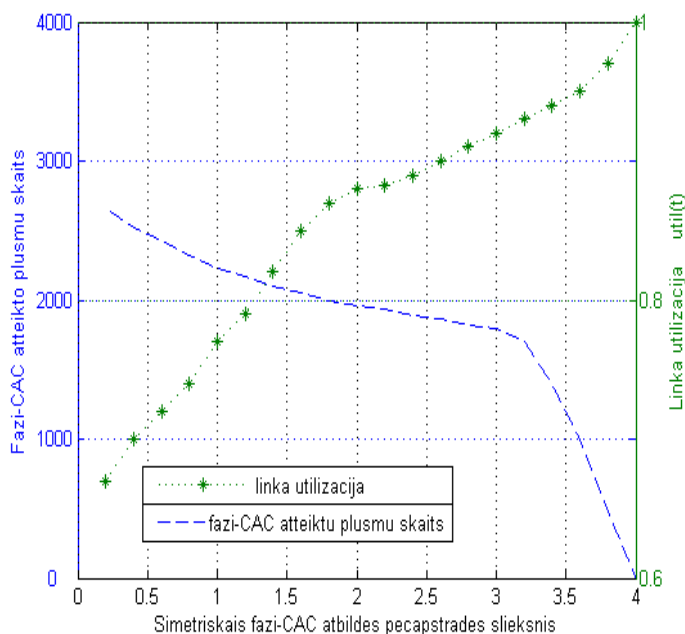
6. tabula

Fazi-CAC pieslēgtas LSP plūsmas ar papildu resursu rezervēšanu		
Lēmumu skaits	Fazi-CAC pirms modifikācijas	Fazi-CAC pēc modifikācijas
500	<b>19</b>	<b>10</b>
1000	<b>32</b>	<b>17</b>
2000	<b>67</b>	<b>41</b>
3000	<b>98</b>	<b>54</b>

### *Lēmuma pieņemšanas sliekšņa modifikācijas*

Dotā pieeja var tikt pieskaitīta pie fazi izvedumu sistēmas atbildes pēcapstrādes metodes un tiešā mērā neietekmē fazi interfeisa sistēmas struktūru. Kaut gan šāds fazi-CAC faziloģikas izvedumu sistēmas atbildes pēcapstrādes paņēmiens autora atrastajā literatūrā nekur nav pieminēts, tas, pēc autora domām, dod iespēju ātri un efektīvi tiešsaistes režīmā nodrošināt fazi-CAC algoritma adaptāciju pie mainīgiem datu pārraides apstākļiem. Šādā veidā, nemainot fazi-CAC fazi izvedumu sistēmas darbību, var momentāni veikt kopējo trafika vadības politikas maiņu.

39. attēlā ir parādīti simulācijas rezultāti 3000 fazi-CAC lēmumu gadījumiem, mainot simetrisko sliekšņa s vērtību optimistiskā scenārijā. Savukārt 40. attēlā ir parādīti simulācijas rezultāti 3000 fazi-CAC lēmumu gadījumiem pesimistiskā scenārijā.



39. att. Sliekšņa s vērtības, linka utilizācija un fazi-CAC atteikto plūsmu skaits – optimistiskais scenārijs

40. att. Sliekšņa s vērtības, linka utilizācija un fazi-CAC atteikto plūsmu skaits – pesimistiskais scenārijs

Ir jāatzīmē, ka katras konkrētās fazi izvedumu sistēmas, kā arī tīkla konfigurācijas un tā noslodzes gadījumā, fazi-CAC atbildes pēcapstrādes sliekšņa izmaiņas būs savā ziņā unikālas. Fazi-CAC vadības sistēmu pamatā ir jāveido kaut kas līdzīgs kodeku pakām, kas pašlaik tiek pielietotas personālo datoru multimediju aplikāciju darbības nodrošināšanai. 39. un 40. attēlos parādīti rezultāti var kalpot par pamatu vadības „kartei”, kas spētu nodrošināt sistēmas momentāno pielāgošanu pie ārējiem apstākļiem, tādā veidā nepieļaujot QoS parametru nekontrolējamo degradāciju.

Tomēr ir jāuzsver, ka dotās pēcapstrādes metodes pielietojums var kalpot vienīgi kā īslaicīgās iedarbības instruments, kas ir ātrs un neprasa fazi-CAC fazi izvedumu sistēmas tiešās modifikācijas. Tas var tikt pielietots īslaicīgu trafika plūsmu uzliesmojumu gadījumā, momentāni mazinot jauno LSP plūsmu pieslēgumus ar

nolūku saglabāt QoS parametrus pieļaujamās robežās. Lai precīzi korigētu fazi-CAC algoritma darbību ilglaicīgai darbībai, ir jādefinē trafika vadības politikas konkrēto fazi izvedumu sistēmu veidā, kas var tikt glabātas un modificētas maršrutētājos un pielietotas atkarībā no ārējo apstākļu prasībām.

## **PROMOCIJAS DARBA GALVENIE REZULTĀTI**

Izstrādājot promocijas darbu, ir iegūti šādi galvenie rezultāti.

1. Tika konstatēts, ka, ja RSVP-TE protokola CAC lēmuma pieņemšanas politika MPLS-TE tīklos balstās vienīgi uz linka pieejamo caurlaides joslu, tad šāda pieeja nenodrošina efektīvu trafika vadību MPLS-TE tīklos. Darbā ir atrasts CAC vadības alternatīvs veids, kas balstās uz faziloģisko lēmēj mehānismu un CAC lēmuma pieņemšanas laikā nodrošina vienlaicīgu vairāku QoS parametru analīzi. Tas nodrošina selektīvu LSP tuneļu iestatīšanu attiecībā uz aplikācijas puses QoS prasībām un tīkla QoS raksturojošiem parametriem. Vienlaicīgi tiek nodrošināta QoS parametru saglabāšana pieļaujamās robežās.
2. Uz faziloģisku balstīts CAC risinājums nodrošina mazāku skaitu LSP plūsmu pieslēgumu atteikumu, kā arī lielāku skaitu augsta QoS līmeņa plūsmu pieslēgumus, vienlaicīgi saglabājot QoS parametrus pieļaujamās robežās.
3. Fazi-CAC risinājums ar trim CAC lēmumiem, kas ietver sevī arī LSP plūsmas pieslēgumu ar papildu resursu rezervēšanu, nodrošina proaktīvu trafika vadības politiku, veidojot t.s. „drošības spilvenu” LSP plūsmām, kura „izmērs” ir tieši proporcionāls pieslēgtām augstās prioritātes LSP plūsmām un ļauj saglabāt QoS parametrus pieļaujamās robežās.
4. Fazi-CAC algoritma darbības novērtējums MPLS-TE eksperimentālā tīklā, vadot RSVP-TE protokola resursu rezervēšanu LSP tuneļu iestatīšanas brīžos, parāda, ka arī stipri pārslogotā tīklā uzliesmojošā fona trafika gadījumā fazi-CAC nodrošina selektīvo LSP plūsmu kontroli un mazākus QoS parametru degradācijas lielumus.
5. Tika konstatēts, ka ir iespējams veikt ātru fazi-lēmēj mehānisma atbildes pēcapstrādi, definējot konkrētas fazi-CAC atbildes sliekšņa vērtības, momentāni mainot fazi-CAC algoritma politiku, nemainot ieejas lingvinistisko mainīgo piederības funkcijas un/vai IF-THEN kārtulu zināšanu bāzi.

6. Analizējot iespējamās fazi-CAC lēmējmehānisma tiešsaistes adaptācijas mehānismus, ir konstatēts, ka fazi-CAC algoritma SOM, MOM un LOM izvada piederības funkciju defazifikācijas metodes samazina informācijas daudzumu par IF-THEN kārtulu definētiem lēmumiem un neļauj pielietot fazi-CAC atbildes efektīvu pēcapstrādi.

Rezumējot šo promocijas darbu, gribu uzsvērt, ka iegūtie rezultāti ir daudzsološi. Tie parāda, ka fazi-CAC risinājums RSVP-TE protokola vadībā MPLS-TE tīklos spēj nodrošināt dinamisku un proaktīvu LSP iestatīšanas vadību, saglabājot QoS parametrus definētajās robežās. Autora piedāvātais fazi-CAC vadības risinājums ir praktiski realizēts uz MPLS-TE maršrutēšanas iekārtas, radot eksperimentālo produktu.

Šī promocijas darba autors izvirza šādas nākotnes pētījumu tēmas:

- Fazi-CAC multiagentu slēgumā;
- Fazi-CAC adaptācijas mehānismi;
- Fazi-CAC FIS struktūras automātiskā ģenerācija;
- Fazi-CAC FIS IF-THEN kārtulu zināšanu bāzes automātiskā izveide.

## LITERATŪRA

- 1 Ali, Z., Sheikh, W., Chong, E.K.P., and Ghafoor, A. A Scalable Call Admission Control Algorithm // *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Sēj. 16,Nr. 2, 2008 , lpp. 424. – 434.
- 2 Antonopoulos, A. and Verikoukis, C. Traffic-Aware Connection Admission Control Scheme for Broadband Mobile Systems // *IEEE Communications Letters*, Sēj. 14,Nr. 8, 2010, lpp. 719. – 721.
- 3 Bobrovs, V. and Ivanovs, Ģ. Investigation of Minimal Channel Spacing in HDWDM Systems // *Electronics and Electrical Engineering, Lithuania, Kaunas* , 2009, lpp. 53. – 56.
- 4 Bobrovs, V. and Ivanovs, Ģ. Investigation of Mixed Data Rate and Format Transmission in WDM Networks // *Electronics and Electrical Engineering, Lietuva, Kaunas*, 2008, lpp. 63. – 66.
- 5 Bobrovs, V., Jeļinskis, J., Ivanovs, Ģ., and Lauks, G. Research of Traffic Management in FTTx Optical Communication Systems // *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, Sēj. 2, 2009, lpp. 41. – 55.
- 6 Bobrovs, V., Ozoliņš, O., Ivanovs, Ģ., and Poriņš, J. Realization of HDWDM Transmission System // *International Journal of Physical Sciences* , Sēj. 5,Nr. 5, 2010, lpp. 452. – 458.
- 7 Cedric, F. Lam. The Outlook of Broadband Optical Access Networks // *Wireless Optical Communication Conference WOCC2008, Taiwan, Pieejams tiešsaistē: <http://www.wocc.org/wocc2008/PDF/O22.pdf>*, 2008.
- 8 Cisco IOS IP Service Level Agreements User Guide // *Cisco Systems, Products White Paper*, 2005.
- 9 Cisco IOS IP SLAs Configuration Guide, Release 12.4, Last Updated: December 8, 2005, lpp. 1. – 12.
- 10 Configuring Cisco IP SLAs UDP Jitter Operation // *Cisco Systems, Inc. Products White Paper* , August, 2006.
- 11 Denise, M., Bevilacqua, Masi, and Fischer, J. Martin. Modeling Internet Service Provider Backbone Networks // *The Telecommunications Review NP2007-026 Noblis*, Sēj. 18, 2007, lpp. 91. – 103.
- 12 Farooq, A and Gad, M. Applications of Fuzzy Logic in Engineering Problems // *Proc of Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society*, 2001.
- 13 Girard, Andre. Broadband and FTTx - What has been done? Where is it going? // *IEEE LEOS NEWSLETTER - Special Feature on FTTx*, Aprīlis 2008, lpp. 4. – 12.
- 14 Harhira, H.A. Pierre, S. A Mathematical Model for the Admission Control Problem in MPLS Networks with End-to-End delay guarantees // *ICCCN 2007. Proceedings of 16th International*

- Conference on Computer Communications and Networks*, 2007, lpp. 1193. – 1197.
- 15 Hyperconnectivity and the Approaching Zettabyte Era // *Part of the Cisco® Visual Networking Index (VNI)*, Pieejams tiešsaitē: <http://www.cisco.com>, June 2 2010.
- 16 INTERNAP SERVICE LEVEL AGREEMENT. Pieejams tiešsaitē: <http://www.internap.com/best-customer-support/sla/>.
- 17 Ivanovs, Ģ., Ļašuks, I., and Ščemeļevs, A. A Hybrid TDM/WDM-PON System with Fwm-Generated Source of Multiwavelength Optical Signals // *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, Sēj. 5, 2010, lpp. 3. – 14.
- 18 Kulikovs, M. Petersons, E. Sharkovsky, S. Adaptive traffic measurement for MBAC system // *19th Annual Wireless and Optical Communications Conference (WOCC), Shanghai*, 2010, lpp. 1. – 5.
- 19 Kuļikovs, M. and Pētersons, E. Real-Time Traffic Analyzer for Measurement-Based Admission Control // *Proceeding of The Fifth Advanced International Conference on Telecommunications AICT2009, Venice/Mestre, Italy*, 2009, lpp. 72. – 75.
- 20 Kuļikovs, M., Pētersons, E., and Šarkovskis, S. Integral measurement process of incoming traffic for Measurement-Based Admission Control // *Proceedings, 2010 IEEE Region 8 International Conference on Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering, Krievija, Irkutska, Listvjanka*, Sēj. 1, 2010, lpp. 183. – 186.
- 21 Msadaa, I.C., Câmara, D., and Filali, F. Scheduling and CAC in IEEE 802.16 Fixed BWNs: A Comprehensive Survey and Taxonomy // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Sēj. 12, Nr. 4, 2010, lpp. 459. – 487.
- 22 Navara, Mirko and Petrik, Milan. Fuzzy Control – Expectations, Current State, and Perspectives // *Computational Intelligence, Theory and Applications International Conference 9th Fuzzy Days in Dortmund, Germany*, 2006, lpp. 667. – 676.
- 23 NNT COMMUNICATIONS SERVICE LEVEL AGREEMENT. Internets. - <http://www.eu.ntt.com/en/products/global-network/transit/sla-of-global-ip-network.html>.
- 24 QUEST SERVICE LEVEL AGREEMENT. Pieejams tiešsaitē: [http://www.qwest.com/legal/docs/Qwest\\_iQ\\_Networking\\_SLA\\_\\_09\\_14\\_10\\_.pdf](http://www.qwest.com/legal/docs/Qwest_iQ_Networking_SLA__09_14_10_.pdf).
- 25 Resende, R.A., Rossi, S.M., Yamakami, A., Bonani, L.H., and Moschim, E. Traffic engineering with MPLS using fuzzy logic for application in IP networks // *FUZZ - The 12th IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Sēj. 2, 2003, lpp. 1146. – 1151.
- 26 SPRINT NETWORKS SERVICE LEVEL AGREEMENT. Pieejams tiešsaitē: [https://www.sprint.net/sla\\_performance.php?network=sl](https://www.sprint.net/sla_performance.php?network=sl).
- 27 Stevens-Navarro, E., Mohsenian-Rad, A.H., and Wong, V. Connection Admission Control for Multiservice Integrated Cellular/WLAN System // *IEEE Transactions on Vehicular*

- Technology*, Sēj. 57, Nr. 6, 2008, lpp. 3789. – 3800.
- 28 Tychon, Emmanuel. Advanced Performance Measurement with Cisco IOS IP SLA // *Cisco Systems internal documentation*, October 2006.
- 29 VERIO SERVICE LEVEL AGREEMENT. Pieejams tiešsaitē: <http://www.verio.com/about/sla/global-ip/>.
- 30 Zadeh, L.A. A fuzzy-algorithmic approach to the definition of complex or imprecise concepts // *International Journal of Man-Machine Studies*, Sēj. 8, 1976, lpp. 246. – 291.
- 31 Zadeh, L.A. A fuzzy-set theoretic interpretation of linguistic hedges // *Journal of Cybernetics*, Sēj. 2, 1972, lpp. 4. – 34.
- 32 Zadeh, L.A. A new direction in AI. Towards a computational theory of perceptions // *AI Magazine*, Sēj. 22, Nr. 1, 2001, lpp. 73. – 84.
- 33 Zadeh, L.A. Calculus of fuzzy restrictions // In Zadeh L.A., Fu K.S., Tanaka K. Shimura M., ed., *Fuzzy Sets and Their Applications to Cognitive and Decision Processes*. Academic Press, New York, 1975, lpp. 1. – 39.
- 34 Zadeh, L.A. From computing with numbers to computing with words – from manipulation of measurements to manipulation of perceptions // *IEEE Trans. on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications*, Sēj. 45, Nr. 1, 1999, lpp. 105. – 119.
- 35 Zadeh, L.A. Fuzzy logic = computing with words // *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, Sēj. 4, 1996, lpp. 103. – 111.
- 36 Zadeh, L.A. Fuzzy logic and its application to approximate reasoning // *Information Proc.*, Sēj. 74, 1974, lpp. 591. – 594.
- 37 Zadeh, L.A. Fuzzy logic and the calculi of fuzzy rules and fuzzy fraphs: a precis // *Multiple Valued Logic*, Sēj. 1, 1996, lpp. 1. – 38.
- 38 Zadeh, L.A. Fuzzy logic, neural networks and soft computing // *Commun. Of the ACM*, Sēj. 37, 1994, lpp. 77. – 84.
- 39 Zadeh, L.A. Fuzzy sets and information granularity // In Grupta M., Ragade R., Yager R., ed., *Advances in Fuzzy Set Theory and Applications*. North Holland, Amsterdam, 1979, lpp. 3. –18.
- 40 Zadeh, L. A. Fuzzy Sets. // *Information and Control*, Sēj. 8, 1965, lpp. 338. – 353.
- 41 Zadeh, L.A. New Frontiers in Fuzzy Logic and Soft Computing // *Proc. Of Fourth Conference, Neural Networks and Their Application, Zakopane, Poland*, 1999, lpp. 1. – 4.
- 42 Zadeh, L.A. On the analysis of large scale systems // In H., Gottinger, ed., *Systems Approaches and Environment Problems*. Vandenhoeck and Ruprecht, 1974, lpp. 23. – 37.

- 43 Zadeh, L.A. Outline of a computational approach to meaning and knowledge representation based on a concept of a generalized assignment statement // In Thoma M., Wyner A., ed., *Proceedings of the International Seminar on Artificial Intelligence and Man-Machine Systems*. Springer-Verlag, Heidelberg, 1986, lpp. 198. – 211.
- 44 Zadeh, L.A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes // *IEEE Trans. On Systems, Man, and Cybernetics*, Sēj. SMC-3, Nr. 1, 1973, lpp. 28. – 44.
- 45 Zadeh, L.A. Outline of computational theory of perceptions based on computing with words // In Sinha N.K., Gupta M.M., ed., *Soft Computing and Intelligent Systems: Theory and Applications*. Academic Press, San Diego, New York, Tokio, 2000, lpp. 3. – 22.
- 46 Zadeh, L.A. Similarity relations and fuzzy orderings // *Information Science*, Sēj. 3, 1971, lpp. 177. – 200.
- 47 Zadeh, L.A. Test-score semantics for natural language and meaning representation via PRUF // In B., Rieger, ed., *Empirical Semantics*. Germany, 1981, lpp. 281. – 349.
- 48 Zadeh, L.A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning // *Information Science*, Sēj. 8, Nr. I, 1975, lpp. 199. – 249.
- 49 Zadeh, L.A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning // *Information Science*, Sēj. 8, Nr. II, 1975, lpp. 301. – 357.
- 50 Zadeh, L.A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning // *Information Science*, Sēj. 9, Nr. III, 1975, lpp. 43. – 80.
- 51 Zadeh, L.A. The role of fuzzy logic in the management of uncertainty in expert systems // *Fuzzy sets and systems*, Sēj. 11, 1983, lpp. 199. – 227.
- 52 Zadeh, L.A. Towards a Theory of Fuzzy Systems // In N, Kalman R.E. and DeClaris, ed., *Aspects of Network and System Theory*. Rinehart and Winston, New York, 1971.
- 53 Zadeh, L.A. Towards the theory of fuzzy information granulation and its centrality in human reasoning and fuzzy logic // *Fuzzy Sets and Systems*, Sēj. 90, 1997, lpp. 1. – 4.
- 54 Zhang, S., Yu, F.R., and Leung, V.C.M. Joint connection admission control and routing in IEEE 802.16-based mesh networks // *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Sēj. 9, Nr. 4, 2010, lpp. 1370. – 1379.
- 55 Zhu, Rongbo and Liu, Xiaozhu. Effective CAC Scheme in IEEE 802.11e Wireless LANs // *Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, International Symposium on Microwave Antenna, Hangzhou*, 2007, lpp. 164. – 167.
- 56 Гольдштейн, А.Б. and Гольдштейн, Б. С. Технология и протоколы MPLS // *BHV-Санкт-Петербург*, 2005, 304. lpp.

