



RĪGAS TEHNISKĀ
UNIVERSITĀTE

Inga Vagale

INTERNETA PAKALPOJUMA KVALITĀTES NOVĒRTĒŠANAS UN UZRAUDZĪBAS METODIKAS IZSTRĀDE

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Elektronikas un telekomunikāciju fakultāte

Telekomunikāciju institūts

Inga Vagale

Doktora studiju programmas “Telekomunikācijas” doktorante

INTERNETA PAKALPOJUMA KVALITĀTES NOVĒRTĒŠANAS UN UZRAUDZĪBAS METODIKAS IZSTRĀDE

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji:

profesors *Dr. sc. ing.*

ĢIRTS IVANOVŠ

profesors *Dr. sc. ing.*

VJAČESLAVS BOBROVS

RTU Izdevniecība

Rīga 2022

Vagale I. Interneta pakalpojuma kvalitātes novērtēšanas un uzraudzības metodikas izstrāde. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2022. – 33 lpp.

Iespiests saskaņā ar 2022. gada 4. marta promocijas padomes “RTU P-08” lēmumu, protokols Nr. 7

<https://doi.org/10.7250/9789934227721>
ISBN 978-9934-22-772-1 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2022. gada 3. jūnijā plkst. 11 Rīgas Tehniskās universitātes Elektronikas un telekomunikāciju fakultātē, Āzenes ielā 12, 201. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Jurgis Poriņš,
Rīgas Tehniskā universitāte

Pētnieks *Dr. sc. ing.* Aleksejs Udaļcovs,
RISE – Zviedrijas pētniecības institūts, Zviedrija

Profesors *Dr. habil. sc. comp.* Juris Borzovs,
Latvijas Universitāte, Latvija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājusi šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Inga Vagale (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir piecas nodaļas, secinājumi un kopsavilkums, literatūras saraksts, 91 attēls, 27 tabulas, trīs pielikumi, kopā 161 lappuse. Literatūras sarakstā ir 116 nosaukumu.

ANOTĀCIJA

Mūsdienās liela daļa sabiedrībai nozīmīgu pakalpojumu ir pieejama un izmantojama ar interneta starpniecību, tādējādi palielinot interneta pakalpojuma pieejamības lomu iedzīvotāju sociālās un ekonomiskās līdzdalības sabiedrībā sekmēšanā. Veiktie pētījumi un prognozes attiecībā uz interneta pakalpojuma lietošanu paredz ievērojamu pārraidīto datu apjoma pieaugumu turpmākajos gados, ko tostarp ietekmēs jaunu satura pakalpojumu attīstība un ieviešana. Ņemot vērā gan interneta pakalpojuma nozīmi, gan tā izmantošanas tendences, Eiropas Savienības līmenī ir izstrādāta stratēģija un noteiktas attiecīgas prasības platjoslas interneta pieejamības un tā atbilstošas kvalitātes sekmēšanai.

Promocijas darbā ir novērtēts platjoslas interneta kvalitātes uzraudzības un attīstības veicināšanas ietvars, kā arī identificētas ar to saistītās nepilnības vai faktiskās piemērojamības problēmaspekti. Veikts pētījums par interneta kvalitātes rādītāju novērtējumu no galalietotāju skatpunkta un, pamatojoties uz matemātisko analīzi, izstrādāta koncepcija faktisko interneta pakalpojuma kvalitātes vērtību noteikšanai un atspoguļošanai. Īpašs uzsvars darbā likts uz objektīvu pieslēguma ātruma rādītāju novērtēšanas metožu noteikšanu un mērīšanas principu definēšanu. Sniegti priekšlikumi nepietiekama platjoslas interneta pārklājuma teritoriju noteikšanai, pamatojoties uz ģeogrāfiskā apsekojumā iegūto informāciju, kas izmantojami platjoslas tīklu izvēršanas un tam nepieciešamo investīciju plānošanai, tādējādi sekmējot universālā pakalpojuma pieejamību valstī. Apkopoti ar platjoslas interneta pakalpojuma kvalitāti saistīti pētījuma rezultāti, sniegti priekšlikumi praktiski lietojamas interneta pakalpojuma kvalitātes novērtēšanas un mērīšanas metodoloģijas ieviešanai.

SATURS

ANOTĀCIJA	4
SAĪSINĀJUMU SARAKSTS.....	6
PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJAIS RAKSTUROJUMS.....	8
Tēmas aktualitāte.....	8
Darba mērķis un uzdevumi.....	10
Pētījumu metodika.....	10
Pētījumu rezultāti un zinātniskā novitāte	11
Promocijas darbā aizstāvamās tēzes	12
Promocijas darba rezultātu aprobācija.....	13
Darba apjoms un struktūra.....	14
PROMOCIJAS DARBA SADAĻU IZKLĀSTS	17
Promocijas darba pirmā nodaļa	17
Promocijas darba otrā nodaļa	18
Promocijas darba trešā nodaļa	19
Promocijas darba ceturtnā nodaļa.....	20
Promocijas darba piektā nodaļa.....	26
PROMOCIJAS DARBA REZULTĀTI.....	29
IZMANTOTĀ LITERATŪRA	31

SAĪSINĀJUMU SARAKSTS

4G – *4th generation mobile network* – mobilā elektronisko sakaru tīkla ceturtnā paaudze

5G – *5th generation mobile network* – mobilā elektronisko sakaru tīkla piektnā paaudze

A

ADSL – *asymmetric digital subscriber line* – asimetriskā ciparu abonentlīnija

B

BEREC – *Body of European Regulators for Electronic Communications* – Eiropas Elektronisko sakaru regulatoru iestāde

C

CN – *core network* – pamattīkls

D

DSL – *digital subscriber line* – ciparu abonentlīnija

DSM – *digital single market* – digitālais vienotais tirgus

E

E2E – *end-to-end* – posms “pieslēguma punkts-pieslēguma punkts”

EC – *edge computing* – mobilā perifērijas skaitļošana

ETSI – *European Telecommunications Standards Institute* – Eiropas Telekomunikāciju standartizācijas institūts

F

FTTH – *fibre to the home* – optiskās šķiedras kabeļu nodrošināšana līdz galalietotājam ar pieslēguma punktu galalietotāja telpā vai galalietotāja telpas robežās

FWA – *fixed wireless access* – fiksētā bezvadu piekļuve

G

GPS – *Global Positioning System* – globālā pozicionēšanas sistēma

GSMA – *Global System for Mobile Communications Association* – globālā mobilo sakaru sistēmu asociācija

I

ITU – *International Telecommunication Union* – Starptautiskā Telekomunikāciju (Telesakaru) savienība

IXP – *Internet exchange point* – interneta apmaiņas punkts (IAP)

M

MOB – *Mobile Network* – mobilais elektronisko sakaru tīkls

O

OAM – *Operations, administration and management* – darbības, administrēšana un vadība

OECD – *Organisation for Economic Cooperation and Development* – Ekonomiskās sadarbības un attīstības organizācija

Q

QoE – *quality of experience* – pieredzes kvalitāte

QoS – *quality of service* – pakalpojumu kvalitāte

R

RAN – *Radio Access Network* – radio piekļuves tīkls

S

SPRK – Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisija

T

TCE – *Trace Collection Entity* – trasējumu ievākšanas vienība

TCP – *Transmission Control Protocol* – pārraides vadības protokols

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Mūsdienās piekļuve internetam ir kļuvusi par neatņemamu cilvēka ikdienas sastāvdaļu. Interneta pieejamība ievērojami ietekmē iedzīvotāju sociālo un ekonomisko līdzdalību sabiedrībā. Interneta pakalpojumam ir nozīmīga loma kopējā iedzīvotāju dzīves līmeņa uzlabošanai, nodrošinot visiem vienlīdzīgas iespējas piedalīties dažādās sabiedriskās dzīves jomās. Piemēram, piekļuve interneta pakalpojumam sniedz iedzīvotājiem iespēju iegūt izglītību, apgūt jaunas prasmes, meklēt darbu, sazināties ar citiem, izmantot e-pakalpojumus, veikt pirkumus un arī komercdarbību internetā u. tml. Tādā veidā ikvienam iedzīvotājam neatkarīgi no viņa atrašanās vietas, finansiālajām iespējām un citiem faktoriem tiek nodrošinātas līdzvērtīgas iespējas. Īpaši būtiski iepriekš minēto aspektu īstenošanas iespējas ir cilvēkiem ar ierobežotām iespējām. Turklāt piekļuve internetam atbalsta visus ekonomiskos sektorus, sekmējot to veiktspēju un radot augsti kvalificētas darbavietas. Platjoslas savienojamība veicina starpvalstu ekonomisko integrāciju un paaugstina iedzīvotāju dzīves līmeni. Iekļaujoša piekļuve interneta pakalpojumam veicina elastības un produktivitātes paaugstināšanu mazo uzņēmumu vidū, kā arī pārredzamāku valsts iestāžu darbību.

Izvērtējot fiksētās un mobilās platjoslas pieslēgumu skaita dinamiku vairāk nekā 10 gadu griezumā, ir vērojams, ka kopumā pasaulē strauji pieaug tieši mobilo pieslēgumu skaits. Latvijā pēdējo 10 gadu laikā ir vērojams septiņkārtējs mobilās platjoslas pieslēgumu skaita pieaugums, savukārt fiksētās platjoslas pieslēguma skaitā pēdējos gados vērojams pat neliels samazinājums [2]. Iemesls šādai tendencei var būt mobilo tehnoloģiju attīstība, nodrošinot arvien ātrākus datu pārraides ātrumus un stabilāku pakalpojumu, kā arī to pieejamība, kas atsevišķos gadījumos nodrošina fiksētā interneta aizvietojamību (piemēram, reti apdzīvotās vietās fiksētā interneta pieslēgums var nebūt pieejams, un tā ierīkošana var būt ekonomiski neizdevīga).

Pēdējās desmitgades laikā ir notikušas ievērojamas izmaiņas interneta pakalpojuma nepieciešamībā, tā datu patēriņā, kā arī savienoto iekārtu klāstā, kas atbilstoši pieprasījumam piedzīvojis izteiktu pieaugumu, tādējādi sekmējot izmaiņas interneta pakalpojuma izmantošanas tendencēs. Līdz ar datu pārraides tehnoloģiju attīstību un interneta pieejamību pieaug arī ar interneta starpniecību nodrošināto pakalpojumu un lietojumprogrammu daudzveidība, kā arī pieprasījums pēc augstākas pakalpojumu kvalitātes, kas rezultējas nepārtraukti pieaugošos pārraidīto datu apjomos [1], [2] un rada pieaugošu pieprasījumu elektronisko sakaru tīkla kapacitātei, kurā tie tiek nodrošināti.

Pieaugot platjoslas interneta nozīmei cilvēku ikdienas dzīvē, īpaši svarīga kļūst platjoslas kvalitāte. Vairāki veiktspējas indikatori atspoguļo platjoslas kvalitātes rādītājus un ietekmē lietotāju saņemto pakalpojumu lietošanu, piemēram, pieslēguma ātrums, datu pārraides aizture jeb latentums, pakešu zuduma biežums un citi. Attīstoties tīkliem un tehnoloģijām, parādās tādi pakalpojumi, kur noteikta kvalitātes līmeņa nodrošināšana ir kritiski svarīga [4], [5].

Lai definētu skaidru vīziju par rādītājiem, uz kuriem jātiecas, 2010. gada Eiropas komisija sagatavoja stratēģiju “EIROPA 2020. Stratēģija gudrai, ilgtspējīgai un integrējošai izaugsmei”. Šī stratēģija bija pirmais dokuments, kurā bija noteikti skaidri mērķi interneta

ātruma un izplatības skaitliskiem rādītājiem, kādi jāasniedz paredzamā nākotnē. Globālā stratēģijas mērķa “sagatavot Eiropas Savienības tautsaimniecību nākamajai desmitgadei” sasniegšanai tikai izvirzītas darbības prioritātes un izveidotas pamatiniciatīvas, kuru mērķis bija kļūt par katalizatoru virzībā uz katras tematiskās prioritātes īstenošanu [6]. Tādējādi pamatiniciatīvas “Digitālā programma Eiropai” mērķis bija paātrināt ātrgaitas interneta pakalpojumu ieviešanu un izmantot vienotā digitālā tirgus priekšrocības, ko tas sniedz mājsaimniecībām un uzņēmumiem [6]. Līdz ar to stratēģijas “Eiropa 2020” un “Digitālā programma Eiropai” noteica, ka līdz 2013. gadam visiem eiropiešiem jābūt sagādātai pamata platjoslai, **līdz 2020. gadam – visiem eiropiešiem jābūt piekļuvei internetam ar ātrumu virs 30 Mbit/s un 50 % vai vairāk Eiropas mājsaimniecību jāabonē interneta pieslēgums ar ātrumu vairāk nekā 100 Mbit/s** [6], [7].

Lai sasniegtu visus stratēģijā “Digitālā programma Eiropai” minētos mērķus, tika aprakstītas pasākumu kopas, kas būtu jāpiemēro gan Eiropas, gan valsts līmenī, lai sasniegtu vēlamu ekonomisko izaugsmi un radītu noturīgu tautsaimniecisku un sabiedrisku labumu, ko nodrošina digitālais vienotais tirgus, kas balstīts uz ātru un īpaši ātru internetu [7].

Turpinot virzību uz digitālo vienoto tirgu un sakaru pakalpojumu attīstību, kā arī ņemot vērā izmaiņas digitālo pakalpojumu lietošanā, kas notika gadu laikā, 2015. un 2016. gadā tika izstrādātas stratēģijas par digitālo vienoto tirgu Eiropā [8] un virzību uz Eiropas gigabitu sabiedrību [9]. Šajās stratēģijās tika precizēti un papildināti jau iepriekš noteiktie stratēģiskie darbības virzieni, lai tie atbilstu aktuālajam digitālo pakalpojumu lietojumam un to turpmākām vajadzībām, kā arī ieteikts pilnveidot un pielāgot tiesisko regulējumu, apvienojot 2002. gada direktīvās noteiktās prasības konsolidētā Eiropas Elektronisko sakaru kodeksā. Jaunās stratēģijas paredzēja arī interneta kvalitātes prasību noteikšanu nākotnei. Digitālās tehnoloģijas attīstās straujiem tempiem, tāpēc tika precizēti arī ātrgaitas interneta rādītāji un tā pieejamība, kas nepieciešama, lai sasniegtu digitālai sabiedrībai atbilstošu tehnoloģiju attīstību. Tādējādi stratēģija par virzību uz Eiropas gigabitu sabiedrību noteica, ka **līdz 2025. gadam visām Eiropas mājsaimniecībām gan laukos, gan pilsētās jābūt pieejamam interneta pieslēgumam ar vismaz 100 Mbit/s lejupeļādes ātrumu, ko var uzlabot līdz gigabitu ātrumam**. Papildus tam līdz 2025. gadam visām pilsētu teritorijām un visām sauszemes transporta maģistrālēm ir jābūt nepārtrauktam 5G pārklājumam [9].

Lai arī stratēģiskie mērķi ir noteikti, nosacījumi, tostarp atsevišķas kvalitātes prasības, kam jāveicina šo mērķu sasniegšana, ir iekļautas, tomēr nav izstrādāts mehānisms, kas ļautu secināt par faktisko attīstības stadiju un nodrošinātu vienotu salīdzinošu rādītāju iegūšanu progresa novērtēšanai. To apliecina gan Komisijas paziņojumā par digitalizācijas programmu paustais, ka **patērētājiem nav pārliecības par tiem sniegto pakalpojumu faktisko ātrumu** [11], gan *BEREC* vadlīnijās par tīklu ģeogrāfisko apsekojumu noteiktais, ka **informācija, kas tiks iegūta ģeogrāfiskā apsekojuma iniciatīvas rezultātā, ir vispārējs rādītājs un nav attiecināms uz lietotāju pieredzi**, kā arī to, ka **šo informāciju ir nepieciešams apstiprināt** [10].

Darba mērķis un uzdevumi

Ņemot vērā interneta pakalpojuma pieejamības nozīmi un nepieciešamību pēc objektīva platjoslas izplatības un tās kvalitātes rādītāju novērtējuma, ir definēts šāds **promocijas darba mērķis** – novērtēt un sniegt priekšlikumus platjoslas attīstības uzraudzības mehānisma piemērošanā un matemātiski pamatotas interneta kvalitātes rādītāju novērtēšanas metodoloģijas izstrādē.

Lai sasniegtu šo mērķi, noteikti vairāki **pamatuzdevumi**.

1. Novērtēt interneta piekļuves pakalpojuma kvalitāti raksturojošos parametrus un noteikt to parametru kopu, kas nodrošina visaptverošu informāciju par galalietotājam nodrošināmo pakalpojuma kvalitātes līmeni, kā arī novērtēt šo parametru minimālos nepieciešamos rādītājus atšķirīgu internetā lietojamo pakalpojumu izmantošanai, tādējādi ļaujot secināt par sagaidāmo lietotāju pieredzes kvalitāti (*QoE*).
2. Izpētīt platjoslas attīstības novērtēšanas iespējas dažādos kvalitātes uzraudzības līmeņos (*QoS-1*, *QoS-2*, *QoS-3*), novērtēt to būtiskākās atšķirības un noteikt to piemērojamības aspektus platjoslas attīstības uzraudzības nodrošināšanai.
3. Izpētīt un novērtēt interneta pakalpojuma novērtējumu ietekmējošos faktoros un interneta darbības principu aspektus, kas jāņem vērā mērīšanas sistēmas funkcionālo prasību definēšanā un kvalitātes rādītāju analīzē un atspoguļošanā.
4. Izmantojot matemātiskos aprēķinus un eksperimentālos mērījumus, definēt interneta ģeogrāfisko mērījumu vietu izlases aprēķinu platjoslas izplatības novērtēšanai.
5. Izmantojot matemātiskos aprēķinus un eksperimentālos mērījumus, veikt interneta kvalitātes mērījumu metodoloģijas izstrādi platjoslas attīstības atspoguļošanai *QoS-2* līmenī.
6. Izstrādāt algoritmu nepietiekamas platjoslas attīstības novērtēšanai un uzraudzībai.
7. Izmantojot matemātiskos aprēķinus un eksperimentālos mērījumus, noteikt atbilstīga platjoslas interneta minimālos kvalitātes rādītājus, ņemot vērā interneta pakalpojuma kvalitātes līmeni, ko valsts teritorijā izmanto lielākā daļa patērētāju.
8. Novērtēt un izstrādāt modeli interneta kvalitātes rādītāju informācijas iegūšanai, izmantojot pakalpojumu sniedzēju rīcībā esošos datus, tādējādi ilgtermiņā nodrošinot pēc iespējas mazāku cilvēkresursu iesaisti platjoslas attīstības rādītāju eksperimentālā novērtēšanā, datu analītiskā apstrādē, sagatavošanā, iesniegšanā un validēšanā.

Pētījumu metodika

Promocijas darba uzdevumu realizācijā un problēmu analīzē veikti eksperimentālie mērījumi, matemātiskie aprēķini, statistikas datu izvērtēšana un skaitliskās simulācijas. Eksperimentāliem mērījumiem izmantota SPRK interneta piekļuves pakalpojuma kvalitātes kontroles sistēma *ITEST*, kas balstīta kompānijas *Visualware Inc.* programmatūras risinājumā un ļauj novērtēt tādas interneta kvalitātes parametrus kā lejupielādes un augšupielādes ātrums, latentums, trīce un pakešu zuduma koeficients. Optimālu mērījumu metožu definēšanai, pamatojoties uz iegūtajiem mērījumu rezultātiem, veikti matemātiskie aprēķini, izmantojot

dažādas statistiskās analīzes metodes. Datu analīzei un skaitliskai simulācijai izmantotas *R* un *Phyton* programmēšanas valodas. Mērījumu datu plūsmas novērošanai izmantota *Wireshark* programmatūra. Lielo datu analītikas algoritma modelēšanai veikta *Hadoop MapReduce* paradigmas izpēte.

Pētījumu rezultāti un zinātniskā novitāte

Promocijas darba praktiskā vērtība un jaunieguvumi

- Izstrādātas koncepcijas, kas tiks izmantotas Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisijas normatīvo aktu izstrādē un tās nodrošinātajā interneta pakalpojuma kvalitātes uzraudzībā, ieviešot definētos principus interneta pakalpojuma kvalitātes novērtēšanas metodikā, kā arī līdzdarbojoties Eiropas Elektronisko komunikāciju regulatoru iestādes darba grupās, noteiktie principi tiks piedāvāti ieviešanai attiecīgajos iestādes izstrādātajos dokumentos, nodrošinot vienotu interneta kvalitātes uzraudzības pieeju Eiropas līmenī.
- Ar interneta pakalpojuma kvalitātes novērtēšanu saistītie aspekti un izpētes rezultātā konstatētie principi ņemti vērā, izstrādājot tehnisko dokumentāciju jaunās Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisijas interneta pakalpojuma kvalitātes mērīšanas sistēmas izstrādei un ieviešanai.
- Izpētīti un piedāvāti faktiskā platjoslas interneta pakalpojuma izplatības un tā kvalitātes novērtēšanas principi un uzraudzības varianti, ņemot vērā pieejamos resursus un prognozēto tehnoloģiju attīstību.
- Izstrādāti ģeogrāfiskā apsekojuma informācijas un salīdzināmības rīka vajadzībām nepieciešamo datu nodrošinājuma principi un apkopotā atspoguļojuma ieviešanas shematisks prototips, nodrošinot vispusīgu informāciju par platjoslas interneta pieejamību Latvijā.

Promocijas darba izstrādē iegūtie nozīmīgākie secinājumi

- Izvērtējot elektronisko sakaru nozares regulējošā ietvara normatīvu klāstu, secināms, ka ir iespējams izveidot konsekventu un vienotu mehānismu uzraudzības metožu ieviešanai un piemērošanai.
- Lai nodrošinātu platjoslas izplatības novērtēšanu, veicinātu tās turpmāku izplatību un atbilstīgas kvalitātes interneta pakalpojuma pieejamību, ir jāpiemēro algoritms, ar ko noteikt ģeogrāfiskās teritorijas, kurās pietiekamā apjomā un kvalitātē iedzīvotājiem nav nodrošināts interneta pieslēgums. Šādu teritoriju noteikšana nodrošinās iespēju plānot un veikt finansiālos ieguldījumus elektronisko sakaru tīkla attīstībā un veicinās plašāku interneta pakalpojuma pieejamību iedzīvotājiem.
- Interneta kvalitātes rādītāju novērtēšana ir būtiska, lai iegūtu skaitlisku mēru kvalitātes interpretēšanai. Tie ļauj izvērtēt elektronisko sakaru tīku attīstības līmeni un salīdzināt to nacionālā un starptautiskā līmenī, nodrošināt pakalpojuma atbilstības novērtēšanu tehnoloģiju standartiem, noteikt pamatotas prasības elektronisko sakaru komersantiem

un nodrošināt lietotāju tiesību aizsardzību. Līdz ar to izstrādāts kvalitātes rādītāju novērtēšanas mehānisms, kas nodrošinās objektīvas, jēgpilnas un salīdzināmas informācijas iegūšanu.

- Lai novērtētu elektronisko sakaru tīkla veiktspēju un platjoslas izplatību, nav pietiekami izmantot datus *QoS-1* līmenī, kas ietver teorētisku informāciju par sniegto interneta pakalpojumu. Secināms, ka teorētiskais interneta pakalpojuma kvalitātes parametru novērtējums var ievērojami atšķirties no faktiskajiem rādītājiem.
- Veicot interneta kvalitātes uzraudzību un kartēšanu mobilajos elektronisko sakaru tīklos *QoS-2* līmenī, ir nepieciešams noteikt skaitlisku un ģeogrāfisku mērījumu izlasi, pēc kuras plānot un veikt interneta kvalitātes mērījumus, tādējādi nodrošinot faktisku situācijas atspoguļojumu noteiktā ģeogrāfiskā mērogā.
- Korektu un objektīvu rezultātu iegūšanai un atspoguļošanai, veicot interneta kvalitātes parametru mērījumus, būtiski ir nodrošināt mērījumu izpildi diennakts laika intervālā ar vismazāko pieslēguma ātruma vērtību novirzi no diennakts vidējās pieslēguma ātruma vērtības. Secināts, ka diennakts laikā no plkst. 9 līdz plkst. 15 lejupielādes ātruma novirze no diennakts vidējā ātruma ir vismazākā un visprecīzāk raksturo vidējo lejupielādes ātrumu noteiktā vietā.
- Lai nodrošinātu atbilstīgu piekļuvi platjoslas internetam, ir nepieciešams noteikt minimālos interneta pakalpojuma pieslēguma ātruma rādītājus, kas nodrošinātu pienācīgu iedzīvotāju sociālās iekļaušanas līmeni un dalību digitālajā ekonomikā un sabiedrībā. Secināts, ka fiksētā tīklā sniegtam interneta pakalpojumam un mobilā tīklā sniegtam interneta pakalpojumam, kas nodrošināts fiksētā pieslēguma vietā, minimālais nodrošināmais lejupielādes ātrums ir vismaz 6 Mbiti/s, augšupielādes ātrums – vismaz 2 Mbiti/s.
- Plānojot interneta kvalitātes uzraudzību nākotnē, plaši izvērsties 5G tehnoloģijas pieslēguma tīklam, kā arī lai nodrošinātu faktisku kvalitātes parametru rādījumu atspoguļošanu 100 m × 100 m poligonā atbilstoši ģeogrāfiskā apsekojuma prasībām, ir nepieciešams izstrādāt kvalitātes novērtēšanas metodoloģiju, kas būs balstīta mobilo operatoru datu analītikā.

Promocijas darba rezultātu izmantošana

Promocijas darba izstrādes laikā iegūtie un pētījumā atspoguļotie rezultāti izmantoti trīs starptautiskos projektos, trīs starpvalstu elektronisko sakaru nozares semināros, kā arī trīs Latvijas regulēšanas ietvara normatīvo aktu izstrādē un pilnveidošanā.

Promocijas darbā aizstāvamās tēzes

1. Izstrādājot vienotu interneta pakalpojuma uzraudzības metodiku, ir iespējams nodrošināt pilnīgu, objektīvu, salīdzināmu un faktiskai situācijai atbilstošu informāciju par platjoslas interneta izplatību, pieejamību un tā kvalitātes līmeni, kas izmantojama dažādu informācijas lietotāju loka vajadzībām.

2. Darbā ir pierādīts, ka pastāv tieša sakarība starp mobilā interneta pakalpojuma mērījumu laiku un noteiktu pakalpojuma kvalitātes parametru vērtībām, kā arī ir noteikts kvalitātes mērījumiem vispiemērotākais diennakts laiks, kas nodrošina visobjektīvāko mērījumu rezultātus atspoguļojumu.
3. Faktisko interneta pakalpojuma kvalitātes novērtējumu nepieciešams veikt, piemērojot matemātiski pamatotu mērījumu veikšanas pieeju, tādējādi nodrošinot mērījumu rezultātu ticamību un objektivitāti.

Promocijas darba rezultātu aprobācija

Promocijas darba galvenie rezultāti prezentēti četrās starptautiskajās zinātniskajās konferencēs, kā arī ietverti divās publikācijās zinātniskajos žurnālos un četros rakstos pilna teksta konferenču rakstu krājumos, viena publikācija iesniegta zinātniskajā žurnālā 2021. gada nogalē.

Ziņojumi starptautiskajās konferencēs

1. Lipenbergs, E., Stafecka, A., Ivanovs, Ģ., **Smirnova (Vagale), I.** Quality of Service Measurements and Service Mapping for the Mobile Internet Access. No: 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium – Spring (PIERS 2017), Krievija, Sanktpēterburga, 22.–25. maijs, 2017.
2. Lipenbergs, E., **Smirnova (Vagale), I.**, Stafecka, A., Ivanovs, Ģ., Gavars, P. Quality of Service Parameter Measurements Data Analysis in the Scope of Net Neutrality. No: 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium – Fall (PIERS 2017), Singapūra, Nanyang, 19.–22. novembris, 2017.
3. **Smirnova (Vagale), I.**, Lipenbergs, E., Bobrovs, V., Gavars, P., Ivanovs, Ģ. Network Slicing in the Scope of Net Neutrality Rules. No: Progress In Electromagnetics Research Symposium – Spring (PIERS 2019), Itālija, Roma, 17.–20. jūnijs, 2019.
4. **Smirnova (Vagale), I.**, Lipenbergs E., Bobrovs V., Ivanovs Ģ., “The Analysis of the Impact of Measurement Reference Points in the Assessment of Internet Access Service quality”// Proceedings of Progress In Electromagnetics Research Symposium PIERS 2019-Fall, PIERS Xiamen, Ķīna, 17.–20. decembris, 2019.

Publikācijas zinātniskajos žurnālos

1. **Smirnova (Vagale), I.**, Lipenbergs, E., Bobrovs, V. “Mathematical algorithm for processing measurement results of internet access service in the scope of net neutrality”// Proceedings of LATVIAN JOURNAL OF PHYSICS AND TECHNICAL SCIENCES, LV, 2018, No. 3, pp. 63–69.
2. **Vagale (Smirnova), I.**, Lipenbergs, E., Bobrovs, V., Ivanovs, G., Development of Internet Measurement Principles for Representation of Measured Provision of Service (QoS-2). Journal of Information and Telecommunication, 2021, Vol. 5, No. 2., 267.–277. lpp.

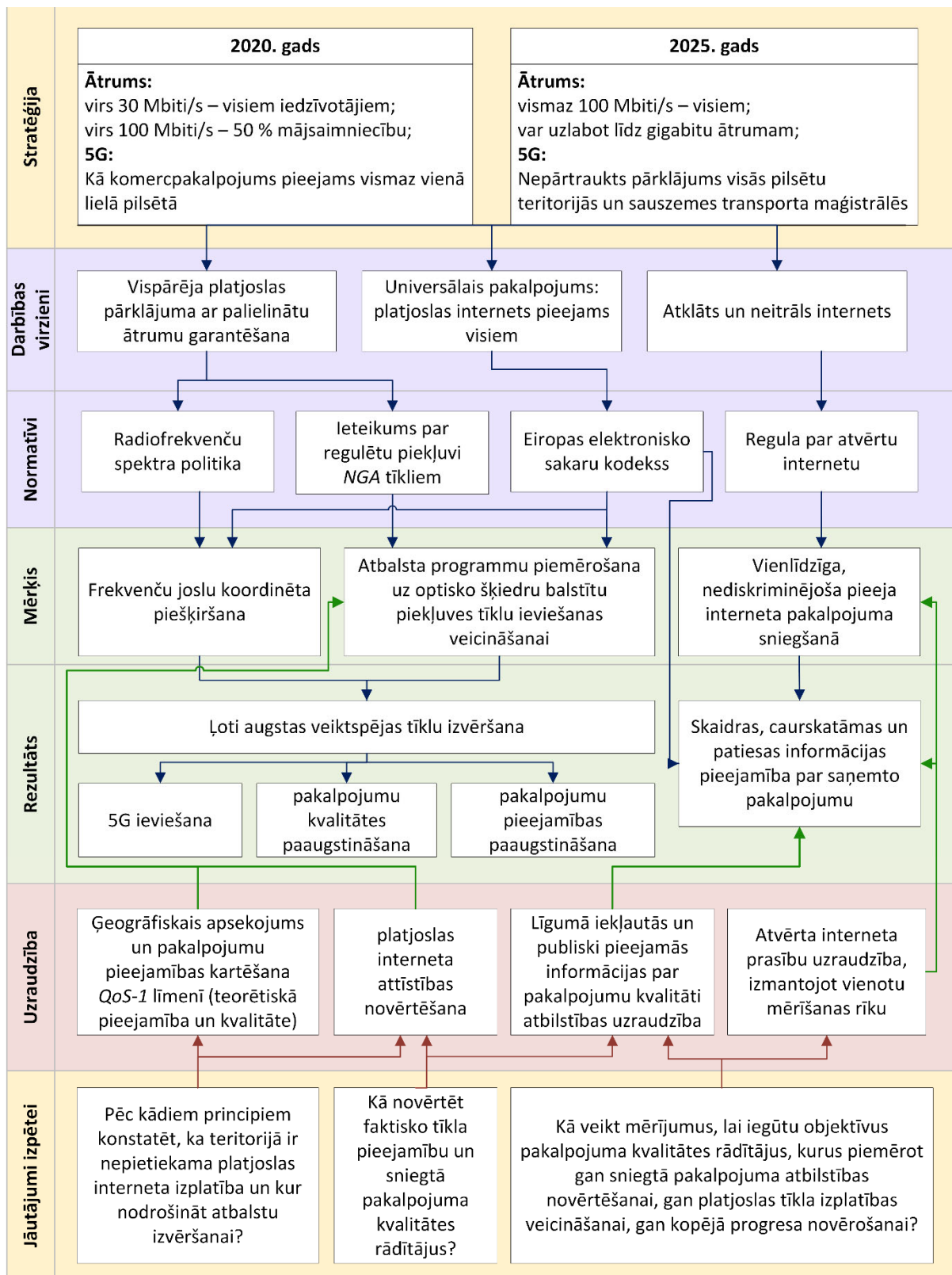
Raksti pilna teksta konferenču rakstu krājumos

1. Lipenbergs, E., Stafecka, A., Ivanovs, Ģ., **Smirnova (Vagale), I.** Quality of Service Measurements and Service Mapping for the Mobile Internet Access. In: 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium – Spring (PIERS 2017), Russia, Saint Petersburg, 22–25 May, 2017. pp. 2526–2532.
2. Lipenbergs, E., **Smirnova (Vagale), I.**, Stafecka, A., Ivanovs, Ģ., Gavars, P. Quality of Service Parameter Measurements Data Analysis in the Scope of Net Neutrality. In: 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium – Fall (PIERS 2017), Singapore, Nanyang, 19–22 November, 2017., pp. 1230–1234.
3. **Smirnova (Vagale), I.**, Lipenbergs, E., Bobrovs, V., Gavars, P., Ivanovs, Ģ. Network Slicing in the Scope of Net Neutrality Rules. In: Progress In Electromagnetics Research Symposium – Spring (PIERS 2019), Italy, Rome, 17–20 June, 2019., pp. 1516–1521.
4. **Vagale (Smirnova), I.**, Lipenbergs, E., Bobrovs, V., Ivanovs, Ģ. The Analysis of the Impact of Measurement Reference Points in the Assessment of Internet Access Service Quality. No: Progress in Electromagnetics Research Symposium – Fall (PIERS – Fall): 2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium, Ķīna, Xiamen, 17.–20. decembris, 2019. Piscataway: IEEE, 2019, pp. 2972–2977.

Darba apjoms un struktūra

Promocijas darba apjoms ir 161 lapaspuse. Tajā ir ievads, piecas nodaļas, literatūras saraksts un trīs pielikumi.

Darba **pirmajā nodaļā** veikta platjoslas interneta attīstības un izmantošanas tendenču izpēte. Novērtēta platjoslas izplatības un plašas pieejamības nozīme sociālās un ekonomiskās izaugsmes celšanā. Analizētas Eiropas mēroga stratēģijas un regulējums platjoslas attīstības veicināšanai, kā arī apkopotas no normatīvajiem aktiem izrietošās prasības un to piemērošanas kārtība, izpētīti esošie valstu un Eiropas līmeņa projekti platjoslas interneta attīstības un tā nodrošināta kvalitātes līmeņa uzraudzībai. Analizētas nepilnības un trūkumi esošajā regulējumā un projektos ietvertajos principos, kas traucē objektīvas un salīdzināmas informācijas iegūšanu par faktisku platjoslas nodrošināšanas kvalitāti, kā arī kavē Eiropas mērķu pilnvērtīgu sasniegšanu.



1. att. No Eiropas stratēģiskiem mērķiem izrietošo darbības virzienu, normatīvo aktu, to mērķu un paredzamo rezultātu, kā arī nepieciešamo uzraudzības pasākumu un konstatēto nepilnību shematisks apkopojums.

Darba **otrajā nodaļā** analizēti interneta pakalpojuma kvalitāti raksturojošie parametri atkarībā no tā novērtēšanas skatpunkta. Analizēta virkne starptautisko rekomendāciju attiecībā uz novērtējamo parametru kopu, ņemot vērā pakalpojuma nodrošināšanas aspektu. Padziļināti izpētīti kvalitātes parametri, kas sniedz informāciju par tehnisko pakalpojuma kvalitāti un noteikts minimālais kvalitātes parametru kopums, kas visdaudzpusīgāk raksturo saņemto kvalitātes līmeni, atspoguļojot ne tikai tīkla un pakalpojuma veiktspēju, bet norādot arī par potenciālo lietotāju kvalitātes pieredzi *QoE*. Novērtēts interneta savienojuma posms un mērīšanas principi, kas nodrošina kvalitātes rādītāju novērtēšanu no lietotāja viedokļa, kā arī sniedz objektīvus un salīdzināmus mērījumu rezultātus.

Darba **trešajā nodaļā** padziļināti izpētīta *TCP* pārraides vadības protokola darbība un algoritmi, ko ir īpaši būtiski ņemt vērā, izstrādājot interneta mērīšanas sistēmu un nodrošinot interneta kvalitātes mērījumus, patiesu un objektīvu caurlaidspējas mērījumu rezultātu iegūšanai. Analizēti citi mērījumu rezultātus ietekmējošie faktori, kas ņemami vērā, definējot mērīšanas pieeju un metodiku.

Ceturtajā nodaļā veikta interneta pakalpojuma mērījumu rezultātu analītika, definējot mērīšanas principus un izstrādājot mērījumu veikšanas metodiku. Novērtēta iespējamā ietekme uz kvalitātes parametru mērījumiem, kā arī analizēta šo ietekmju mazināšanas iespēja. Analizēti mērījumu rezultātu raksturošanai vispiemērotākie statistiskie mēri. Noteikti principi, kā šie mērījumu rezultāti atspoguļojami saistībā ar Eiropas regulējumu prasībām.

Piektajā nodaļā ir analizēta alternatīva iespēja praktiskiem interneta pakalpojuma kvalitātes mērījumiem – *MDT* risinājums. Novērtēti tā piemērošanas varianti, kā arī analizētas priekšrocības, trūkumi un galvenie tā izmantošanu traucējošie faktori. Novērtēti turpmākie pētījumu virzieni, analizējot šāda risinājuma lietošanas izdevīgumu un atbilstību, veicot platjoslas interneta izplatības un kvalitātes uzraudzību atbilstoši kopējiem Eiropas mērķiem.

Promocijas darba nobeigumā apkopoti pabeigtu pētījumu rezultāti, pamatoti promocijas darba galvenie secinājumi. Pielikumos pievienoti zinātnisko konferenču, publikāciju saraksti.

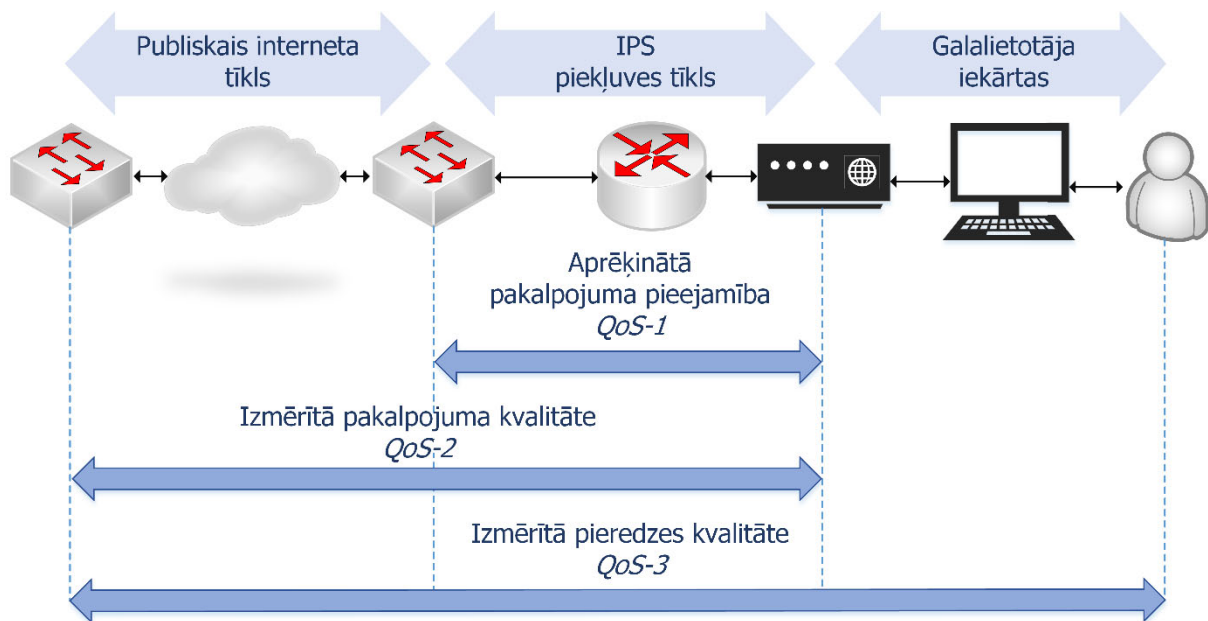
PROMOCIJAS DARBA NODAĻU IZKLĀSTS

Promocijas darba pirmā nodaļa

Promocijas darba **pirmajā nodaļā** ir apskatīts platjoslas interneta pakalpojuma rādītāju un tā pieejamības novērtējums, ko veic starptautiskas organizācijas, piemēram, *OECD*, Eiropas Komisijas, Eiropas Elektronisko sakaru regulatoru iestādes (*BEREC*) un Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisijā (SPRK) Latvijā, kā arī prognozes attiecībā uz interneta lietošanas tendencēm un apjomiem, novērtējot starptautisko kompāniju, piemēram, *Ericsson*, *GSMA*, *Cisco Systems, Inc.* sniegto informāciju. Sniegta arī 5G tehnoloģijai definēto lietošanas gadījumu, tiem atbilstošu kvalitātes rādītāju, kā arī tehnoloģijas attīstības pamatnosacījumu apskats atbilstoši Starptautiskās telekomunikāciju savienības (*ITU*) rekomendācijās ietvertajam [5], [6], [7].

Izvērtētas Eiropas Komisijas izstrādātās ES stratēģijas, kā arī Eiropas Parlamenta un Padomes direktīvas un regulas, kurās definētas prasības stratēģijās noteikto mērķu sasniegšanai (1. att.). Apkopota prasību pārņemšana, Latvijas likumdošanā ieviešot attiecīgos noteikumus un nosakot nosacījumus lietotāju interešu aizsardzībai.

Vienlaikus ir analizēts Eiropas platjoslas kartēšanas projektā ieviestais un *BEREC* vadlīnijās par tīklu ģeogrāfisko apsekojumu noteiktais platjoslas interneta pieejamības atspoguļošanas ietvars, kura mērķis ir nodrošināt informāciju par platjoslas interneta rādītājiem dažādu teritoriālo vienību mērogā [10], [12], [13]. Līdz ar to fiksētā platjoslas pakalpojuma kartēšana ir paredzēta atbilstoši konkrētos adrešu punktos nodrošināmam pakalpojumam, savukārt mobilās platjoslas kartēšana paredzēta, nodrošinot informāciju par pakalpojuma pieejamību 100 m × 100 m režģa dalījumā. Aplūkoti arī platjoslas datu atspoguļošanai definētie līmeņi (*QoS-1*, *QoS-2* un *QoS-3*), kas klasificē atspoguļojamos datus atkarībā no to iegūšanas veida (teorētiskie aprēķini vai mērījumi), kā arī atkarībā no novērtējamā pakalpojuma sniegšanas posma (2. att.). Papildus analizēta teorētisko aprēķinu piemērojamība platjoslas interneta kvalitātes rādītāju novērtēšanā, kā arī praktisko mērījumu rezultātu atšķirības un to iemesli.

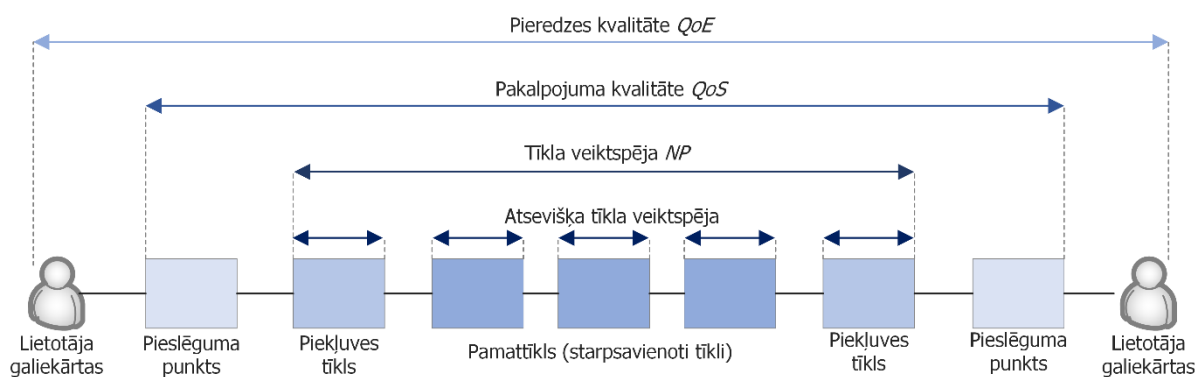


2. att. Platjoslas kartēšanas projektā ieviesto interneta pakalpojuma kvalitātes novērtējuma līmeņu shematisks atspoguļojums; avots: [11].

Līdz ar to ir secināts, ka atbilstoši interneta izmantošanas tendencēm un prognozējamiem apmēriem Eiropas Komisijas stratēģiskie mērķi attiecībā uz platjoslas interneta pieejamības veicināšanu ir aktuāli un būtiski dažādu sociālo un ekonomisko aspektu atbalstīšanā. Savukārt šo mērķu sasniegšanai un lietotāju informētības veicināšanai ir būtiski nodrošināt vispārpieejamu, jēgpilnu un objektīvu informāciju par platjoslas interneta pieejamību un nodrošināmo kvalitātes līmeni. Tomēr ir secināts, ka, lai arī esošie normatīvie akti iezīmē darbības virzienus un uzraudzības aspektus, tie nenosaka skaidras un vienotas prasības uzraudzības metodēm. Līdz ar to nevar pārliecinoši garantēt, ka sniegtie uzraudzības rezultāti atspoguļo faktisko situāciju, tādējādi ietekmējot gan sabiedrības informētību, gan lēmumu pamatotību dažādu valsts atbalsta programmu piemērošanā.

Promocijas darba otrā nodaļa

Promocijas darba **otrajā nodaļā** analizēti dažādi interneta pakalpojuma kvalitāti raksturojošie parametri, to interpretācija atkarībā no novērtējamā pakalpojuma pieslēguma posma un no atšķirīgiem pakalpojuma sniegšanas vai izmantošanas aspektiem. Pakalpojuma kvalitāte (*QoS*) vienmēr raksturo *E2E* posmu, t. i., lietotājs-lietotājs vai lietotājs-saturs. Tādējādi pakalpojuma kvalitātes (*QoS*) mērījumi tiek veikti *E2E* posmā, kas tiek izteikta objektīvu (kvantitatīvu) vai subjektīvu (kvalitatīvu) parametru izteiksmē. Līdz ar to lietotājiem saistošs interneta kvalitātes novērtējums ir veicams *E2E* posmā.



3. att. Shematisks pakalpojuma sniegšanas posmu attēlojums tīkla veiktspējas, pakalpojuma kvalitātes (*QoS*) un pieredzes kvalitātes (*QoE*) novērtējumam; avots: *BEREC* [14].

Novērtēti lietotājam saistošie tehniskie pakalpojuma kvalitātes rādītāji, kas raksturo lietotāja pieredzi, izmantojot internetu, kā arī šos rādītājus ietekmējošie kvalitātes parametri. Apkopoti arī būtiskākie parametri, kā datu pārraides ātrums, datu pārraides aiztures laiks un aiztures laika nevienmērība un pakešu zudumi, kuru novērtējums ļauj secināt par kopējo sniegto kvalitātes līmeni un prognozēt lietotāju apmierinātību. Analizēts, kādā *OSI* protokolu steka līmenī ir nepieciešams veikt novērtējumu, lai tas raksturotu lietotājam pieejamo kvalitātes līmeni [14], [16], [17], [18].

Promocijas darba trešā nodaļa

Promocijas darba **trešajā nodaļā** analizēti *TCP* pārraides vadības protokola darbības principi un algoritmi un to ievērošanas nepieciešamība, izstrādājot un iestatot mērīšanas sistēmu, lai iegūtu objektīvu un faktiskai situācijai atbilstošu caurlaidspējas novērtējumu, apskatīti citi ar interneta pakalpojuma kvalitātes mērījumiem saistītie aspekti, kas var ietekmēt mērījumu rezultātus, kā arī definēti kritēriji mērīšanas sistēmas references punkta izvietojumam, lai nodrošinātu salīdzināmus un objektīvus mērījumu rezultātus.

Vairāki faktori var ietekmēt *TCP* caurlaidspēju un tās mērījumu rezultātus. Ir faktori, kas rodas neatkarīgi no *TCP* darbības principiem un tā iestatījumiem, piemēram, šķērsplūsmas (*UDP* vai *TCP*), konkurējošo *TCP* savienojumu skaits, pārslodze pārraides ceļā, kā arī maršrutētāju buferu izmērs un katra kanāla kapacitāte un slodze. Šie faktori var pastāvēt, arī lietotājam izmantojot interneta pakalpojumu, līdz ar to kopumā tas neietekmē rezultātu objektivitāti. Šo apstākļu ietekme uz mērījumu rezultātiem var minimizēt, veicot mērījumus atbilstošā laikā, daudzumā un vietā.

Savukārt ir tādi faktori, kas ir tieši atkarīgi no *TCP* darbības īpatnībām un ko noteikti jāņem vērā, izstrādājot pašu mērīšanas sistēmu, kā arī veicot *TCP* iestatījumus. Piemēram, *TCP* caurlaidspēju var ietekmēt tādi faktori kā *TCP* buferu izmēri gan sūtītāja, gan saņēmēja pusē, mērījumā izveidoto paralēlo *TCP* savienojumu skaits, mērījuma ilgums un pārraidāmo datu apjoms, atšķirības *TCP* specifikācijās (piemēram, *Tahoe*, *Reno*, *NewReno*) un vairāki citi parametri [19], [20], [21]. Būtiska nozīme ir arī references servera izvietojumam un tā pieslēguma kapacitātei. Veicot pētījumus, secināts, ka mērījumos pret dažādiem mērījumu

serveriem, kas izvietoti relatīvi netālu viens no otra (Rīgas pilsētas ietvaros), mērījumu rezultātu atšķirība sasniedz 8 %. Savukārt, veicot mērījumus pret dažādiem Eiropas mērogā izvietotiem serveriem, mērījumu rezultāti var atšķirties pat vairāk nekā par 70 %. Tādējādi ir secināms, ka, lai novērtētu noteiktā valstī pieejamos kvalitātes rādītājus, mērījumus ir nepieciešams veikt nacionālā līmenī. Par piemērotāko risinājumu ir uzskatāms mērīšanas servera pieslēgums pie nacionālā vai reģionālā interneta apmaiņas punkta komutācijas iekārtas. Šāds references punkta izvietojums nodrošina objektīvu informāciju par lietotājam pieejamiem pieslēguma kvalitātes rādītājiem [22], [23].

Promocijas darba ceturtnā nodaļa

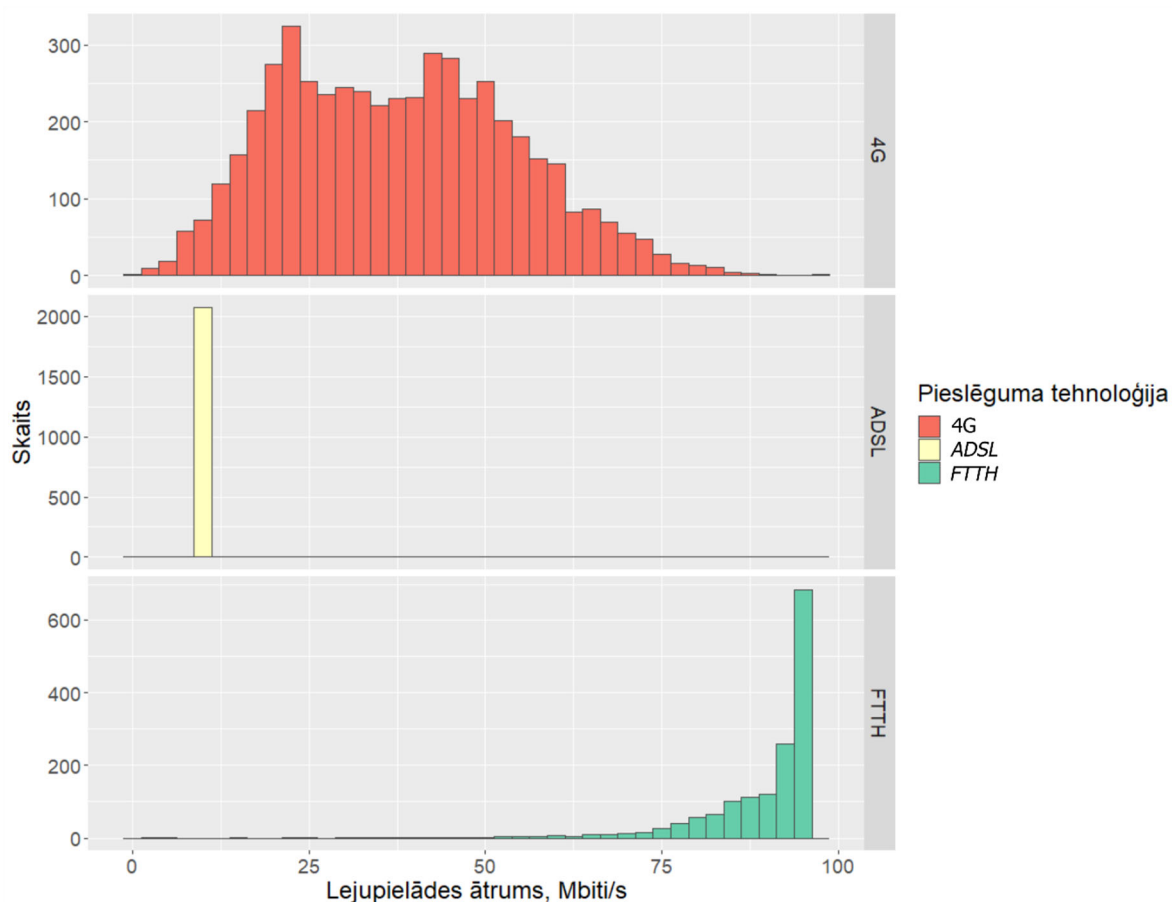
Promocijas darba **ceturtnā nodaļā**, pamatojoties uz faktiskiem interneta kvalitātes mērījumu rezultātiem, kas iegūti, diennakts laikā nedēļas periodā veicot vairākus tūkstošus mērījumu, tādējādi novērtējot lejupielādes ātruma rādītāju izmaiņu dinamiku dažādu tehnoloģiju interneta pieslēgumiem fiksētajā (*FTTH* 100 Mbiti/s pieslēgums un *ADSL* pieslēgums) un mobilajā (4G pieslēgums) tīklā.

Analizējot lejupielādes ātruma izmaiņu dinamiku diennakts laikā fiksētajā tīklā, ir vērojams, ka gan *ADSL* pieslēguma, gan optiskās šķiedras tīklos tiek nodrošinātas salīdzinoši stabilas pieslēguma ātruma vērtības neatkarīgi no diennakts laika.

Mērījumos *FTTH* pieslēguma fiksētajā tīklā, kurā pēc līguma nosacījumiem maksimālais pieslēguma ātrums tiek nodrošināts 100 Mbiti/s, tika novērots, ka mērījumu izlases 2,5 procentīle ir 63,95 Mbiti/s, respektīvi, 97,5% mērījumos pieslēguma ātrums nav bijis zemāks par šo vērtību. Tāpat novērots, ka vairumā gadījumu (75%) pieslēguma ātruma samazinājums nav bijis lielāks par 15 % no maksimālās līgumā norādītās vērtības. Savukārt pusē no mērījumiem lejupielādes ātruma vērtības ir bijušas tuvu maksimālai vērtībai. Līdz ar to secināms, ka optiskās šķiedras tīklā tiek nodrošināti satbili lejupielādes ātruma rādītāji, kā arī to kritumi vairumā gadījumu nav būtiski.

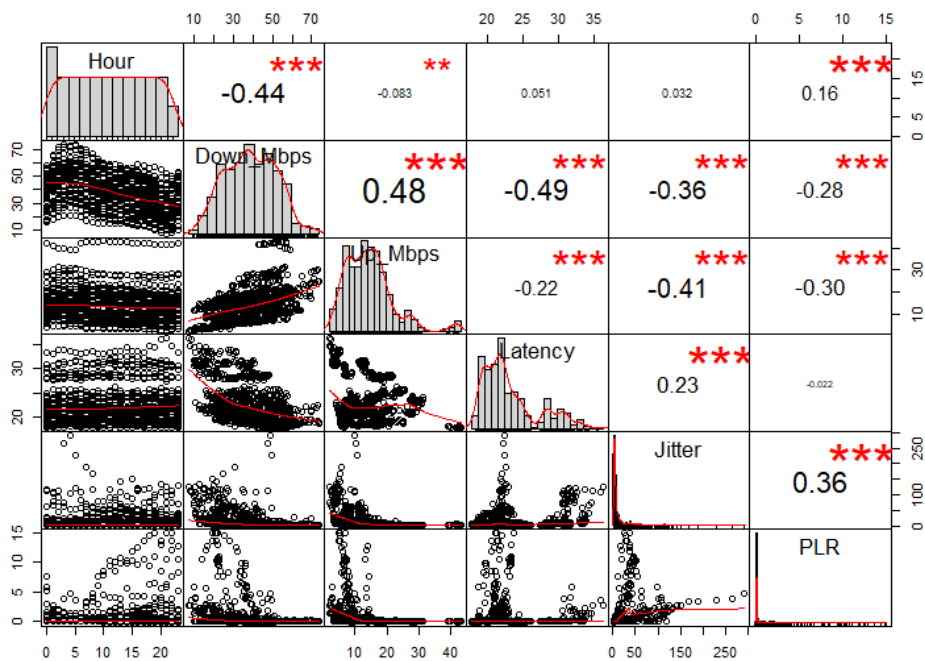
Analizējot mērījumus, kas veikti fiksētā *ADSL* pieslēguma tīklā, secināms, ka 97,7 % mērījumu ir tuvu maksimālai novērotai vērtībai – atšķirības ir mērāmas kilobitos, kas liecina par ievērojamu nodrošinātā lejupielādes ātruma stabilitāti.

Izvērtējot mērījumu rezultātus, kas iegūti, veicot mērījumus mobilā elektronisko sakaru tīklā, secināms, ka lejupielādes ātruma vērtības diennakts laikā mainās plašā vērtību diapazonā. Ņemot vērā ievērojamo variāciju kvalitātes rādītāju vērtībās mobilajā tīklā sniegtam pakalpojumam, ir secināms, ka objektīvu kvalitātes rādītāju iegūšanai ir būtiski ņemt vērā noteiktu mērīšanas pieeju [24].



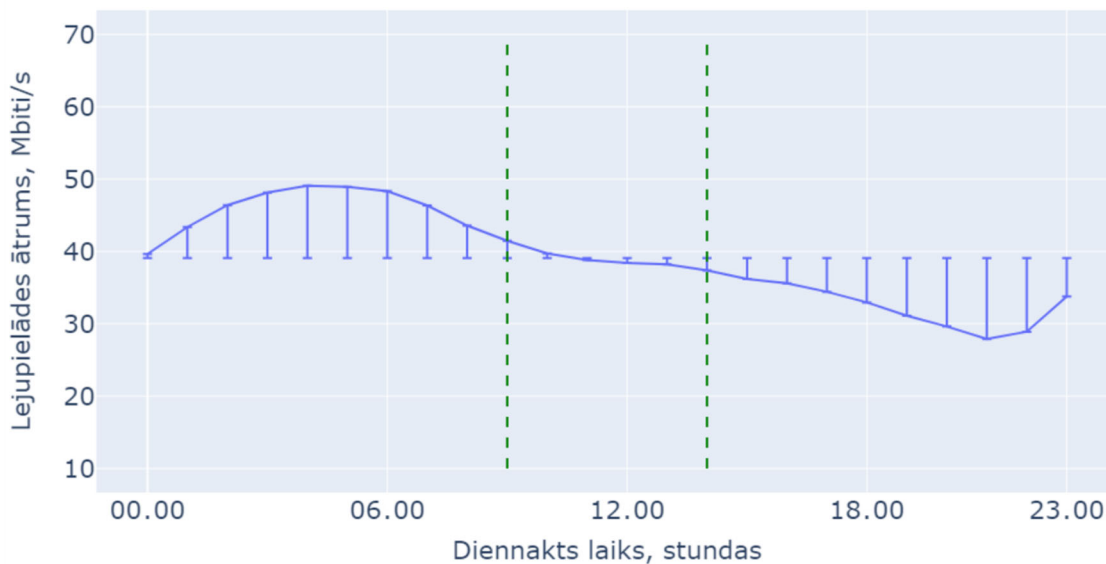
4. att. Mērījumos novērtēto lejupielādes ātruma vērtību sadalījums fiksētajā *FTTH* 100 Megabiti/s pieslēguma tīklā, fiksētajā *ADSL* pieslēguma tīklā un mobilajā 4G pieslēguma tīklā.

Lai novērtētu diennakts laika ietekmi uz mērījumu rezultātiem un izstrādātu mērīšanas metodiku, ievērojot šo ietekmi, veikts pētījums, kurā tika novērtēts, vai pastāv korelācija starp mērījumu laiku un kvalitātes parametru vērtībām, kā arī starp dažādiem kvalitātes parametriem. Korelācijas novērtējumā kopumā analizēti vairāk nekā 530 tūkst. mērījumu rezultātu, kas iegūti, veicot ilgstošus sērijveida mērījumus 45 dažādās vietās Latvijā 2019. un 2020. gadā. Veicot aprēķinus, ir secināts, ka lejupielādes ātruma mērījumu rezultātiem pastāv statistiski nozīmīga negatīva korelācija ar diennakts laiku, kad veikts mērījums (pie nozīmības līmeņa $\alpha = 0,05$). Tādējādi secināms: jo vēlāk diennakts laikā tiek veikts mērījums, jo zemāks lejupielādes ātrums tiek novērots.



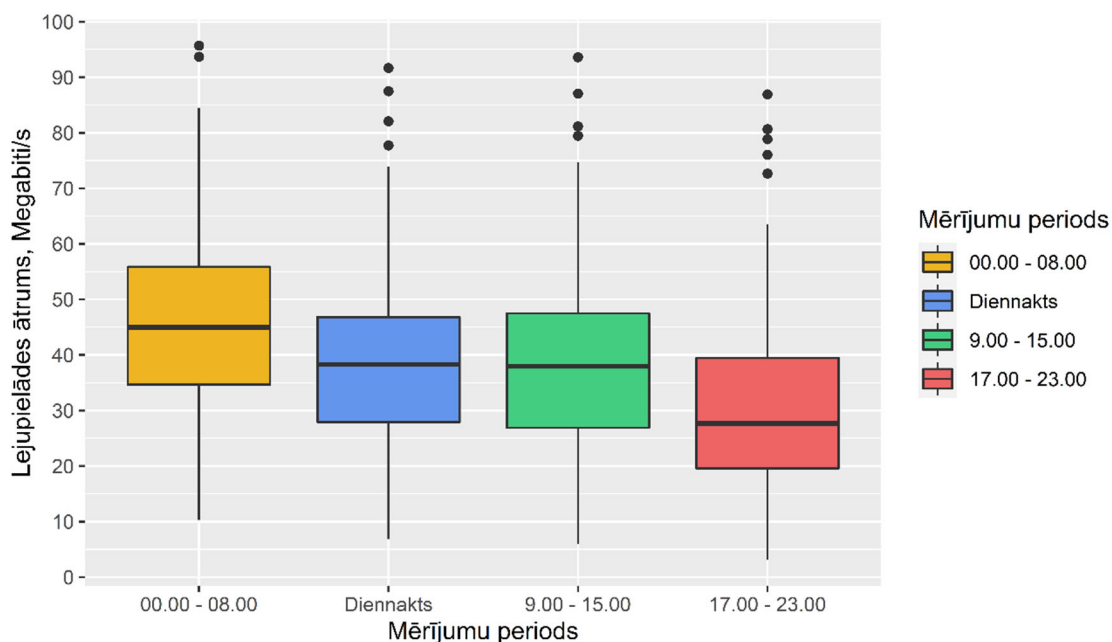
5. att. Kvalitātes parametru stundas vidējo vērtību un diennakts laika korelācijas diagramma.

Līdz ar to tika pieņemts, ka mērījumus jāveic tādā laika posmā, kas nodrošina mērījumu rezultātu vērtību skaitlisku līdzvērtību diennakts vidējai vērtībai. Lai pārbaudītu šo pieņēmumu, tika veikti aprēķini, salīdzinot katras stundas vidējo lejupielādes ātruma vērtību ar diennakts vidējo lejupielādes ātruma vērtību (6. att.). Rezultātā tika novērtēts diennakts laiks, kurā vērojama vismazākā atšķirība starp konkrētā diennakts stundā veiktajiem mērījumiem un kopējiem diennakts rādītājiem [25].



6. att. Stundas vidējā lejupielādes ātruma vērtību atšķirība no diennakts vidējās lejupielādes ātruma vērtības.

7. attēlā redzams lejupielādes ātruma vidējo vērtību sadalījums. Rīta (no plkst. 00.00 līdz plkst. 08.00) un vakara (no plkst. 16.00 līdz plkst. 23.00) rezultātu sadalījums atšķiras no diennakts vērtību sadalījuma. Savukārt dienas (no plkst. 9.00 līdz plkst. 15.00) vizuāli izskatās līdzvērtīgi.



7. att. Mērījumos novērtēto lejupielādes ātruma vērtību izkliede dažādos diennakts laika intervālos.

Pamatojoties uz šiem novērojumiem, tika izvirzīta hipotēze $H_0: \mu_0 = \mu$ pret $H_1: \mu_0 \neq \mu$ par to, ka lejupielādes ātruma vidējā vērtība mērījumiem, kas veikti laika posmā no plkst. 9.00 līdz 15.00 (μ) ir vienāda ar lejupielādes ātruma vidējo vērtību mērījumiem, kas veikti visas diennakts periodā (μ_0).

Lai salīdzinātu lejupielādes ātruma vidējās vērtības visos četros izvēlētajos diennakts periodos, tika veikts dispersijas analīzes tests un tā sauktais *post-hoc* tests.

1. tabula

Vidējo vērtību vienādības pārbaude starp dažādām grupām ar *post-hoc* testu, izmantojot R programmatūru

require(PMCMRplus) posthoc.kruskal.nemenyi.test(x=dati\$Down_Mbps, g=dati\$M_period, dist="Tukey")			
	00.00-08.00	16.00-23.00	9.00-15.00
16.00-23.00	9.2e-07	-	-
9.00-15.00	0,059	0,031	-
Diennakts	0,078	0,023	1,000

Aprēķinu dati rāda, ka pie nozīmības līmeņa $\alpha = 0,05$ tiek noraidīta diennakts un vakara (16.00–23.00) mērījumu vidējo vērtību vienādība (p vērtība $< 0,05$). Salīdzinot diennakts un rīta (00.00–08.00) vidējās vērtības, secināms, ka pie nozīmības līmeņa $\alpha = 0,05$ vienādība nevar tikt noraidīta. Tomēr, ņemot vērā aprēķināto p vērtību (0,078), ir secināms, ka šī divu grupu vidējās vērtības vienādība nevar tikt uzskatīta par statistiski nozīmīgu. Iespējams, atsevišķās stundās šajā laika posmā ir iespējams novērot diennakts vidējām vērtībām līdzvērtīgus rādītājus, tomēr varbūtība ir pārāk maza, savukārt iespējamā deviācija – liela, lai to praktiski lietotu. Savukārt, novērtējot diennakts vidējās vērtības pret dienas (09.00–15.00) vidējām vērtībām, ir vērojama statistiski ļoti nozīmīga vidējo vērtību vienādība starp šīm grupām (p vērtība = 0,999536). Līdz ar to tika pieņemta hipotēze par to, ka laika posmā no plkst. 9.00 līdz plkst. 15.00 veikto lejupielādes ātruma mērījumu vidējās vērtības ir vienādas ar visā diennakts periodā novērtētā lejupielādes ātruma vidējām vērtībām, un mērījumu veikšanai ir rekomendēts šis diennakts laiks.

Ir aprēķināts konkrētā mērījumu vietā nepieciešamais mērījumu atkārtojumu skaits, lai nodrošinātu to, ka novērtētās pakalpojuma kvalitātes parametru vidējās vērtības ar 95 % ticamību iekļaujas definētajās robežās no hipotētiskās kopas vidējās vērtības. Nepieciešamā mērījumu skaita jeb paraugkopas apjoma aprēķinam tiek izmantots šāda formula [26]:

$$n = \frac{z_{\alpha/2}^2 \cdot \sigma^2}{e^2}, \quad (1.)$$

kur: $z_{\alpha/2}$ atbilst vēlamajam ticamības līmenim;

σ – izlases standartnovirze;

e – maksimālā pieļaujamā kļūdas robeža (angļu val. – *margin of error*).

Aprēķini tika veikti atsevišķi pieslēguma ātruma rādītājiem un latentuma rādītājiem.

Interneta pakalpojuma kvalitātes parametri tiek novērtēti vienlaikus, tāpēc, lai nodrošinātu to, ka, veicot mērījumus laika posmā no plkst. 9.00 līdz plkst. 15.00, katrā mērījumu vietā novērtētā lejupielādes un augšupielādes ātruma vidējā vērtība ar 95 % ticamību iekļaujas ± 5 Mbit/s robežās, savukārt latentuma vidējā vērtība ar 95 % ticamību iekļaujas $\pm 2,5$ ms robežās, ir jāveic **vismaz 63 mērījumi** katrā vietā. Savukārt, lai nodrošinātu, ka pie tiem pašiem nosacījumiem lejupielādes un augšupielādes ātruma vidējā vērtība ar 95 % ticamību iekļaujas ± 10 Mbit/s robežās, savukārt latentuma vidējā vērtība ar 95 % ticamību iekļaujas ± 5 ms robežās, ir jāveic **vismaz 16 mērījumu** katrā vietā.

Ņemot vērā trīces un pakešu zuduma koeficienta mērījumu rādītāju sadalījumu, secināms, ka to uzraudzībai ir nepieciešama atšķirīga pieeja. Šo parametru novērtējums īslaicīgā laika periodā, konkrētā mērījumu vietā veicot atsevišķu mērījumu sēriju, nevar tikt atspoguļots kā šai konkrētai vietai raksturīgs rādītājs, jo tādā gadījumā ir iespēja gūt maldīgu priekšstatu par šo parametru vispārējo kvalitātes līmeni. Tomēr ir būtiski veikt šo parametru uzraudzību un, vairākkārtīgi novērojot augstus šo parametru rādītājumus, veikt papildu mērījumus ilgstošākā laika posmā, lai noskaidrotu to ietekmi uz vispārējo kvalitātes līmeni un lietotāju pieredzi, izmantojot interneta pakalpojumu.

Promocijas darbā ir novērtēts minimālais mērījumu vietu skaits, kāds nepieciešams, lai vispārīgās valsts mēroga vidējās kvalitātes parametru vērtības ar 95 % ticamību iekļaujas definētajās robežās no vidējās vērtības. Lai arī kopumā vidējais interneta pakalpojuma

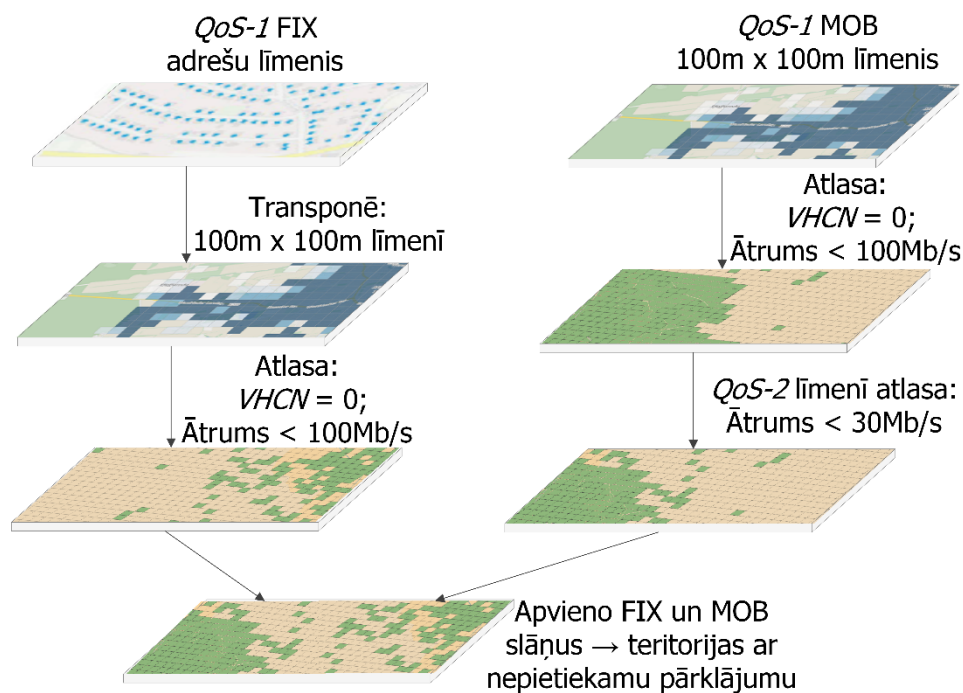
kvalitātes novērtējums valstī nesniedz informāciju par konkrētam lietotājam pieejamo kvalitātes līmeni, tas tomēr ir būtisks mērs, kas ļauj objektīvi novērtēt kopējo mobilo tīklu veiktspējas attīstību, kā arī salīdzināt to ar dažādu operatoru un citās valstīs nodrošinātajiem rādītājiem.

Tādējādi tika aprēķināts, ka valsts teritorijā ir nepieciešams veikt mērījumus vismaz 1756 dažādās mērījumu vietās, lai nodrošinātu, ka ar 95 % ticamību izlases vidējā lejupielādes ātruma vērtība iekļausies ± 2 Mbit/s robežās no hipotētiskās kopas vidējās vērtības. Augšupielādes ātruma vidējā vērtība tādā gadījumā ar 95 % ticamību iekļausies $\pm 0,5$ Mbit/s robežās no hipotētiskās kopas vidējās vērtības, savukārt latentuma vidējā vērtība ar 95 % ticamību iekļausies ± 1 ms robežās no hipotētiskās kopas vidējās vērtības.

Papildus ir izvērtēts kvalitātes parametru mērījumu rezultātu sadalījums atkarībā no iedzīvotāju skaita un blīvuma, un uz tā pamata ir definēts princips mērījumu vietu skaita izvēlei atšķirīgās teritorijās. Ņemot vērā minimālo mērījumu vietu skaitu, kas nepieciešams, lai nodrošinātu to, ka parametru vidējās vērtības ar 95 % ticamību iekļaujas definētajās robežās no hipotētiskās kopas vidējās vērtības, un pamatojoties uz definēto mērījumu vietu skaita sadalījuma principu, ir aprēķināts atbilstošais mērījumu vietu skaits un sadalījums Latvijas teritorijā.

Novērtējot sešu gadu laikā veikto mērījumu rezultātus, var spriest, cik bieži ir nepieciešams atkārtot mērījumu ciklu, lai nodrošinātu to, ka atspoguļotās kvalitātes parametru vērtības raksturo aktuālo platjoslas tīklu veiktspēju. Secināms, ka valsts teritorijā par optimālu ir uzskatāms atkārtot mērījumu ciklu reizi gadā.

Papildus tam ir definēts iespējamais mehānisms nepietiekama platjoslas interneta pārklājuma teritoriju novērtēšanai, pamatojoties uz ģeogrāfiskā apsekojumā iegūto informāciju. Ir novērtēti teorētiskie rādītāji un praktiskajos mērījumos iegūtās pieslēguma ātruma vērtības, kas varētu liecināt, ka attiecīgajā teritorijā platjoslas interneta kvalitāte nav nodrošināta atbilstošajā līmenī. Tādējādi ir nodrošināms pirmējs nepietiekamas platjoslas teritoriju novērtējums.



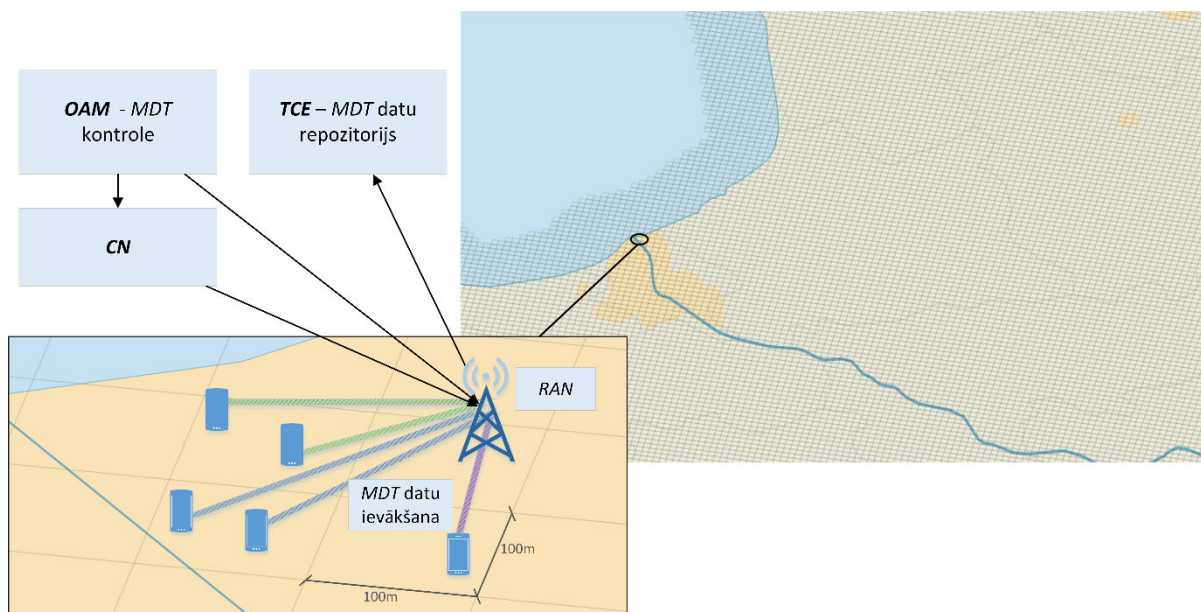
8. att. Algoritms teritoriju ar nepietiekamu platjoslas pārklājumu noteikšanai, ņemot vērā ģeogrāfiskā apsekojuma datus.

Darba gaitā ir noteikti pamatprincipi padziļinātai identificēto teritoriju analīzei, ko nepieciešams izvērtēt, lai turpmāk plānotu investīcijas platjoslas tīklu attīstībā šajās teritorijās. Šāda padziļināta analīze un detalizētāku principu noteikšana var būt **turpmākais pētījuma virziens**.

Promocijas darba piektā nodaļa

Promocijas darba **piektajā nodaļā** ir piedāvāta metode faktisko interneta pakalpojuma kvalitātes rādītāju novērtēšanai, izmantojot *MDT* tehnoloģiju un tādējādi nodrošinot kvalitātes rādītāju atspoguļošanu *QoS-2* līmenī 100 m × 100 m režģa dalījumā plašā teritorijā.

MDT mobiliem operatoriem paredz iespēju ielasīt radio parametru mērījumus, izmantojot lietotāja galiekārtu, piemēram, viedtālruni, un mērījumu rezultāti tiek ielasīti kopā ar *GPS* atrašanās vietas koordinātām [29], [30], [31]. *MDT* nodrošina to, ka lietotāja galiekārta periodiski vai arī pēc pieprasījuma signalizācijas fāzes laikā augšupielādē mērījumu atskaites, tādējādi nav nepieciešama papildu programmatūras instalēšana galalietotāju ierīcē, kā arī viņiem netiek radītas papildu izmaksas [27], [28], [31], [32]. Attiecībā uz pakalpojumu kvalitāti *QoS*, *MDT* paredz funkcionalitāti, kas, izmantojot lietotāja galiekārtu, ļauj novērtēt šī lietotāja pieredzēto pakalpojumu kvalitāti (t. i., caurlaidspēju, latentumu, pakešu zudumu) un analizēt to ģeogrāfiskā mērogā, iegūstot mērījumu rezultātus kopā ar lietotāja galiekārtas atrašanās vietu [27]. Tādējādi var tikt apkopota informācija par faktisko lietotājam pieejamās caurlaidspējas un savienojamības aspektiem [29].



9. att. Konceptuāls attēlojums *MDT* mērījumu veikšanai un mērījumu rezultātu kartēšanai 100 m × 100 m režģa mērogā.

Ņemot vērā to, ka aktīvos lauka mērījumus praktiski nav iespējams veikt tik blīvā teritoriālā dalījumā visas valsts mērogā, būtu izmantojama šāda alternatīva metode. Promocijas darbā ir piedāvāts mērījumu rezultātu apkopošanas mehānisms, izmantojot lielo datu analītikas algoritmu *MapReduce*, kā arī rezultātu atspoguļošanas veids 100 m × 100 m mērogā. Rezultātā plašā mērogā ar smalku teritoriālo sadalījumu (100 m × 100 m režģī) būtu iespējams novērtēt un atspoguļot faktiskos datu pārraides ātruma rādītājus, ko neatspoguļo teorētiskais pakalpojuma kvalitātes rādītāju novērtējums un ko ir praktiski neiespējami nodrošināt, veicot aktīvos mērījumus. Īpaši nozīmīga šāda pieeja būtu 5G tehnoloģijas tīklos, novērtējot kvalitātes rādītājus atšķirīgos tīkla segmentos, kur pakalpojuma serveri tiek uzstādīti tuvāk tīkla malai, nodrošinot tā saucamo “perifērijas skaitļošanu” (angļu val. – *edge computing; EC*), kas sniedz ātrākas datu apstrādes un uzglabāšanas iespējas. Līdz ar to šādos gadījumos, veicot mērījumus līdz mērījumu serverim, kas uzstādīts pie interneta apmaiņas punkta, mērījumu rezultāti neatspoguļotu faktiskos kvalitātes rādītājus [33].

Promocijas darbā ir identificēti arī šādas metodes izmantošanas problēmaspekti. Pirmkārt, *MDT* mērījumi tiek veikti konkrēta operatora tīklā, līdz ar to sniedzot informāciju par kvalitātes rādītājiem pakalpojuma sniedzēja tīkla ietvaros un nenodrošinot vienādu mērījumu rezultātu šķērsgriezumu ar aktīvos mērījumos iegūtajiem rezultātiem. Tomēr *MDT* mērījumu rezultāti sniedz informāciju par lietotāja pieredzētajiem pakalpojuma kvalitātes rādītājiem, ko neatspoguļo teorētiskais mobilā tīkla pārklājuma aprēķins. Tāpēc *MDT* risinājums būtu papildinājums operatoru sniegtajai teorētiskajai informācijai, nodrošinot faktiskos tīkla un kvalitātes parametru rādījumus. Tomēr aktīvie testi joprojām būtu aktuāli, it īpaši vietās, kur nav iespējams iegūt *MDT* mērījumu rezultātus.

Otrkārt, *MDT* mērījumi atspoguļo caurlaidspējas rādītājus *OSI* protokolu steka otrajā jeb datu pārraides kanāla slānī, kas attiecināms uz tīkla veiktspējas rādītājiem, nevis pakalpojuma kvalitātes vērtībām, kādas pieejamas lietotājam.

Visbeidzot, ņemot vērā to, ka *MDT* mērījumu rezultāti ietver plašu informāciju par mobilā operatora tīkla veiktspēju un lietojumu, mobilie operatori varētu nevēlēties nodot neapstrādātus datus trešajām pusēm (tajā skaitā – valsts pārvaldes institūcijām). Nodrošinot datu analītiku mobilā operatora pusē, paliek aktuāls jautājums par norādīto vērtību patiesumu un izmantotās mērīšanas pieejas atbilstību. Līdz ar to tik un tā ir nepieciešama neatkarīgu iestāžu veikta kvalitātes rādītāju verificēšana.

Kopumā šādas metodes lietojamība interneta pakalpojuma kvalitātes rādītāju novērtēšanā un atspoguļošanā var būt **turpmāko pētījumu virziens**.

PROMOCIJAS DARBA REZULTĀTI

Veicot definēto uzdevumu izpildi, ir iegūti vairāki galvenie promocijas darba rezultāti un secinājumi.

Izvērtējot elektronisko sakaru nozares regulējošā ietvara normatīvu klāstu, tika secināts, ka ir iespējams izveidot konsekventu un vienotu mehānismu uzraudzības metožu ieviešanai un piemērošanai attiecībā uz interneta piekļuves pakalpojuma kvalitātes novērtēšanu. Interneta kvalitātes rādītāju novērtēšana ir būtiska, lai iegūtu skaitlisku mēru kvalitātes interpretēšanai. Tie ļauj izvērtēt elektronisko sakaru tīku attīstības līmeni un salīdzināt to nacionālā un starptautiskā līmenī, nodrošināt pakalpojuma atbilstības novērtēšanu tehnoloģiju standartiem, noteikt pamatotas prasības elektronisko sakaru komersantiem un nodrošināt lietotāju tiesību aizsardzību. Lai izstrādātu vienotu uzraudzības mehānismu, tika izvērtētas esošās uzraudzības prasības, identificēti aspekti, kas kavē uzraudzības rezultātu salīdzināmību un uztveramību, noteikti principi, ko ir būtiski ņemt vērā, lai nodrošinātu to, ka interneta kvalitātes rādītāju novērtējums ir objektīvs, jēgpilns un izmantojams dažādu lietotāju loka vajadzībām.

Ņemot vērā interneta pakalpojuma būtisko nozīmi un Eiropas stratēģiskos plānus tā pieejamības veicināšanai, objektīvu uzraudzības rezultātu iegūšana ir īpaši svarīga. Promocijas darbā tika novērtēta praktisko mērījumu nozīme faktisko interneta pakalpojuma kvalitātes rādītāju novērtēšanas aspektā, kas, ievērojot atbilstošus mērīšanas principus, nodrošina nepieciešamo rezultātu objektivitāti. Tādējādi promocijas darbā tika izstrādāta pilnīga un matemātiski pamatota interneta pakalpojuma kvalitātes uzraudzības un novērtēšanas metodika, kas ietver svarīgus nosacījumus dažādiem mērīšanas apstākļiem, atbilstoša diennakts perioda un mērījumu izlases apjoma noteikšanu, kā arī mērījumu vietu skaita, to ģeogrāfiskā sadalījuma principu un mērījumu atkārtojuma cikla izvēli.

Turklāt, lai nodrošinātu platjoslas izplatības novērtēšanu un veicinātu tās turpmāku izplatību un atbilstīgas kvalitātes interneta pakalpojuma pieejamību, promocijas darbā tika izstrādāts algoritms, lai noteiktu ģeogrāfiskās teritorijas, kurās pietiekamā apjomā un kvalitātē iedzīvotājiem nav nodrošināts interneta pieslēgums. Šādu teritoriju noteikšana nodrošinās iespēju plānot un veikt finansiālos ieguldījumus elektronisko sakaru tīkla attīstībā, tostarp sekmējot ieguldījumu pamatotību, piemērojot valsts atbalsta programmas, un veicinās plašāku interneta pakalpojuma pieejamību iedzīvotājiem, tādējādi nodrošinot universālā pakalpojuma prasību izpildi.

Papildus tam promocijas darbā izvērtēta minimālo kvalitātes prasību noteikšanas nozīme atbilstīgas piekļuves platjoslas interneta nodrošināšanai. Secināts, ka, lai nodrošinātu pienācīgu iedzīvotāju sociālās iekļaušanas līmeni un dalību digitālajā ekonomikā un sabiedrībā, ir nepieciešams noteikt minimālos interneta pakalpojuma pieslēguma ātruma rādītājus. Secināts, ka fiksētā tīklā sniegtam interneta pakalpojumam un mobilā tīklā sniegtam interneta pakalpojumam, kas nodrošināts fiksētā pieslēguma vietā, minimālais nodrošināmais lejupielādes ātrums ir vismaz 6 Mbit/s, augšupielādes ātrums – vismaz 2 Mbit/s.

Promocijas darbā ir iezīmēta arī iespējamā turpmākā uzraudzības pieeja. Plānojot interneta kvalitātes uzraudzību nākotnē, plaši izvērsoties 5G tehnoloģijas pieslēguma tīklam, kā arī lai nodrošinātu faktisku kvalitātes parametru rādījumu atspoguļošanu atbilstošajā ģeogrāfiskā

mērogā, ir piedāvāts izstrādāt kvalitātes novērtēšanas metodoloģiju, kas būs balstīta mobilo operatoru datu analītikā.

Promocijas darbā ir apkopoti pabeigtu pētījumu rezultāti un definēti iespējamie turpmākie pētījumu virzieni.

1. Izvērtēt *MDT* risinājuma izmantošanu praksē, novērtējot faktiskos pakalpojuma kvalitātes rādītājus plašā teritorijā, kas varētu būt īpaši piemērojams 5G tehnoloģijas tīklu veikspējas uzraudzībā.
2. Izstrādāt un izmantot lielo datu analīzes algoritmus ģeogrāfiskā apsekojuma informācijas analītikai un nepietiekama platjoslas interneta pārklājuma teritoriju noteikšanai.

IZMANTOTĀ LITERATŪRA

- [1] Ericsson, “Ericsson Mobility Report”, 2021 // <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/reports/june-2021> – pp. 4–14, 20–24.
- [2] OECD, "Broadband policy and technology developments", OECD Digital Economy Papers, No. 317, OECD Publishing, Paris, 2021 // <https://doi.org/10.1787/e273ff77-en> – pp. 50–51.
- [3] GSM asociācija – GSMA; “The Mobile Economy 2021”// <https://www.gsma.com/mobileeconomy>; GSMA Intelligence 2021, pp. 2–11, 19–33.
- [4] Starptautiskā Telekomunikāciju savienība (ITU), Starptautisko mobilo telekomunikāciju (IMT) attīstības mērķu vadlīnijas, Rekomendācija ITU-R M.2083 “IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond”//2015, pp. 4–19.
- [5] Starptautiskā Telekomunikāciju savienība (ITU), Pārskats ITU-R M.2410-0 “Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s)” // 2017, pp. 1–9.
- [6] Komisijas Paziņojums “EIROPA 2020. Stratēģija gudrai, ilgtspējīgai un integrējošai izaugsmei” (Briselē, 3.3.2010 COM(2010), 2020), // https://ec.europa.eu/eu2020/pdf/1_LV_ACT_part1_v1.pdf.
- [7] Komisijas paziņojums Eiropas Parlamentam, Padomei, Eiropas Ekonomikas un sociālo lietu komitejai un Reģionu komitejai, “Digitālā programma Eiropai” (Briselē, 19.5.2010 COM(2010)245).
- [8] Komisijas paziņojums Eiropas Parlamentam, Padomei, Eiropas Ekonomikas un sociālo lietu komitejai un Reģionu komitejai, “Digitālā vienotā tirgus stratēģija Eiropai”, (Briselē, 6.5.2015. COM(2015) 192) // <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LV/TXT/?uri=celex%3A52015DC0192>.
- [9] Komisijas paziņojums Eiropas Parlamentam, Padomei, Eiropas Ekonomikas un sociālo lietu komitejai un Reģionu komitejai, “Konkurētspējīga digitālā vienotā tirgus savienojamība. Virzība uz Eiropas Gigabitu sabiedrību”, COM(2016)587, 2016 // <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LV/TXT/?uri=CELEX%3A52016DC0587>.
- [10] Body of European Regulators for Electronic Communications (BEREC) Guidelines on Geographical surveys of network deployments, BoR (20) 42, 2020, pp. 7–50.
- [11] Komisijas paziņojums Eiropas Parlamentam, Padomei, Eiropas Ekonomikas un sociālo lietu komitejai un Reģionu komitejai, “Eiropas digitalizācijas programma – digitalizācijas virzīta Eiropas izaugsme”, (Briselē, 18.12.2012 COM(2012) 784) – 3.–16. lpp.
- [12] European Commission project “Mapping of Fixed and Mobile Broadband Services in Europe (SMART 2014/0016)” <https://www.broadband-mapping.eu>.
- [13] Lipenbergs, E., Stafecka, A., Ivanovs, Ģ., **Smirnova (Vagale), I.**, “Quality of Service Measurements and Service Mapping for the Mobile Internet Access”// Proceedings of Progress In Electromagnetics Research Symposium PIERS 2017, Saint Petersburg, RU, 2017, pp. 2526–2532.

- [14] Body of European Regulators for Electronic Communications (BEREC) “A framework for Quality of Service in the scope of Net Neutrality”, BoR (11) 53, 2011, pp. 6–53.
- [15] Eiropas Telekomunikāciju standartu institūts “Speech and multimedia Transmission Quality (STQ); Throughput Measurement Guidelines” (ETSI EG 203 165 V1.1.1), 2012, pp. 8–28.
- [16] M. Mathis, M. Allman, “A Framework for Defining Empirical Bulk Transfer Capacity Metrics”, Internet Engineering Task Force IETF, RFC 3148, July 2001.
- [17] Oueis, J., Strinati, E., “Uplink Traffic in Future Mobile Networks: Pulling the Alarm.”, International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks, 2016, pp. 583–593.
- [18] Sundaresan K., White G., Glennon S., “Latency Measurement: What is latency and how do we measure it?” Society Of Cable Telecommunications Engineers (SCTE), International Society of Broadband Experts (ISBE), CableLabs, NCTA, Fall Technical Forum, October 2020, pp. 4–24.
- [19] R. Prasad, C. Dovrolis, M. Murray, K. Claffy, “Bandwidth estimation: metrics, measurement techniques, and tools,” IEEE Network, vol. 17, no. 6, Nov.–Dec. 2003, pp. 27–35.
- [20] Kevin R. Fall, W. Richard Stevens, “TCP/IP Illustrated, Vol. 1: The Protocols” // Addison-Wesley Professional, ISBN: 9780321336316, 2011, pp. 579–793.
- [21] Constantine B., Forget G., Geib R., Schrage R., “Framework for TCP Throughput Testing”, Internet Engineering Task Force IETF, RFC 6349, August 2011, pp. 5–26.
- [22] Lipenbergs, E., StafECKa, A., Ivanovs, G., **Smirnova (Vagale), I.**, Gavars P., “Quality of Service Parameter Measurements Data Analysis in the Scope of Net Neutrality”// Proceedings of Progress In Electromagnetics Research Symposium PIERS 2017, Nanyang, SG, 2017, pp. 1–5.
- [23] **Smirnova (Vagale), I.**, Lipenbergs, E., Bobrovs, V., Ivanovs, G., The Analysis of the Impact of Measurement Reference Points in the Assessment of Internet Access Service Quality, No: 2019 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2019), KĶina, Ksiamena, 17.–20. decembris, 2019.
- [24] **Smirnova (Vagale), I.**, Lipenbergs, E., Bobrovs, V. “Mathematical algorithm for processing measurement results of internet access service in the scope of net neutrality”// Proceedings of LATVIAN JOURNAL OF PHYSICS AND TECHNICAL SCIENCES, LV, 2018, No. 3, pp. 63–69.
- [25] **Vagale, I.**, Lipenbergs, E., Bobrovs, V., Ivanovs, G., Development of Internet Measurement Principles for Representation of Measured Provision of Service (QoS-2). Journal of Information and Telecommunication, 2021, Vol. 5, No. 2., 267.–277. lpp.
- [26] Weiers R. M., “Introduction to Business Statistics, Seventh Edition” // South-Western, Cengage Learning, 2011, pp. 293–294.
- [27] 3GPP TS 37.320. V16.6.0 (2021-09) 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Universal Terrestrial Radio Access

- (UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio measurement collection for Minimization of Drive Tests (MDT); Overall description; Stage 2 (Release 16), pp. 9–28.
- [28] 3GPP TS 32.422 V12.6.0 (2021-03) 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Telecommunication management; Subscriber and equipment trace; Trace control and configuration management (Release 12), pp. 11–140.
- [29] J. Johansson, W. A. Hapsari, S. Kelley and G. Bodog, “Minimization of drive tests in 3GPP release 11,” in *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. 11, November 2012, pp. 36–43.
- [30] W. A. Hapsari, A. Umesh, M. Iwamura, M. Tomala, B. Gyula and B. Sebire, “Minimization of drive tests solution in 3GPP,” in *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, No. 6, June 2012, pp. 28–36.
- [31] Micheli D., Diamanti R., “Statistical Analysis of Interference in a Real LTE Access Network by Massive Collection of MDT Radio Measurement Data from Smartphones,” 2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS-Spring), 2019, pp. 1906–1916.
- [32] Po-Chiang Lin, “Minimization of Drive Tests using measurement reports from user equipment,” 2014 IEEE 3rd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), 2014, pp. 84–85.
- [33] **Smirnova (Vagale), I.**, Lipenbergs, E., Bobrovs, V., Gavars, P., Ivanovs, G. Network Slicing in the Scope of Net Neutrality Rules. No: Progress In Electromagnetics Research Symposium – Spring (PIERS 2019), Itālija, Roma, 17.–20. jūnijs, 2019.



Inga Vagale ir dzimusi 1990. gadā Rīgā. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) 2012. gadā ieguvusi bakalaura grādu elektrozinātnē un 2014. gadā inženierzinātņu maģistra grādu telekomunikācijās. Kopš 2012. gada strādā telekomunikāciju jomā. Patlaban ieņem galvenās pakalpojumu kvalitātes ekspertes amatu Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisijas Elektronisko sakaru un pasta departamenta Pakalpojumu kvalitātes nodaļā. I. Vagale ir RTU Elektronikas un telekomunikāciju fakultātes Telekomunikāciju institūta pētniece.