

Alīna Stafecka

**MOBILĀ INTERNETA PAKALPOJUMA
KVALITĀTES MĒRĪJUMU NODROŠINĀŠANAS
RISINĀJUMA IZSTRĀDE**

Promocijas darba kopsavilkums

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Elektronikas un telekomunikāciju fakultāte

Telekomunikāciju institūts

Alīna Stafecka

Doktora studiju programmas “Telekomunikācijas” doktorante

MOBILĀ INTERNETA PAKALPOJUMA KVALITĀTES MĒRĪJUMU NODROŠINĀŠANAS RISINĀJUMA IZSTRĀDE

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs

profesors *Dr. sc. ing.*

VJAČESLAVS BOBROVS

RTU Izdevniecība

Rīga 2023

Stafecka, A. Mobilā interneta pakalpojuma kvalitātes mērījumu nodrošināšanas risinājuma izstrāde. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2023. 33 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-08” 2023. gada 12. maija lēmumu, protokols Nr. 22.

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2023. gada 15. septembrī plkst. 11 Rīgas Tehniskās universitātes Elektronikas un telekomunikāciju fakultātē, Āzenes ielā 12, 201. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Sandis Spolītis,
Rīgas Tehniskā universitāte

Emeritētais profesors *Dr. oec., Mg. sc. ing.* Juris Binde,
Vidzemes Augstskola, Latvija

Profesore *Dr. paed.* Sarma Cakula,
Vidzemes Augstskola, 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.

Alīna Stafecka (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 25 attēli, 29 tabulas, septiņi pielikumi, kopā 155 lappuses, ieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 136 nosaukumi.

ANOTĀCIJA

Ievērojot ik gadu pieaugošo ar interneta starpniecību sniegto pakalpojumu klāstu, kā arī arvien vairāk palielinoties tiešsaistes satura daudzumam, interneta piekļuves pakalpojuma kvalitātes rādītāji, īpaši mobilā tīkla gadījumā, kas jau tagad galalietotāju skaita ziņā būtiski pārsniedz fiksētā tīkla galalietotāju skaitu, kļūst arvien svarīgāki, izvērtējot iespēju saņemt pakalpojumu vai piekļūt saturam. Līdz ar to ir paredzēts normatīvais regulējums, kas nosaka, ka atbildīgajām institūcijām ir jānodrošina interneta piekļuves pakalpojuma atklāta un caurskatāma novērtēšana un uzraudzība.

Promocijas darbā gaitā veikts pētījums, kurā izskatīts un novērtēts interneta piekļuves pakalpojuma kvalitātes uzraudzības un novērtēšanas process, kas balstās mērījumu veida izvēlē atkarībā no normatīvā regulējuma prasībām un mērījumu veikšanas mērķiem, mērījumu ietekmējošiem faktoriem un citiem tehniskiem un regulatīviem aspektiem. Papildus regulējumā noteiktām normām promocijas darbā tiek piedāvāti un praktiski izvērtēti papildu mērījumu iekārtu izvietošanas kritēriji, kuru pamatā ir signāla parametru izvērtējums.

Darba rezultātā izstrādātas interneta piekļuves pakalpojuma kvalitātes mērījumu veikšanas vadlīnijas, kas paredz konkrētu darbību un nosacījumu kopu, nosakot mērījumu veikšanas laikus, mērījumu iekārtu izvietošanu, references parametru vērtības un citus nosacījumus, lai nodrošinātu mērījumu procesa atklātumu un caurskatāmību, kā arī mērījumu rezultātu salīdzināmību un objektivitāti.

SATURS

ANOTĀCIJA.....	4
SAĪSINĀJUMU SARAKSTS	6
DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS.....	8
Tēmas aktualitāte	8
Darba mērķis un uzdevumi.....	9
Pētījumu metodika	10
Pētījumu rezultāti un zinātniskā novitāte	10
Promocijas darbā aizstāvamās tēzes	12
Promocijas darba rezultātu aprobācija	13
Darba apjoms un struktūra.....	15
PROMOCIJAS DARBA NODAĻU IZKLĀSTS.....	17
Promocijas darba pirmā nodaļa.....	17
Promocijas darba otrā nodaļa.....	19
Promocijas darba trešā nodaļa	24
Promocijas darba ceturtnā nodaļa	27
PROMOCIJAS DARBA REZULTĀTI.....	29
IZMANTOTĀ LITERATŪRA	31

SAĪSINĀJUMU SARAKSTS

A

AS – *Autonomous system* – autonomā sistēma

B

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

BOR – *BEREC Report* – BEREC pārskats

C

CEPT – *European Conference of Postal and Telecommunications Administrations* – Eiropas Pasta un telekomunikāciju administrācija

CISCO – *Commercial & Industrial Security Corporation* – tirdzniecības un rūpnieciskās drošības korporācija

CQI – *Channel Quality Indicator* – kanāla kvalitātes indikators

D

dB – *decibel* – decibels

dBm – *decibel-milliwatts* – decibels uz vienu milivatu

E

ECC – *Electronic Communication Committee* – Elektronisko sakaru komiteja

EECC – *European Electronic Communication Code* – Eiropas elektronisko sakaru kodekss

EG – *ETSI Guide* – ETSI rokasgrāmata

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

G

GB – *Gigabyte* – gigabaits

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

I

IP – *Internet Protocol* – interneta protokols

IPv4 – *Internet Protocol version 4* – interneta protokola ceturrtā versija

IPv6 – *Internet Protocol version 6* – interneta protokola sestā versija

ITU – *International Telecommunication Union* – Starptautiskā telekomunikāciju savienība

ITU-T – *ITU Telecommunication Standardization Sector* – ITU Telekomunikāciju standartizācijas sektors

IXP – *Internet Exchange Point* – interneta apmaiņas punkts

L

LTE – Long-Term Evolution – ceturtais paaudzes mobilie sakari

M

MCC – Mobile Country Code – publiskā mobilā telefonu tīkla valsts kods

MNC – Mobile Network Code – publiskā mobilā telefonu tīkla kods

– *Megabit per second* – megabiti sekundē

ms – milliseconds – milisekundes

N

NR – New Radio – mobilā elektronisko sakaru tīkla piektā paaudze

NTP – network termination point – tīkla pieslēguma punkts

O

OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development – Ekonomiskās sadarbības un attīstības organizācija

Q

QoS – Quality of Service – pakalpojuma kvalitāte

R

RIPE NCC – Regional Internet Registries – reģionālais interneta reģistrs

RSRP – Reference Signal Received Power – uztvertā references signāla jauda

RSRQ – Reference Signal Received Quality – uztvertā references signāla kvalitāte

RSSI – Received Signal Strength Indication – uztvertā signāla stipruma rādītājs

S

SINR – Signal-to-interference-plus-noise ratio – signāla un traucējumu trokšņa attiecība

SPRK – Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisija

T

TS – Technical specification – tehniskā specifikācija

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Ik gadu arvien lielāks publisko pakalpojumu, tai skaitā valsts sniegto, skaits tiek integrēts interneta vidē, un pakāpeniski tiešsaistes pakalpojumi aizstāj pakalpojumu sniegšanu klātienē. Eiropas regulējums un atbalstāmie projekti Eiropas Savienības dalībvalstīm paredz izstrādāt elektroniskās pakalpojumu sistēmas, kas būs pieejamas visiem valsts iedzīvotājiem un ko iedzīvotāji varēs izmantot, lai saņemtu aktuālo informāciju, noformētu dokumentus, kā arī saņemtu medicīniskas konsultācijas un citus pakalpojumus [1], [2]. Turklāt, attīstoties galiekārtu tehnoloģiskām iespējām un tiešsaistes satura platformām, kas ļauj veidot liela apjoma saturu un šo saturu izvietot tiešsaistes platformās, pieprasījums pēc augstas veiktspējas elektronisko sakaru tīkliem tikai pieaug. Līdz ar lielas daļas pakalpojumu integrāciju interneta vidē pieaug arī interneta pakalpojuma sociālā vērtība, ko nosaka galalietotāju ierobežotās iespējas integrēties un darboties mūsdienu sabiedrībā bez piekļuves interneta pakalpojuma sniegtajām iespējām.

Mobilās elektronisko sakaru tīkla tehnoloģijas, salīdzinot ar fiksētā elektronisko sakaru tīklu tehnoloģijām, piedāvā daudz plašāku funkcionalitāti, tai skaitā nodrošina lietotāju mobilitāti visā pasaulē. Attīstoties mobilā tīkla tehnoloģijām, pieaug arī to sniegtā elektronisko sakaru pakalpojumu kvalitāte, līdz ar to ir novērojams mobilo pieslēgumu un iekārtu īpatsvara būtisks palielinājums, salīdzinot ar fiksētiem pieslēgumiem [3], [4]. Latvijas Republikā mobilo pieslēgumu skaits jau 2020. gada beigās septiņas reizes pārsniedza fiksēto pieslēgumu skaitu [3]. Pēc *OECD* datiem, viens Latvijas Republikas iedzīvotājs jau tagad mēnesī patērē vairāk nekā 30 GB datu, izmantojot tikai mobilo elektronisko sakaru tīklu [3].

Tomēr līdz ar pieprasījuma palielināšanos pieaug arī noslodze uz tīklu, un tā rezultātā var būt sniegtā interneta piekļuves pakalpojuma kvalitātes pasliktināšanās, kas īpaši izpaužas mobilā elektronisko sakaru tīklā, ievērojot tā tehnoloģiskās īpatnības, ko ietekmē mobilo pieslēgumu skaita un noslodzes pieaugums [5].

Ņemot vērā minēto, elektronisko sakaru pārklājuma nodrošināšana mobilā elektronisko sakaru tīklā ir viens no Eiropas Savienības mērķu prioritāriem virzieniem, lai gan tas neizslēdz nepieciešamību stimulēt arī fiksēto elektronisko sakaru tīklu attīstību, ievērojot to, ka fiksētie elektronisko sakaru tīkli tiek izmantoti ne tikai tāpēc, lai nodrošinātu elektronisko sakaru pakalpojumus galalietotājiem, bet arī lai nodrošinātu mobilā tīkla kapacitāti līdz bāzes stacijai [1].

Eiropas Savienības regulējums nacionālām regulējošām iestādēm paredz ieviest stingru sniegtā interneta piekļuves pakalpojuma uzraudzības mehānismu, tāpēc ir izstrādāti normatīvie akti, vadlīnijas un citi saistošie dokumenti, kas nosaka prasības regulatīvos mērījumos izmantojamām interneta pakalpojuma mērījumu rīkam, mērāmiem *QoS* parametriem, datu apkopošanas un attēlošanas kritērijiem un tīklu attīstību veicinošiem pasākumiem [6], [7], [8] [9], [10].

Tomēr nedz starptautiskie, nedz Eiropas Savienības standarti, rekomendācijas un citi dokumenti neparedz detalizētus praktisko mērījumu veikšanas kritērijus un nosacījumus, līdz

ar to, nav vienotas pieejas mērījumu veikšanas kārtībai. Rezultātā nav nodrošināts mērījumu procesa atklātums un caurskatāmība, kas interneta pakalpojuma sniedzējiem un galalietotājiem neļauj patstāvīgi veikt pakalpojuma mērījumus, kas būtu līdzvērtīgi regulatīviem mērījumiem un ko varētu izmantot kā likumisku sniegtā vai saņemtā pakalpojuma kvalitātes apliecinājumu.

Lai nodrošinātu salīdzināmus iegūto mērījumu rezultātus, ko pēc tam var apkopot atbilstoši Eiropas Savienības normatīvām prasībām un pēc kuriem izteikt secinājumus par elektronisko sakaru komersantu nodrošinātā interneta piekļuves pakalpojuma kvalitāti mērījumu vietās un valsts ietvaros, nepietiek ar standarta mērījumu metodikas izstrādi, ko paredz Eiropas un nacionālais regulējums. Ir nepieciešama paša mērījumu procesa prasību un nosacījumu definēšana un stingra uzraudzība [10], [11].

Vienlaikus elektronisko sakaru komersanti pieprasa arī detalizētu interneta piekļuves pakalpojuma novērtējuma metodiku, tai skaitā atklātu un caurskatāmu mērījumu veikšanas procedūru, kas skaidri definētu mērījumu veikšanas apstākļus un mērījumu veikšanai izmantotās iekārtas, tādējādi ļaujot pārbaudīt un salīdzināt regulējošās iestādes veikto mērījumu rezultātus un nodrošināt vienlīdzīgu mērījumu veikšanu gan komersantiem, gan galalietotājiem [12].

Darba mērķis un uzdevumi

Ņemot vērā to, ka nav vienotu mobilā interneta piekļuves pakalpojuma mērījumu veikšanas vadlīniju, kas būtu piemērojamas neatkarīgi no elektronisko sakaru tīklā izmantotās tehnoloģijas un nodrošinātu pamatotu un salīdzināmu kvalitātes mērījumu rezultātu iegūšanu, ir definēts šāds **promocijas darba mērķis**: veikt mobilā interneta piekļuves pakalpojuma mērījumu procesa nodrošināšanai nepieciešamo aspektu un parametru izpēti, izstrādājot mērījumu veikšanas procesa vadlīnijas, kas balstās uz standartiem, rekomendācijām, matemātiskiem aprēķiniem un praktiskajiem rezultātiem un nodrošina mērījumu procesa atklātumu un caurskatāmību.

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

1. Izvērtēt dažādus interneta piekļuves pakalpojuma mērījumu veidus, nosakot katra mērījumu veida priekšrocības un trūkumus, definējot katram mērījumu veidam raksturīgus mērījumu veikšanas nosacījumus un mērījumu rezultātus ietekmējošos faktorus.
2. Noteikt optimālo interneta piekļuves pakalpojuma mērījumu servera izvietojuma vietu Latvijas Republikas publiskā interneta tīklā, kas apmierinātu Eiropas Savienības regulējuma prasības un nodrošinātu salīdzināmu mērījumu rezultātu iegūšanu nacionālā līmenī.
3. Izstrādāt mērījumu automatizācijas algoritmu, nosakot kritērijus interneta piekļuves pakalpojuma un signāla parametru mērījumu veikšanai un nolasīšanai, kā arī iegūto rezultātu apkopošanai datubāzē.
4. Izpētīt elektronisko sakaru pakalpojuma kvalitātes parametru un signāla parametru vērtību atkarību no mērījumu veikšanas vietas un laika.
5. Noteikt mobilā interneta piekļuves pakalpojuma mērījumu sadalījumu starp dažādiem apdzīvoto vietu tipiem, balstoties uz praktiski iegūto rezultātu matemātisko apstrādi.

6. Novērtēt mērījumu iekārtu izvietojuma ietekmi uz mobilā interneta piekļuves pakalpojuma mērījumu rezultātiem un noteikt mērījumu iekārtu izvietojuma kritērijus dažādiem mērījumu veidiem.
7. Salīdzināt izlases mērījumu un mērījumu kustībā (*drive test*) efektivitāti apdzīvotās vietās, balstoties uz praktisko rezultātu matemātiskiem aprēķiniem un patērēto mērījumu laiku.
8. Novērtēt sakarību un korelāciju starp mobilā interneta piekļuves pakalpojuma kvalitātes parametru un signāla parametru vērtībām.
9. Izstrādāt mobilā interneta piekļuves pakalpojuma mērījumu veikšanas vadlīnijas, kas paredzētas mērījumu veicējam un var būt publiskas, lai nodrošinātu nacionālās regulējošās iestādes darbības atklātumu un caurskatāmību.

Pētījumu metodika

Promocijas darba mērķa sasniegšanai un uzdevumu izpildei ir veikta literatūras analīze, praktiskie mērījumi, matemātiskie aprēķini, statistikas datu analīze un matemātisko apstrādes algoritmu izveide. *QoS* un signāla parametru mērījumiem un to datu apkopošanai tika uzrakstīts programmas kods *python* programmēšanas valodā, izmantojot dažādu uzņēmumu un institūciju interneta piekļuves pakalpojuma kvalitātes vai signāla parametru mērījumu rīkus. Mērījumu rezultātu apstrāde tika veikta, izmantojot matemātiskās un statistiskās analīzes metodes. Definējot mērījumiem un to plānošanai nepieciešamos lielumus, tika izteikti matemātiskas apstrādes algoritmi formulu veidā. Datu analīzei tika izmantots programmas kods *python* programmēšanas valodā un *Microsoft Excel* programatūra. Mērījumu datu plūsmas uzraudzībai tika izmantota *Command Prompt* saskarne.

Pētījumu rezultāti un zinātniskā novitāte

Promocijas darba praktiskā vērtība un jaunieguvumi

1. Izstrādāts mērījumu automatizācijas un datu apkopošanas algoritms programmas koda veidā, ko var izmantot, veicot turpmākos pētījumus un nodrošinot interneta piekļuves pakalpojuma uzraudzības mērījumus Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisijas vajadzībām.
2. Izvērtēti un piedāvāti interneta piekļuves pakalpojuma praktiskie mērījumu veikšanas modeļi un to parametri, kas ņemti vērā, nosakot prasības interneta pakalpojuma kvalitātes mērījumu sistēmai, kas tiks izmantota Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisijas funkciju izpildei.
3. Pamatojoties uz veikto pētījumu rezultātiem un novērojumiem, izstrādātas universālas interneta piekļuves pakalpojuma mērījumu veikšanas vadlīnijas, ko pēc interneta pakalpojuma kvalitātes novērtēšanas sistēmas izstrādes var izmantot, nosakot prasības attiecībā uz interneta piekļuves pakalpojuma kvalitātes mērījumu kārtību un izpildi un iekļaujot tās Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisijas normatīvos aktos.

4. Izstrādātos interneta piekļuves mērījumu veikšanas principus piedāvāts izskatīt Eiropas mērogā, tādējādi nodrošinot vienotu mērījumu veikšanas principu ieviešanu Eiropas līmenī.

Promocijas darba izstrādē iegūtie nozīmīgākie secinājumi

1. Veicot autonomu sistēmu starpsavienojumu un elektronisko sakaru komersantiem piederošo autonomu sistēmu analīzi, konstatēts, ka Latvijas Republikā ir iespējams izvēlēties vienu interneta pakalpojuma kvalitātes mērījumu servera izvietošanas vietu, kas nodrošinātu īsāku ceļu līdz mērījumu serverim un nacionāliem satura resursiem veicot mērījumus no jebkuras Latvijas Republikas elektronisko sakaru tīkla vietas, tādējādi nodrošinot visu regulējuma prasību izpildi, kā arī salīdzināmu un objektīvu mērījumu rezultātu iegūšanu.
2. Ja mērījumu veikšanai tiek izmantotas galalietotājiem paredzētas galiekārtas, to nomaiņa uz jaunākām iekārtām ir jāveic vismaz reizi trijos gados, tādējādi nodrošinot, ka elektronisko sakaru komersantu sniegtais mobilā interneta piekļuves pakalpojums tiek vērtēts, ņemot vērā visas elektronisko sakaru tīklā izmantotās jaunākas tehnoloģijas un radiofrekvenču spektra joslas.
3. Mērījumi kustībā esošā transportlīdzeklī jeb *drive test* mērījumi ir vienīgais mērījumu veids, kas spēj nodrošināt Eiropas Savienības definēto prasību ceļu maģistrālēs nodrošināt interneta pakalpojuma pieejamību, pārbaudi un novērtējumu. Gan resursu, gan laika ietilpības ziņā tas ir efektīvāks par izlases mērījumu veidu, tāpēc *drive test* mērījumu atbalsts ir svarīgs mērījumu rīka izvēles kritērijs.
4. Signāla parametru mērījumus ir ieteicams izmantot regulatīvo mērījumu veikšanas vietas noteikšanai iekšelpās, transportlīdzeklī vai ārtelpās, mērījumiem izvēloties vietu, kur signāla parametru vērtības ir labākas, vai nodrošinot mērījumus noteiktos signāla parametru vērtību diapazonos, tādējādi turpmākajā mērījumu rezultātu analizē nodrošinot, ka mērījumi ir veikti vienādos apstākļos un tāpēc ir salīdzināmi. Vienlaikus mērījumu rezultātu publikāciju nolūkā mērījumos iegūtos datus ieteicams šķirot atbilstoši signāla apstākļiem.
5. Ja regulatīvo mērījumu ietvaros signāla parametru novērtējums nav iespējams, tad transportlīdzeklī mērījumu iekārtas jāizvieto pie transportlīdzekļa priekšēja paneļa, logu augstumā, iekšelpās – pēc iespējas tuvāk logam.
6. Plānoto un faktisko mērījumu skaita aprēķinam ir jāizmanto starptautiskos standartos definētā aprēķinu formula (3.1. formula), pielāgojot tās parametrus atbilstoši iestādē noteiktajiem ticamības pakāpes un relatīvās mērījumu precizitātes kritērijiem, kas definēti saistībā ar mērījumu rezultāta apstrādes mērķi. Tomēr mērījumu gaitā, ievērojot resursu pieejamību, var būt nepieciešams mērījumu skaitu pārskatīt, ievērojot to, ka plānoto mērījumu apjoms ir atkarīgs no kontroles mērījumu rezultātiem, bet praktisko mērījumu gadījumā pie atšķirīgām mērījumu rezultātu vērtībām, lai sasniegtu noteikto mērījumu ticamības pakāpi, var būt nepieciešams lielāks mērījumu skaits.
7. *Drive test* un izlases mērījumi, kuru veikšana nav paredzēts ārpus standarta darba laika, jāveic darbdienās laikā no plkst. 9 līdz plkst. 15, tādējādi turpmākā mērījumu rezultātu

apstrādē nodrošinot, ka mērījumu rezultāti ir 4 % kļūdas robežās no diennakts laikā veikto mērījumu rezultātiem.

8. Pastāv tieša korelācija starp *QoS* un signāla parametriem *LTE* mobilā tīklā, kas izpaužas stingrās korelācijas koeficientu vērtībās starp lejupielādes, augšupielādes ātrumu vērtībām un *RSRP*, *RSSI* un *RSRQ* parametru vērtībām. Citu *QoS* parametru gadījumā korelācijas koeficients ir atšķirīgs, no kā izriet, ka, pamatojoties uz signāla parametru vērtībām, ir iespējams prognozēt signāla parametru vērtības mobilās šūnas pārklājuma zonā, tomēr konkrētas *QoS* parametru vērtības ir raksturīgas un paredzamas tikai konkrētā operatora tīklā.
9. Nav ieteicams bez pamatota iemesla, piemēram, galalietotāja sūdzības izskatīšanai, regulatīvo mērījumu datu apkopošanas nolūkiem izvietot mērījumu iekārtas vietās, kur signāla parametru vērtības *RSRP* ir zemākas par -100 dBm, *RSSI* ir zemākas par -75 dBm, *RSRQ* ir zemākas par -20 dB, *SINR* ir zemākas par 0, jo tādā gadījumā bieži novērota *QoS* parametru būtiska pasliktināšanās, kas būtiski ietekmē mērījumu rezultātu apkopojumu un salīdzināmību.
10. Izstrādāts mērījumu automatizācijas algoritms programmas koda veidā, kas nodrošina interneta piekļuves pakalpojuma mērījumu nepārtrauktu veikšanu, kā arī iegūto rezultātu apkopšanu datubāzē, kas nodrošina darbinieku un laika resursu ekonomiju, izslēdzot cilvēciskās kļūdas iespēju mērījumu veikšanas procesā.
11. Izstrādātas interneta piekļuves pakalpojuma kvalitātes mērījumu veikšanas vadlīnijas, kas balstītas uz standartiem, rekomendācijām, praktiskiem un matemātiski iegūtiem pētījumu rezultātiem un ko var izmantot regulatīvo mērījumu nodrošināšanai.

Darba izstrādes un informācijas analīzes laikā konstatēts, ka par signāla parametru references punktu pēc starptautiskiem standartiem ir noteikts galiekārtas uztvērēja antenas spraudnis, līdz ar to izdarīts papildus secinājums, ka tīkla pieslēguma punkts (*NTP*) mobilā elektronisko sakaru tīkla gadījumā būtu definējams kā galiekārtas un uztvērēja antenas savienojums. Tāds definējums noteiktu precīzāku *NTP* atrašanas vietu, salīdzinot ar *BEREC* vadlīnijās un Latvijas normatīvos aktos noteikto mobilā *NTP* atrašanas vietu, kas pašlaik definēta kā punkts gaisā starp raidītāju un uztvērēju.

Promocijas darba rezultātu izmantošana

Promocijas darba izstrādes laikā iegūtie un pētījumā atspoguļotie rezultāti tiks izmantoti Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisijas normatīvo aktu izstrādē, regulatīvo mērījumu nodrošināšanā, izvēloties interneta piekļuves pakalpojuma novērtēšanas sistēmu.

Promocijas darbā aizstāvamās tēzes

1. Latvijas Republikā ir iespējams izvēlēties vienu interneta pakalpojuma kvalitātes mērījumu servera izvietojuma vietu tīklā tā, lai tā atbilstu visām regulējuma prasībām un nodrošinātu salīdzināmus un objektīvus mērījumu rezultātus.

2. Signāla parametri ir jāizmanto mērījumu vietas noteikšanai un turpmākai analīzei, tādējādi nodrošinot rezultātu salīdzināmību, pamatotību un turpmāko darbību mobilā tīkla attīstībai, prognozējamību.
3. Mērījumu veikšanas laika, apjoma un ģeogrāfiskā izvietojuma noteikšanai un plānošanai valsts mērogā katram pārskata periodam ir nepieciešams veikt starptautiskiem standartiem atbilstošus statistiskos prognozes aprēķinus, ņemot vērā pieejamos resursu un mērījumu veidiem raksturīgos nosacījumus.
4. Starp signāla un *QoS* parametriem *LTE* mobilā elektronisko sakaru tīklā pastāv stingra korelācija.

Promocijas darba rezultātu aprobācija

Promocijas darba galvenie rezultāti prezentēti astoņās starptautiskajās zinātniskajās konferencēs, kā arī ietverti vienā publikācijā zinātniskajā žurnālā un septiņos rakstos pilna teksta konferenču rakstu krājumos. Viens raksts iesniegts, pieņemts un prezentēts zinātniskā konferencē, kas notika 2023. gada jūlijā, un tas tiks publicēta tuvākajā laikā.

Ziņojumi starptautiskajās konferencēs

1. **Stafecka, A.**, Lizunovs, A., Olins, A., Rjumsins, M. and Bobrovs, V., “The Evaluation of the Internet Access Service QoS Measurement Equipment Placement Conditions Based on Signal Parameters Values”. 2023 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS), Prague, Czech Republic, 3–6, July 2023.
2. **Stafecka, A.**, Bobrovs, V. “Evaluation and determination of the internet access service quality parameter measurement equipment placement conditions”. 63rd International Scientific Conference of Riga Technical University, 14.10.2022.
3. **Stafecka, A.**, Lizunovs, A., Ivanovs, G., Bobrovs, V. “Dependence between Signal Parameter Values and Perceived Internet Access Service QoS in Mobile Networks”. Progress in Electromagnetics Research Symposium, 2021, 2021-November, pp. 1419–1427.
4. **Stafecka, A.**, Lizunovs, A., Bobrovs, V., Gavars, P., Zarins, Z. “Quality of Service and Signal Evaluation Parameter Comparison between Different Mobile Network Operators in Urban Area”. Progress in Electromagnetics Research Symposium, 2019, 2019-June, pp. 3887–3894, 9017680.
5. Lizunovs, A., **Stafecka, A.**, Bobrovs, V. “Internet Access Service QoS and Signal Parameter Measurements in Urban Environment”. Proceedings of the 23rd International Conference Electronics 2019, ELECTRONICS 2019, 2019, 8765584.
6. **Stafecka, A.**, Lizunovs, A., Bobrovs, V. “Mobile LTE network signal and Quality of Service parameter evaluation from end-user premises”. Proceedings - 2018 Advances in Wireless and Optical Communications, RTUWO 2018, 2018, pp. 209–212, 8587890.
7. Lipenbergs, E., Smirnova, I., **Stafecka, A.**, Ivanovs, G., Gavars, P. “Quality of service parameter measurements data analysis in the scope of net neutrality”. Progress in Electromagnetics Research Symposium, 2017, 2017-November, pp. 1230–1234.

8. **Stafecka, A.**, Lipenbergs, E., Bobrovs, V., Sharashidze, T. “Quality of service methodology for the development of internet broadband infrastructure of mobile access networks”. Proceedings of the 21st International Conference on Electronics, 2017, 7995229.
9. Lipenbergs, E., **Stafecka, A.**, Ivanovs, G., Smirnova, I. “Quality of service measurements and service mapping for the mobile internet access”. Progress in Electromagnetics Research Symposium, 2017, pp. 2526–2532.

Publikācija zinātniskajā žurnālā

1. Ancans, G., **Stafecka, A.**, Bobrovs, V., Ancans, A., Caiko, J. “Analysis of Characteristics and Requirements for 5G Mobile Communication Systems”. Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, 2017, 54 (4), pp. 69–78.

Raksti pilna teksta konferenču rakstu krājumos

1. **Stafecka, A.**, Lizunovs, A., Ivanovs, G., Bobrovs, V. “Dependence between Signal Parameter Values and Perceived Internet Access Service QoS in Mobile Networks”. Progress in Electromagnetics Research Symposium, 2021, 2021-November, pp. 1419–1427.
2. **Stafecka, A.**, Lizunovs, A., Bobrovs, V., Gavars, P., Zarins, Z. “Quality of Service and Signal Evaluation Parameter Comparison between Different Mobile Network Operators in Urban Area”. Progress in Electromagnetics Research Symposium, 2019, 2019-June, pp. 3887–3894, 9017680.
3. Lizunovs, A., **Stafecka, A.**, Bobrovs, V. “Internet Access Service QoS and Signal Parameter Measurements in Urban Environment”. Proceedings of the 23rd International Conference Electronics 2019, ELECTRONICS 2019, 2019, 8765584.
4. **Stafecka, A.**, Lizunovs, A., Bobrovs, V. “Mobile LTE network signal and Quality of Service parameter evaluation from end-user premises”. Proceedings – 2018 Advances in Wireless and Optical Communications, RTUWO 2018, 2018, pp. 209–212, 8587890.
5. Lipenbergs, E., Smirnova, I., **Stafecka, A.**, Ivanovs, G., Gavars, P. “Quality of service parameter measurements data analysis in the scope of net neutrality”. Progress in Electromagnetics Research Symposium, 2017, 2017-November, pp. 1230–1234.
6. **Stafecka, A.**, Lipenbergs, E., Bobrovs, V., Sharashidze, T. “Quality of service methodology for the development of internet broadband infrastructure of mobile access networks”. Proceedings of the 21st International Conference on Electronics, 2017, 7995229.
7. Lipenbergs, E., **Stafecka, A.**, Ivanovs, G., Smirnova, I. “Quality of service measurements and service mapping for the mobile internet access”. Progress in Electromagnetics Research Symposium, 2017, pp. 2526–2532.

Darba apjoms un struktūra

Promocijas darba apjoms ir 155 lappuses. Tajā ir ievads, četras nodaļas, literatūras saraksts un septiņi pielikumi.

Darba **pirmajā nodaļā** izskatīti interneta piekļuves pakalpojuma kvalitātes novērtēšanas principi un parametri, izvērtēti dažādi regulatīvo mērījumu veidi un mērījumu rīki, pamatojoties uz pasaules, Eiropas un valsts regulējuma nostādņēm. Nodaļā izvērtēti Latvijas Republikas autonomu sistēmu starpsavienojumi, tādējādi nosakot to autonomu sistēmu, kurā jānodrošina interneta pakalpojuma mērījumu servera izvietošana, lai mērījumi atbilstu Eiropas Savienības regulējumam un lai dažādu operatoru tīklos veikto mērījumu rezultāti būtu objektīvi un salīdzināmi. Nodaļā izskatīti un izvērtēti arī mērījumus ietekmējošie faktori, tai skaitā galiekārtas, kas paredzētas regulatīvo interneta pakalpojuma kvalitātes mērījumu veikšanai, izvēles ietekme uz mērījumu rezultātiem. Normatīvā regulējumā kontekstā analizēta papildu signāla parametru mērījumu veikšanas nepieciešamība, kas nodrošinātu arī citu regulējošās iestādes funkciju izpildi, tai skaitā elektronisko sakaru tirgus un pakalpojumu attīstības uzraudzību.

Promocijas darba **otrajā nodaļā** analizēta mērījumu iekārtu izvietojuma ietekme uz mērījumu rezultātiem, veikta rezultātu matemātiskā apstrāde, definēti secinājumi un sniegti priekšlikumi par nosacījumiem, kādi jānosaka attiecībā uz mērījumu ģeogrāfisko vietu izvēli un iekārtu izvietošanu telpās vai transportlīdzeklī, kas būtu lietojami praktisko mērījumu veikšanai, nodrošinot visu veikto mērījumu salīdzināmību. Novērtēta arī dažādu mērījumu veidu alternatīvā izmantošana, tai skaitā salīdzināti iekštelpu un ārtelpu mērījumi, kā arī izlases mērījumi vienā vietā un *drive test* mērījumi. Izvērtētas dažādu mērījumu veidu priekšrocības un trūkumi.

Darba **trešajā nodaļā** definēti interneta pakalpojuma mērījumu apjoma noteikšanas kritēriji un mērījumu laika izvēles principi atkarībā no mērījumu veida, kas nepieciešams, lai nodrošinātu to, ka mērījumi ir veikti atbilstoši starptautiskos standartos noteiktai ticamības pakāpei un mērījumu rezultātu apkopojums ļauj galalietotājiem novērtēt faktiski pieejamo pakalpojuma kvalitāti. Ņemot vērā definēto mērījumu skaita aprēķināšanas metodi, analizēti un piedāvāti mērījumu vietu izvietojuma modeļi valsts un atsevišķu apdzīvoto vietu teritorijās. Noteikti mērījumus ietekmējoši faktori, tai skaitā cilvēciskais, ko nepieciešams ņemt vērā, veicot kvalitāte mērījumu un iegūto datu apstrādi un analīzi.

Promocijas darba **ceturtajā daļā** izskatītas un, izmantojot matemātiskās un statistiskās metodes, analizētas un noteiktas sakarības starp radiofrekvenču spektru, signāla parametru vērtībām un *QoS* parametru vērtībām, pamatojoties uz praktiski iegūtiem mērījumu rezultātiem. Nodaļā noteikta korelācija starp *QoS* parametriem un signāla parametriem, kā arī analizēti mērījumu rezultāti atkarībā no mērījumu veikšanas vietas.

Promocijas darba **nobeigumā** apkopoti pētījumu rezultāti, tai skaitā definēti galvenie pētījuma laikā izvirzītie secinājumi un, pamatojoties uz pētījumu laikā iegūtiem rezultātiem, aprakstīta interneta piekļuves mērījumu veikšanas kārtība un nosacījumi universālo vadlīniju formā.

Darba **pielikumos** pievienots promocijas darba gaitā izstrādātais interneta piekļuves pakalpojuma mērījumu automatizācijas un datu apkopošanas programmas kods, pētījumu rezultātu attēlojumi un apkopojumi, zinātnisko konferenču un publikāciju saraksti, kā arī *CEPT* apliecinājums par dalību dokumentu izstrādē.

PROMOCIJAS DARBA NODAĻU IZKLĀSTS

Promocijas darba pirmā nodaļa

Promocijas darba pirmajā nodaļā izskatīti interneta piekļuves pakalpojuma kvalitātes novērtēšanas principi un parametri, kā arī izvērtēti dažādi regulatīvo mērījumu veidi un mērījumu rīki, kas tiek izmantoti Eiropas Savienības valstīs un citviet pasaulē. Ņemot vērā aplūkotos mērījumu veidus, nodaļā definēti un izvērtēti mērījumus ietekmējošie faktori, tai skaitā galiekārtu [13], [14], [15], [16], kas izmantotas regulatīvo interneta pakalpojuma kvalitātes mērījumu veikšanai, izvēles ietekme uz mērījumu rezultātiem (1. tab.).

1. tabula

Mērījumu rezultāti, mērījumiem izmantojot trīs dažādas galiekārtas.

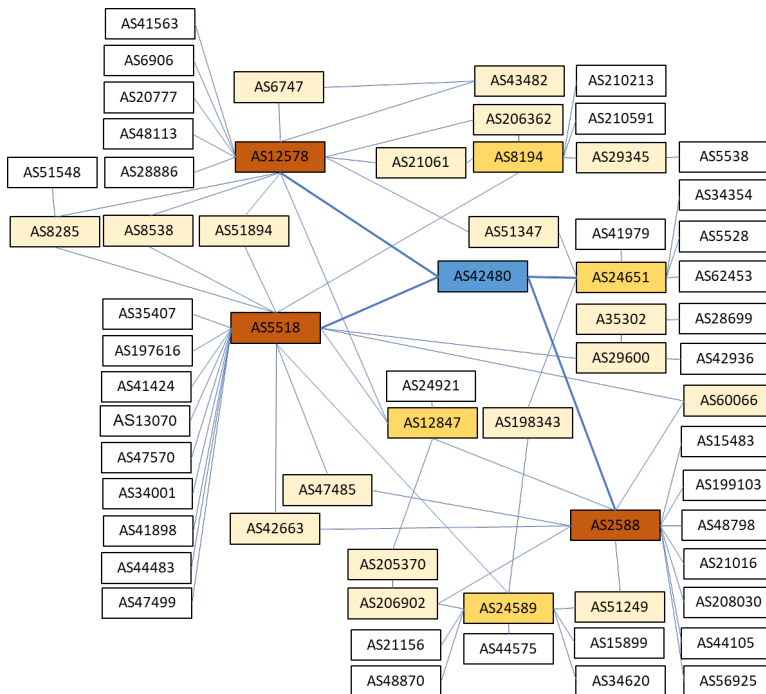
Parametrs	RSRP, dBm			RSSI, dBm			RSRQ, dB		
	Vidējais	Mediāna	Standarta deviācija	Vidējais	Mediāna	Standarta deviācija	Vidējais	Mediāna	Standarta deviācija
<i>Samsung Galaxy A6 (2016)</i>	-94,34	-94,00	0,65	-77,98	-78,00	1,24	-13,04	-13,00	1,19
<i>Samsung Galaxy A70 (2019)</i>	-87,14	-87,00	1,22	-55,89	-55,00	1,63	-12,38	-13,00	0,93
<i>Samsung Galaxy S22 Ultra (2022)</i>	-88,00	-83,00	7,95	-89,00	-89,00	0,00	-11,09	-11,00	1,49
Parametrs	CQI			Lejupielādes ātrums, Mbit/s			Augšupielādes ātrums, Mbit/s		
Viedtālrunis	Vidējais	Mediāna	Standarta deviācija	Vidējais	Mediāna	Standarta deviācija	Vidējais	Mediāna	Standarta deviācija
<i>Samsung Galaxy A6 (2016)</i>	7,33	8,00	1,25	9,16	7,47	4,91	8,15	7,55	1,79
<i>Samsung Galaxy A70 (2019)</i>	-	-	-	43,48	43,40	2,85	15,53	15,96	1,93
<i>Samsung Galaxy S22 Ultra (2022)</i>	8,35	9,00	2,90	68,20	73,05	16,82	15,35	15,47	0,93
Parametrs	Latentums, ms			Trīce, ms			Pakešu zuduma koef. %		
Viedtālrunis	Vidējais	Mediāna	Standarta deviācija	Vidējais	Mediāna	Standarta deviācija	Vidējais		
<i>Samsung Galaxy A6 (2016)</i>	106,80	107,00	2,57	11,60	11,50	1,71	0,00		
<i>Samsung Galaxy A70 (2019)</i>	34,00	34,00	3,50	9,90	6,50	6,59	0,00		
<i>Samsung Galaxy S22 Ultra (2022)</i>	123,90	123,50	7,16	17,50	15,50	5,38	0,00		

Secināms, ka, lai nodrošinātu visaptverošus un aktuālus interneta pakalpojuma kvalitātes mērījumus, mērījumiem izmatotās galiekārtas ir jāatjaunina vismaz reizi trijos gados, izvēloties tirgū populārākā ražotāja iekārtas, kas atbalsta visu mobilo tīklu elektronisko sakaru komersantiem komercdarbībai piešķirtos radiofrekvenču spektra diapazonus [17], jaunākas tīkla tehnoloģijas un tehnoloģiskos risinājumus [13], [14], [15].

BEREC vadlīnijas par augstas veiktspējas tīkliem nosaka, ka, lai novērtētu tīkla veiktspēju, mērījumu serverim jāatrodas tuvākajā starpsavienotā elektronisko sakaru tīklā [8] jeb autonomā sistēmā, turpretī *BEREC* vadlīnijas par tīkla neitralitātes metodoloģiju un vadlīnijas par tīklā neitralitātes rīka specifikāciju nosaka, ka mērījumi jāveic līdz nacionālām interneta apmaiņas punktam [6], [7]. Interneta piekļuves pakalpojumu veikšanai, lai nodrošinātu to, ka mērījumu

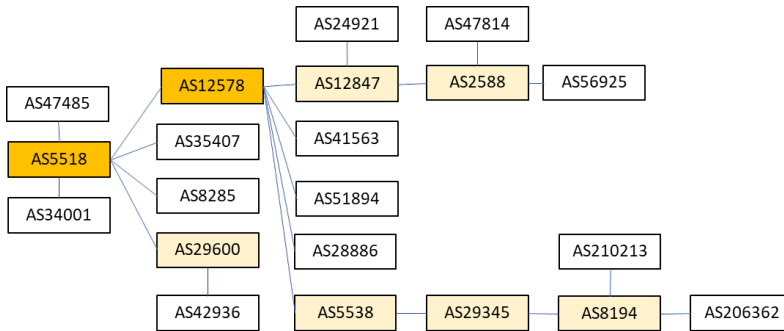
rezultāti ir pamatoti, salīdzināmi un atbilst mērījumu mērķim, ir jānodrošina, ka tiek izvēlēts korekts mērījumu serveris, jo, ņemot vērā nodaļā izklāstītu praktisko mērījumu rezultātus, atkarībā no izvēlēta mērījumu servera ir dažādi mērījumu rezultāti, kas var atšķirties vairākkārt.

Ievērojot minēto, nodaļā analizēta Latvijas Republikas nacionālā interneta tīkla jeb publiskā IP tīkla uzbūve, to veidojošo pakalpojumu sniedzēju nodrošinātās tīkla daļas un to starpsavienojumi (1. un 2. att) [18], [19], [20]. Uz tā pamata definētas konkrētas autonomās sistēmas un to uzturošie pakalpojumu sniedzēji, kuru elektronisko sakaru tīklos ir nepieciešams izvietot interneta pakalpojuma kvalitātes mērījumu serveri, tādējādi nodrošinot vienlīdzīgus un salīdzināmus interneta pakalpojuma kvalitātes mērījumus neatkarīgi no mērījumu veikšanas vietas nacionālā interneta tīklā.



1. att. Latvijas Republikas interneta pieguves pakalpojuma sniedzēju autonomu sistēmu topoloģija IPv4 noslodzei.

Vienlaikus, analizējot Latvijas Republikas nacionālā interneta tīklu starpsavienojumus un autonomu sistēmu piederību [18], [19], [20], tika konstatēts, ka IPv6 atbalsts pašlaik netiek nodrošināts visos elektronisko sakaru tīklos, līdz ar ko, izvēloties mērījumu servera atrašanās vietu tīklā un ņemot vērā attīstības plānus, nepieciešams ne tikai pamatot mērījumu servera vai tā atrašanās vietas izvēli ar starpsavienojumu skaitu, bet arī nodrošināt to, ka elektronisko sakaru tīkls, kurā mērījumu serveris atrodas, atbalsta arī IPv6 adresācijas un maršrutēšanas shēmu.



2. att. Latvijas Republikas interneta piekļuves pakalpojuma sniedzēju autonomu sistēmu topoloģija IPv6 noslodzei.

Secināms, ka, ja nepieciešams izvēlēties autonomu sistēmu, kurā izvietot mērījumu serveri vai kurā esošo mērījumu serveri izmantot, būtu jāizvēlas tāda autonomā sistēma, kas atbalsta gan IPv4, gan IPv6 noslodzes maršrutēšanu, gan kurai ir lielākais nacionālo starpsavienojumu skaits, tādējādi nodrošinot gan mērījumus līdz nacionālām apmaiņas punktam (*IXP*), gan pēc iespējas tuvāk mērījumos vērtējamā operatora autonomai sistēmai. Ievērojot veikto pētījuma rezultātu, secināms, ka Latvijas Republikā ir iespējams apmierināt normatīvo aktu prasības, nodrošinot tikai vienu mērījumu serveri, līdz ar to ieteicams mērījumu serveri izvietot AS5518 vai AS12578 autonomā sistēmā.

Izvērtējot interneta pakalpojuma kvalitātes praktisko mērījumu veikšanas ierobežojumus un prasības, nodaļā izskatīts saistošs Eiropas Savienības [6], [7], [8], [9], [10], [11] un Latvijas Republikas normatīvais regulējums [21], [22], [23], [24], [25], [26] kopsakarā ar mobilo elektronisko sakaru tīklu un to nodrošināšanai nepieciešamām radiofrekvenču spektra uzraudzības prasībām. Secināms, ka, lai arī regulējums paredz pakalpojuma kvalitātes, tīkla un radiofrekvenču spektra uzraudzību kā atsevišķas nesaistītas funkcijas, tomēr, nedaudz paplašinot interneta pakalpojuma kvalitātes uzraudzības rīku un procesa funkcionalitāti, piemēram, veicot MCC un MNC nolasīšanu, iespējams nodrošināt vairāku regulatīvo funkciju izpildi vienlaikus.

Promocijas darba otrā nodaļa

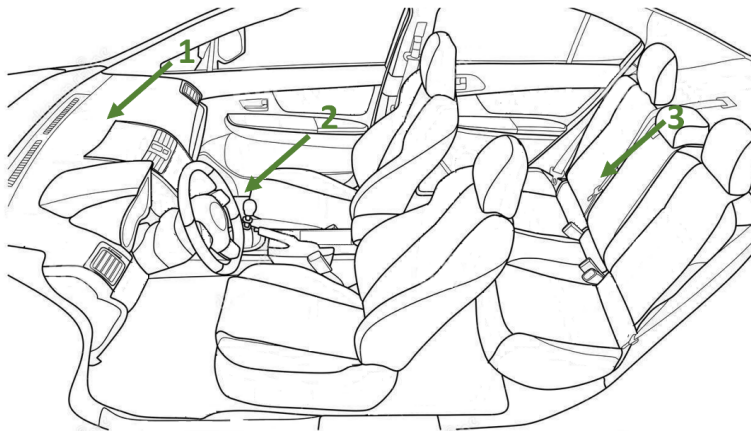
Promocijas darba otrajā nodaļā analizēta mērījumu iekārtu izvietojuma ietekme uz mērījumu rezultātiem. Veikta mērījumu rezultātu matemātiskā apstrāde, definēti secinājumi un sniegti priekšlikumi par nosacījumiem, kādi jāizvirza attiecībā uz mērījumu ģeogrāfisko vietu izvēli un iekārtu izvietojumu telpās vai transportlīdzeklī, kas būtu lietojami praktisko mērījumu veikšanai, nodrošinot visu veikto mērījumu salīdzināmību.

Analizējot dažādus pirmā darba nodaļā definētos mērījumu veidus, to izpildes nosacījumus, kā arī izrietošās priekšrocības un trūkumus, pētījuma gaitā veikti interneta pakalpojuma kvalitātes un signāla mērījumi, kā arī izvērtēti šo mērījumu rezultāti.

Nodaļā izskatīti mērījumu iekārtu iekštelpās izvietojuma kritēriji, secinot, ka, izvietojot interneta pakalpojuma kvalitātes mērījumu iekārtas iekštelpās, ir iespējams konkrēto mērījumu veikšanas vietu noteikt, pamatojoties uz signālā parametru vērtībām, tomēr, izvēloties

mērījumu veikšanas vietu iekštelpās, svarīgi analizēt ne tikai signāla parametru vērtības, bet vienlaikus arī bāzes staciju, šūnu un frekvenču diapazonu, ar kuru notiek savienojums pakalpojuma saņemšanai. Līdz ar to gadījumā, ja vienā telpā ir konstatēts vairāku mobilo šūnu pārklājums, būtu jāveic interneta piekļuves pakalpojuma kvalitātes testa mērījumi. Ja testa mērījumu veikšana nav iespējama, ņemot vērā pētījuma rezultātus, ieteicams mērījumu iekārtas izvietot pēc iespējas tuvāk logam.

Tika veikts arī mērījumu iekārtu izvietojuma vietu izvērtējums transportlīdzeklī. Tā rezultātus var izmantot gan izlases mērījumos, atrodoties transportlīdzeklī, gan nodrošinot *drive test* mērījumus. Izvērtējums balstīts uz praktisko mērījumu rezultātiem, kuru ietvaros tika veikti signāla un *QoS* parametru mērījumi trīs iespējamās mērījumu iekārtu izvietojuma vietās automašīnā (3. att.).



3. att. Mērījumu vietu izvietojums automašīnā. Automašīnas salona shematiskā zīmējumā norādīti punkti, kuros veikti mērījumi: 1) uz automašīnas priekšējā paneļa; 2) uz automašīnas priekšējā pasažieru sēdekļa grīdas; 3) uz aizmugurējā pasažieru sēdekļa logu augstumā.

Ievērojot iespējamo automašīnu izmēru dažādību un komplektāciju, kas var ietekmēt mērījumu rezultātus, eksperimentāli mērījumi veikti divās dažādas automašīnās (2. un 3. tab.), lai noteiktu iespējamās atšķirības starp mērījumu vietu izvēli un definētu mērījumu iekārtu izvietojuma kritērijus.

2. tabula

Praktisko mērījumu, kas veikti automašīnā *Renault Clio* (2003), rezultāti.

Parametrs	RSRP, dBm			RSSI, dBm			RSRQ, dB		
	Vidējais	Mediāna	Standarta deviācija	Vidējais	Mediāna	Standarta deviācija	Vidējais	Mediāna	Standarta deviācija
1	-94,10	-94,00	1,27	-94,53	-95,00	1,14	-9,47	-10,00	1,07
2	-99,67	-100,00	2,11	-100,07	-101,00	2,15	-9,90	-10,00	1,12
3	-94,43	-94,00	1,07	-94,67	-95,00	1,18	-9,70	-10,00	1,09
Parametrs	CQI			Lejupielādes ātrums, Mbit/s			Augšupielādes ātrums, Mbit/s		
Vieta	Vidējais	Mediāna	Standarta deviācija	Vidējais	Mediāna	Standarta deviācija	Vidējais	Mediāna	Standarta deviācija
1	7,83	7,00	1,64	40,73	44,09	19,06	15,38	16,51	2,23
2	7,60	7,00	1,25	29,53	26,58	12,34	10,01	9,55	1,51
3	8,97	8,50	1,88	35,45	39,84	22,93	6,80	7,80	2,24
Parametrs	Latentums, ms			Trīce, ms			Pakešu zuduma koef. %		
Vieta	Vidējais	Mediāna	Standarta deviācija	Vidējais	Mediāna	Standarta deviācija	Vidējais		
1	129,20	128,00	6,80	15,30	16,00	2,16	0,00		
2	133,30	134,00	5,76	15,20	13,00	6,09	0,00		
3	132,10	132,50	7,84	16,90	14,50	7,67	0,00		

3. tabula

Praktisko mērījumu, kas veikti automašīnā *Skoda Kodiaq* (2017), rezultāti.

Parametrs	RSRP, dBm			RSSI, dBm			RSRQ, dB		
	Vidējais	Mediāna	Standarta deviācija	Vidējais	Mediāna	Standarta deviācija	Vidējais	Mediāna	Standarta deviācija
1	-86,37	-87,00	3,39	-86,87	-87,00	2,87	-8,97	-9,00	1,71
2	-84,37	-81,00	6,78	-85,27	-83,00	7,06	-10,90	-10,50	1,75
3	-94,93	-95,00	1,17	-95,60	-95,00	1,07	-9,13	-10,00	1,31
Parametrs	CQI			Lejupielādes ātrums, Mbit/s			Augšupielādes ātrums, Mbit/s		
Vieta	Vidējais	Mediāna	Standarta deviācija	Vidējais	Mediāna	Standarta deviācija	Vidējais	Mediāna	Standarta deviācija
1	10,87	10,50	2,37	23,87	19,70	10,04	14,12	15,29	3,17
2	11,73	12,00	2,39	23,69	23,72	7,95	7,84	8,65	4,24
3	9,30	9,00	1,90	28,06	27,45	9,39	11,76	10,58	3,26
Parametrs	Latentums, ms			Trīce, ms			Pakešu zuduma koef. %		
Vieta	Vidējais	Mediāna	Standarta deviācija	Vidējais	Mediāna	Standarta deviācija	Vidējais		
1	136,10	138,00	4,15	15,20	14,00	2,82	0,00		
2	140,80	140,50	4,94	19,10	17,50	5,34	0,00		
3	140,50	140,50	4,40	15,00	15,50	3,33	0,00		

Ņemot vērā mērījumu rezultātus, var secināt, ka, lai noteiktu labāko mērījumu iekārtu vai tieši signāla uztvērēja un raidītāja izvietošanas vietu mērījumiem transportlīdzeklī, vispirms konkrētā transportlīdzeklī jāveic kontrolmērījumi, uz to pamata varēs veikt mēriekārtu izvietošanu. Noteicošie parametri iekārtu izvietošanas novērtējumam ir *RSRP* vai *RSSI* un

$RSRQ$, kas gan liecina par uztvertā signāla stiprumu, gan ļauj novērtēt ietekmi un signāla kvalitāti. Ja kontrolmērījumus nav iespējams veikt, pamatojoties uz vispārīgām pētījuma laikā novērotām mērījumu rezultātu tendencēm, var secināt, ka mērījumu iekārtas vēlams izvietot uz transportlīdzekļa priekšēja paneļa vai tajā pašā līmenī virs priekšēja pasažiera sēdekļa.

Ievērojot minēto, secināts, ka mērījumu iekārtu precīza izvietojuma noteikšanai ir nepieciešams izmantot signāla parametru mērījumus, konkrētu mērījumu vietu nosakot atbilstoši telpā, ārtelpās vai transportlīdzeklī uztvertā signāla stiprumam un kvalitātei. Ievērojot iespējamus funkcionālos ierobežojumus signāla parametru mērījumu veikšanai, nodaļā izteikti ieteikumi interneta pakalpojuma kvalitātes mērījumu iekārtu izvietojumam iekštelpās un transportlīdzeklī.

Nodaļā novērtēts arī *drive test* mērījumu veikšanas process, tai skaitā definēta formula mērījumu skaita prognozei, pēc kuras ir iespējams aprēķināt aptuveno mērījumu skaitu noteiktā ceļa posma garumā, pārvietojoties noteiktā ātrumā, *drive test* mērījumu veikšanai:

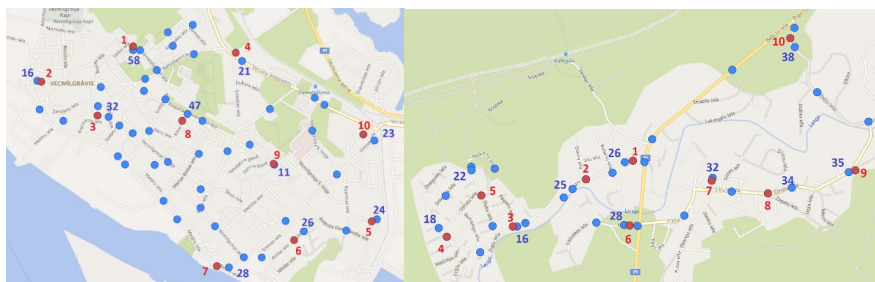
$$ms = \frac{d_{cp}}{v_{cp} \times t_m}, \quad (1.)$$

kur ms – mērījumu skaits ceļa posmā; d_{cp} – ceļa posma garums, kurā veicami mērījumi, km; v_{cp} – pārvietošanas ātrums ceļa posma garumā, km/st; t_m – vienam mērījumam nepieciešamais laiks, st.

Secināts, ka *drive test* ir vienīgais mērījumu veids, kas var precīzi raksturot noteiktā ceļa posmā galalietotājam pieejamā interneta pakalpojuma kvalitāti, ļaujot novērtēt gan signāla, gan *QoS* parametru izmaiņas ceļa posmā, kā arī izteikt secinājumus par *QoS* parametru vērtībām un signāla ietekmi uz tām [27], [28]. Tomēr jāreķinās ar to, ka, veicot mērījumus vairāku operatoru mobilos tīklos, var nebūt iespējams veikt rezultātu salīdzinājumu precīzi vienādos mērījumu punktos, ievērojot novērojumu, ka viens mērījums var aizņemt dažādu laiku atkarībā no mobilā tīkla un tā pārklājuma.

Pamatojoties uz mērījumu veidu funkcionālām īpatnībām un praktisko mērījumu rezultātiem, nodaļā vērtētas mērījumu veidu savstarpējas aizstājāmības iespējas, kas nodrošinātu mērījumus veicošās iestādes resursu ekonomiju. Noteikti mērījumu veidi, kuru aizstāšana nav iespējama un kas spēj nodrošināt normatīva regulējuma prasību izpildi attiecībā uz interneta pakalpojuma kvalitātes uzraudzību, kā arī mērījumu veidi un apstākļi, kuru aizvietošana ir iespējama un neietekmē mērījumu rezultātu objektivitāti [29], [30].

Darba gaitā veikts arī izlases mērījumu *drive test* mērījumu efektivitātes salīdzinājums, veicot praktiskos mobilā interneta piekļuves tīkla *QoS* un signāla parametru mērījumus lielpilsētas rajonā un ciemā (4. att.), kuru teritoriāli izmēri ir samērā tuvi.



4. att. Ģeogrāfiskais mērījumu pilsētas rajonā un ciemā izvietojums kartē.

Mērījumos iegūtie dati analizēti, ņemot vērā ģeogrāfiski tuvākās vietās iegūto rezultātu novirzi, kā arī attiecībā uz rezultātu atspoguļošanu apdzīvotas vietas novērtējuma griezumā, analizējot visā apdzīvotā punktā iegūto rezultātu statistiskās vērtības (4. tab.).

4. tabula

Pilsētā statistiskā vietā veikto mērījumu un *drive test* mērījumu rezultātu salīdzinājums.

Parametrs	Lejupielādes ātrums, Mbit/s			Augšupielādes ātrums, Mbit/s			Latentums, ms			Trīce, ms		
	Vidējais	Mediāna	Standarta deviācija	Vidējais	Mediāna	Standarta deviācija	Vidējais	Mediāna	Standarta deviācija	Vidējais	Mediāna	Standarta deviācija
Kopā statistiski	66,65	54,05	49,83	13,33	5,11	17,36	89,28	30,00	189,89	41,02	10,00	84,43
Drive test kopā	59,79	48,67	38,17	15,58	11,37	11,97	88,98	29,00	200,09	44,29	8,00	110,96
Parametrs	Pakešu zuduma koef. %	RSRP, dBm			RSSI, dBm			RSRQ, dB				
Vieta	Vidējais	Vidējais	Mediāna	Standarta deviācija	Vidējais	Mediāna	Standarta deviācija	Vidējais	Mediāna	Standarta deviācija		
Kopā statistiski	0,37	-98,20	-101,00	9,73	-65,71	-67,00	7,97	-12,05	-12,00	2,32		
Drive test kopā	0,42	-91,26	-92,00	9,95	-60,00	-59,00	7,28	-12,31	-12,00	2,46		

Izvērtējot praktisko eksperimentu rezultātus, var secināt, ka mērījumos iegūto parametru vidējā vērtība, kas lielākoties tiek izmantota, izvērtējot un nosakot pieejamo *QoS* parametru lielumu vienā apdzīvotā vietā, mērījumu statistiskās vietās un *drive test* gadījumā atšķiras atkarībā no mērījumu vietas un parametra no 0 % līdz pat 65 %. Tas ir skaidrojams ar to, ka *drive test* mērījumu gadījumā tiek veikti mērījumi vairākās vietās, tādējādi aptverot ne tikai dažus ģeogrāfiskos punktus apdzīvotā vietā, bet daudz lielāku punktu skaitu.

Ņemot vērā rezultātus, var apgalvot, ka mērījumi, kas veikti *drive test* un atrodas vienā vietā, ir samērā tuvi, ņemot vērā mērījumu vietu nobīdes. Līdz ar to var secināt, ka *drive test* mērījumi ir vairāk piemēroti, lai novērtētu kopējo vienas apdzīvotas vietas ietvaros sniegta pakalpojuma *QoS*, jo ģeogrāfiski izvietoto mērījumu punktu skaits ir lielāks, līdz ar to ir vairāk ņemta vērā ārējo faktoru ietekme. Par ko liecina arī signāla parametru vērtību deviācijas aprēķins.

Vienlaikus nodaļā veikta arī mērījumiem patērētā laika analīze (5. tab.) gan teritoriālā pārklājuma mērījumu nodrošināšanai, gan attiecībā uz 100 mērījumu veikšanai nepieciešamo laiku.

5. tabula

Mērījumiem, kas veikti statistiskā vietā, un *drive test* mērījumiem patērētā laika salīdzinājums.

	Pilsēta		Ciems	
	Statiskā vietā (st., min)	Kustībā (st., min)	Statiskā vietā (st., min)	Kustībā (st., min)
Mērījumiem patērētais laiks	01.37	00.29	01.40	00.17
Laiks, kas nepieciešams 100 mērījumiem	01.28	00.58	01.31	00.57

Iegūti mērījumu rezultāti liecina, ka patērētā laika ziņā *drive test* mērījumi ir efektīvāki, un, ja tas nepieciešams attāluma vai mērījumu laika korekcijai, ļauj noteikt aiztures starp mērījumiem, jo aizņem īsāku laiku. Veicot mērījumu statistiskā vietā, palielinot mērījumu vietu skaitu un samazinot vienā vietā veikto mērījumu skaitu, laiks, kas nepieciešams viena mērījuma veikšanai, var būt mainīgs. Ņemot vērā to, ka lielu daļu laika aizņem pārvietošanās starp statistiskajām mērījumu vietām, paredzams, ka laiks, kas nepieciešams mērījumu veikšanai, būs vēl lielāks, jo laiks vienam mērījumam, lai arī variējas kļūdas robežās, ir gandrīz nemainīgs.

Promocijas darba trešā nodaļa

Darba trešajā nodaļā, balstoties uz starptautiskiem standartiem, definēti interneta pakalpojuma mērījumu apjoma noteikšanas kritēriji un mērījumu laika izvēles principi atkarībā no mērījumu veida [30], [31], [32], [33], kas nepieciešams, lai nodrošinātu to, ka mērījumi ir veikti atbilstoši noteiktajai ticamības pakāpei un mērījumu rezultātu apkopojums ļauj novērtēt galalietotājiem faktiski pieejamo pakalpojuma kvalitāti galalietotāja atrašanās vietā. Ņemot vērā definēto mērījumu skaita aprēķināšanas metodi [33], analizēti un piedāvāti mērījumu vietu izvietojuma modeļi valsts un atsevišķu apdzīvoto vietu teritorijās. Noteikti mērījumus ietekmējošie faktori, tai skaitā cilvēcisks, ko nepieciešams ņemt vērā, veicot kvalitātes mērījumu un iegūto datu apstrādi un analīzi.

Nodaļā analizēti vairākās apdzīvotās vietās vairākas diennaktis veikto mērījumu rezultāti, apkopojot vairāku gadu laikā veiktos mērījumus. Konstatēts, ka pīķa noslodzes stundas galvenokārt vērojamas vakara stundās, aptuveni no plkst. 21 līdz plkst. 23, tomēr tās var būt atšķirīgas atkarībā no apdzīvotas vietas.

Ņemot vērā *BEREC* vadlīnijas [6], [8], [10], kas paredz mērījumu veikšanu pīķa noslodzes stundās, mērījumu rezultātus un praktiskos mērījumu veikšanas apsvērumus, tai skaitā to, ka izlases un *drive test* mērījumu veikšanai ir nepieciešami cilvēkresursi, kas paredz arī normētu darba laiku [34], nodaļā analizēta iespēja noteikt laika diapazonu, kurā iegūto *QoS* parametru mērījumu rezultātu atšķirība no diennakts mērījumu rezultātiem būtu pēc iespējas mazāka. Šim nolūkam praktisko sērijveida mērījumu rezultāti analizēti attiecībā uz parametru vērtībām, kas

iegūtas dažādos laika diapazonos, nosakot rezultātu novirzi no diennakts mērījumu rezultātiem (6. tab.).

6. tabula

QoS parametru mērījumu rezultāti dažādos laika diapazonos attiecībā pret diennakts mērījumu rezultātu.

Laika periods	Pilsēta								Lauki							
	Lejupielādes ātrums, Mbit/s	Abskīrība, %	Augšupielādes ātrums, Mbit/s	Abskīrība, %	Latentums, ms	Abskīrība, %	Tīrce, ms	Abskīrība, %	Lejupielādes ātrums, Mbit/s	Abskīrība, %	Augšupielādes ātrums, Mbit/s	Abskīrība, %	Latentums, ms	Abskīrība, %	Tīrce, ms	Abskīrība, %
00.00 – 24.00	45,18		22,29		25,78		2,41		29,28		12,75		16,44		2,37	
09.00 – 15.00	44,78	1 %	22,07	1 %	25,99	1 %	2,42	1 %	29,32	0 %	13,06	2 %	16,48	0 %	2,31	2 %
09.00 – 17.00	43,95	3 %	22,09	1 %	25,76	0 %	2,43	1 %	28,33	3 %	13,07	3 %	16,48	0 %	2,36	0 %
00.00 – 09.00	51,71	14 %	22,48	1 %	26,61	3 %	2,30	5 %	37,55	28 %	12,89	1 %	16,22	1 %	2,21	6 %
15.00 – 23.59	39,36	13 %	22,28	0 %	24,96	3 %	2,50	4 %	21,57	26 %	12,39	3 %	16,61	1 %	2,55	8 %
17.00 – 23.59	38,64	14 %	22,32	0 %	24,91	3 %	2,51	4 %	20,38	30 %	12,19	4 %	16,65	1 %	2,57	8 %

Ņemot vērā datu analīzes rezultātus, secināts, ka rezultāti, kas ir tuvāki diennakts laikā iegūtai mērījumu rezultātu vidējai vērtībai, iegūti laikā no plkst. 9 līdz plkst. 15, kur novirze no etalona vērtības 79 % izskatīto (6. tab.) rezultātu gadījumā nepārsniedza 4 %, kas ir mērījumu kļūdas robežās. Vērtības var atšķirties atkarībā no operatora elektronisko sakaru tīkla konfigurācijām, tomēr var secināt, ka mērījumu rezultātu vidējās vērtības noteiktās diennakts stundās ir pietiekami tuvas to mērījumu rezultātu vidējai vērtībai, kas veikti diennakts visās stundās. Izlases mērījumiem un *drive test* mērījumiem, standartā mērījumu veikšanas laikā, nav iespējams iegūt diennakts rezultātus un pastāv tikai maza iespēja, ka mērījumu laikā būs pīķa noslodzes stundas vai stundas, kurās ir ļoti maza noslodze, jo tas parasti ir nakts stundas. Līdz ar to izriet, ka izlases mērījumus un *drive test* mērījumus ieteicams veikt noteiktā laikā periodā, kurā mērījumu rezultātu vērtības ir tuvākas diennakts mērījumu rezultātu vidējai vērtībai.

Nodaļā izskatīti arī pasākumi, kas jāievēro, lai nodrošinātu mērījumu 95 % ticamības pakāpi, nodrošinot noteiktu mērījumu skaitu. Vairāki standarti, tai skaitā *ETSI EG 202 057-4*, paredz mērījumu skaita aprēķināšanai izmantot klasiskās statistiskās formulas normālām sadalījumiem, ko atbilstoši interneta pakalpojuma QoS parametru mērījumu specifikai var izteikt šādi [33]:

$$n = \frac{z_{1-\alpha/2}^2}{a^2} \times \left(\frac{s}{\text{mean}(x)} \right)^2, \quad (2.)$$

kur n – nepieciešamais minimālais mērījumu skaits; a – relatīva precizitāte procentos; $Z_{1-\alpha/2}^2$ – normāla sadalījuma koeficients ticamības pakāpei; s – testa mērījumu rezultātu standartnovirze; $mean(x)$ – testa mērījumu rezultātu vidējā vērtība.

Līdz ar to var secināt, ka, lai, apkopojot datus, varētu garantēt, ka interneta piekļuves pakalpojuma kvalitātes mērījumu rezultātā visu *QoS* parametru vērtības atbilst noteiktajām precizitātes prasībām, nepieciešams noteikt mērījumu skaitu atbilstoši 2. formulai, mērījumu skaitu definējot pēc tā parametra, kur aprēķinu rezultātā tiek konstatēts lielākais nepieciešamo mērījumu skaits (7. tab.).

7. tabula

Nepieciešamā mērījumu skaita aprēķinu rezultātu piemērs.

Parametrs	Normāla sadalījuma koeficients, ja ticamības pakāpe ir 95 %	Mērījumu rezultātu kopas standartnovirze	Mērījumu rezultātu kopas vidējā vērtība	Nepieciešamais minimālais mērījumu skaits pie relatīvas precizitātes 5 %	Nepieciešamais minimālais mērījumu skaits pie relatīvas precizitātes 2 %
Lejupielādes ātrums, Mbit/s	1,96	18,46	32,80	487	3043
Augšupielādes ātrums, Mbit/s	1,96	13,38	26,54	391	2441
Latentums, ms	1,96	5,77	25,31	80	500
Trīce, ms	1,96	81,21	19,90	25581	159882
Pakešu zuduma koeficients	1,96	1,13	0,05	685258	4282865

Var secināt, ka mērījumu skaits kopumā ir arī ļoti atkarīgs no mērījumu vietām, kurās veikti kontroles mērījumi. Līdz ar to pat tad, ja tiek noteiktas prasības mērījumu precizitātei valsts mērogā, ir svarīgi mērījumu rezultātus uzraudzīt gada gaitā, jo var būt nepieciešami papildu mērījumi, lai sasniegtu vēlamo precizitāti.

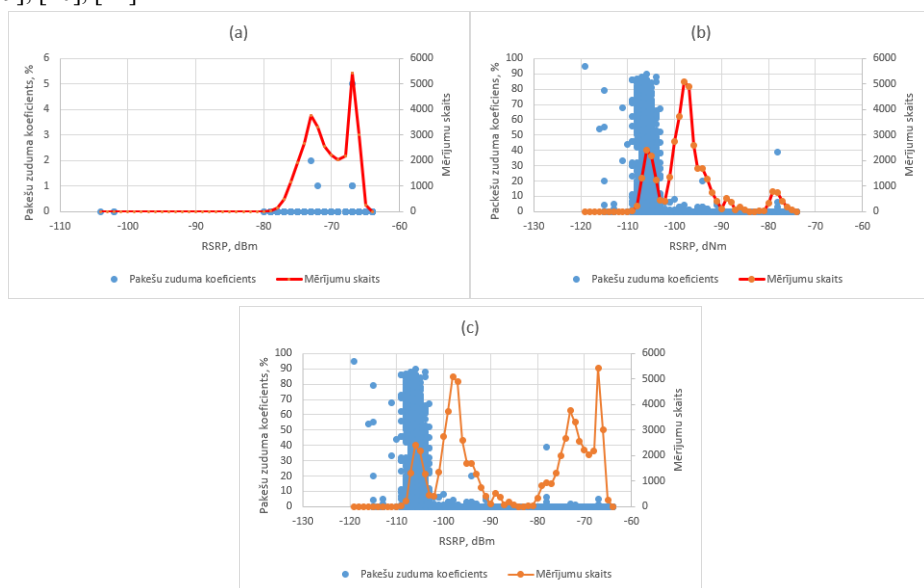
Nodaļā izskatīts arī iespējamais apdzīvoto vietu un mērījumu skaita sadalījums. Analizējot starptautiskos standartus un rekomendācijas [32], var secināt, ka tajās piedāvātais apdzīvoto vietu sadalījums nav piemērots Latvijas Republikas situācijai, līdz ar ko ieteicams apdzīvoto vietu sadalījumu nodrošināt atbilstoši nacionālajos normatīvajos aktos noteiktajam [35], neņemot vērā mazākās apdzīvoto vietu vienības, kas paredz tikai dažu iedzīvotāju skaitu.

Nodaļā izskatīti dažādi mērījumu vietu sadalījuma varianti, to priekšrocības un trūkumi kopsakarā ar dažādiem mērījumu veidiem un tos ietekmējošiem faktoriem. Secināts, ka, lai sadalītu mērījumus valsts teritorijā, ir nepieciešams kombinēts risinājums, kas ļautu nodrošināt mērījumu skaita izpildi, ņemot vērā esošos resursus, un vienlaikus dotu iespēju veikt kvalitatīvu pakalpojuma kvalitātes uzraudzību, mērījumus analizējot arī diennakts griezumā. Nav iespējams nosegt katru valsts vietu gan apdzīvoto vietu kontekstā, gan reģa kontekstā, tāpēc jānodrošina, ka mērījumi ir vienmērīgi sadalīti valsts robežās un to skaits ir proporcionāls iedzīvotāju skaitam. Papildus ieteicams nodrošināt mērījumus, izmantojot *drive test*, jo tikai *drive test* mērījumi var nodrošināt to veikšanu ceļa posmu ietvaros, vismaz daļēji nodrošinot mērījumus mazciemos un viensētās.

Promocijas darba ceturajā nodaļā

Promocijas darba ceturajā nodaļā izskatītas un, izmantojot matemātiskās un statistiskās metodes, analizētas un noteiktas sakarības starp radiofrekvenču spektra, signāla parametru vērtībām un QoS parametru vērtībām, pamatojoties uz praktiski iegūtiem mērījumu rezultātiem [16]. Nodaļā noteikta korelācija starp QoS parametriem un signāla parametriem, kā arī analizēti mērījumu rezultāti atkarībā no mērījumu veikšanas vietas. Ņemot vērā iegūtos rezultātus, secināts par nepieciešamību mērījumu datu analizē izmantot signāla parametru iegūtas vērtības, lai nodrošinātu to, ka atspoguļotie mērījumu rezultāti ir caurskatāmi, pamatoti un salīdzināmi [36], [37], kā arī ļauj veikt visā apdzīvotā vietā pieejamās interneta pakalpojuma kvalitātes prognozi gan atkarībā no izvietojuma, gan no laika [38], [39], [40], [41].

Nodaļā aprakstītā pētījumā novērots, ka atkarība starp signāla un QoS parametru mērījumu rezultātiem parādās, apkopojot liela apjoma mērījumu datus, kur mērījumi veikti vairākās vietās, kas izpaužas visu QoS parametru vērtībās, bet īpaši labi redzama pakešu zuduma koeficienta piemērā (5. att.). Novērots, ka signāla stiprums, kas parasti atšķiras atkarībā no vietas, lauku reģionos ir daudz vājāks, līdz ar to arī citu signāla parametru ietekmē vērtību izkliede var būt lielāka, salīdzinot ar mērījumu rezultātiem mērījumiem, kas veikti pilsētā [38], [39], [40], [41].



5. att. Sakarība starp mērījumu rezultātiem un mērījumu skaitu pakešu zuduma koeficientam un $RSRP$, kur apkopoti mērījumi: (a) pilsētā; (b) lauku reģionā; (c) kopējie dati.

Ņemot vērā teorētiskos datus un pētījumā iegūto datu rezultātus, var secināt, ka rezultāti lauku reģionos QoS parametriem parasti ir zemāki, kā arī signāla kvalitāte ir zemāka, līdz ar to rezultāti lauku reģionos un pilsētās var būtiski atšķirties. Turklāt, ja signāla kvalitāte ir zemāka, QoS parametri ir vairāk izkliedēti, īpaši $RSRP$ diapazonā zem 100dBm, kas atkārtoti pierāda to, ka regulatīvo mērījumu veikšana šajā $RSRP$ diapazonā nav ieteicama, jo pēc rezultātiem

nevarēs viennozīmīgi spriest nedz par parametru izmaiņām laikā, nedz par iespējamām *QoS* parametru vērtībām bāzes stacijas raidītāja pārklājuma zonā.

Kopsakarā ar interneta piekļuves pakalpojuma kvalitātes mērījumu rezultātu sadalījumu atkarībā no mērījumu veikšanas vietas un signāla parametru izmantošanas kā mērījumu iekārtu izvietojuma kritērijs tika izskatīta korelācija starp signāla un *QoS* parametru vērtībām, par pamatu ņemot trīs operatoru mobilo elektronisko sakaru tīklos veiktos eksperimentālos mērījumus (8. tab.).

8. tabula

Korelācijas koeficienti starp *QoS* un signāla parametru vērtībām.

Signāla parametri	1. operators				2. operators				3. operators			
	<i>RSRP</i> , dBm	<i>RSSI</i> , dBm	<i>RSRQ</i> , dB	<i>SINR</i> , dB	<i>RSRP</i> , dBm	<i>RSSI</i> , dBm	<i>RSRQ</i> , dB	<i>SINR</i> , dB	<i>RSRP</i> , dBm	<i>RSSI</i> , dBm	<i>RSRQ</i> , dB	<i>SINR</i> , dB
<i>QoS</i> parametri	visi rezultāti				visi rezultāti				visi rezultāti			
Lejupielādes ātrums, Mbit/s	0,29	0,23	0,57	0,47	0,12	0,10	0,52	0,53	0,55	0,50	0,20	0,59
Augšupielādes ātrums, Mbit/s	0,74	0,69	0,46	0,33	0,92	0,91	0,25	0,26	0,77	0,69	0,00	0,61
Latentums, ms	-0,72	-0,69	-0,53	-0,45	-0,27	-0,26	-0,06	0,01	-0,37	-0,35	-0,09	-0,41
Trīce, ms	-0,24	-0,28	-0,21	-0,31	-0,29	-0,34	-0,25	-0,39	-0,06	-0,05	-0,09	-0,08
Pakešu zuduma koeficients, %	-0,16	-0,18	-0,15	-0,23	-0,23	-0,27	-0,27	-0,36	-0,05	-0,04	-0,07	-0,06
	Valsts galvaspilsēta				Valsts galvaspilsēta				Valsts galvaspilsēta			
Lejupielādes ātrums, Mbit/s	-0,14	-0,12	0,24	0,31	0,16	0,16	0,41	0,34	0,10	0,06	-0,01	0,10
Augšupielādes ātrums, Mbit/s	0,65	0,33	-0,02	-0,10	0,50	0,61	0,20	0,32	0,29	-0,02	-0,31	-0,18
Latentums, ms	0,13	0,09	-0,15	-0,25	-0,05	-0,06	0,12	0,09	0,04	-0,07	-0,16	-0,04
Trīce, ms	0,16	0,10	-0,03	-0,06	-0,49	-0,54	-0,04	-0,15	-0,17	-0,15	-0,11	-0,22
Pakešu zuduma koeficients, %	0,01	0,00	0,00	0,00	-0,18	-0,21	-0,02	-0,06	-0,19	-0,16	-0,10	-0,21
	Valsts teritorija, izņemot galvaspilsētu				Valsts teritorija, izņemot galvaspilsētu				Valsts teritorija, izņemot galvaspilsētu			
Lejupielādes ātrums, Mbit/s	0,05	-0,09	0,59	0,46	0,32	0,14	0,58	0,63	0,04	0,08	0,45	0,41
Augšupielādes ātrums, Mbit/s	0,50	0,49	0,35	0,32	0,75	0,61	0,32	0,53	0,81	0,83	0,37	0,78
Latentums, ms	0,06	0,02	-0,20	-0,25	-0,13	-0,11	-0,10	-0,01	0,25	0,18	-0,01	-0,02
Trīce, ms	-0,25	-0,29	-0,17	-0,37	-0,42	-0,43	-0,29	-0,47	-0,03	-0,01	-0,08	-0,04
Pakešu zuduma koeficients, %	-0,19	-0,20	-0,13	-0,28	-0,36	-0,34	-0,32	-0,44	-0,02	0,00	-0,05	-0,02

Ņemot vērā aprēķinu rezultātus, secināts, ka dažādu operatoru *LTE* mobilo elektronisko sakaru tīklos pastāv stingra pozitīva korelācija starp augšupielādes ātruma un *RSRP*, *RSSI* parametru vērtībām neatkarīgi no mērījumu veikšanas vietas. Stingra pozitīva korelācija ir novērojama arī starp lejupielādes ātruma un *RSRQ* parametru vērtībām divu mobilo operatoru tīklos, ja mērījumu apjoms ir liels. Pārējo *QoS* parametru gadījumā ir novērotas dažādas gan pozitīvas, gan negatīvas korelācijas vērtības. No tā izriet, ka ir tieša korelācija starp *QoS* un signāla parametru vērtībām, un tā visvairāk izpaužas starp lejupielādes un augšupielādes ātrumu vērtībām un *RSRP*, *RSSI* un *RSRQ* parametru vērtībām. No tā izriet, ka, pamatojoties uz signālā parametru vērtībām, ir iespējams prognozēt signālā parametru vērtības mobilās šūnas pārklājuma zonā, tomēr konkrētas *QoS* parametru vērtības ir raksturīgas un paredzamas tikai attiecībā uz konkrēta operatora tīklu.

PROMOCIJAS DARBA REZULTĀTI

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

Veicot elektronisko sakaru komersantu, to elektronisko sakaru tīklu, autonomu sistēmu, to starpsavienojumu un savstarpējās noslodzes analīzi, promocijas darbā definētās nacionālā interneta nodrošināšanai paredzēto autonomu sistēmu starpsavienojumu shēmas *IPv4* un *IPv6* noslodzei. Secināts, ka Latvijas Republikā ir iespējams vienlaikus apmierināt *BEREC* tīkla neitralitātes un ātrdarbīgo tīklu vadlīniju prasības, nodrošinot interneta piekļuves mērījumu serveri tikai vienā autonomā sistēmā, kas ļauj ekonomēt interneta piekļuves pakalpojuma mērījumiem nepieciešamos resursus. Šis aspekts ir īpaši svarīgs, izvēloties vai izstrādājot interneta piekļuves pakalpojuma mērījumu rīku, kā arī veicot mērījumus, gadījumā, ja pieejami vairāki mērījumu serveri. Līdz ar to promocijas darbā definētās mērījumu serveru atrašanas vietas var būt izmantotas normatīvos aktos nosakot konkrētas mērījumu serveru atrašanās vietas vai to izvēles kritērijus, tādējādi nodrošinot salīdzināmo mērījumu rezultātu iegūšanu. Darbā apkopotā informācija par mērījumu serveru atrašanas vietām var būt nepieciešamās izstrādājot vai izvēloties mērījumu rīku, nosakot vai mērījuma servera izvietojums ir atbilstošs normatīvām regulējumam.

Vienlaikus noteikts, ka, lai nodrošinātu aktuālus un pamatotus mērījumu rezultātus regulatīvo interneta piekļuves pakalpojuma mērījumiem, ir jānodrošina, ka galiekārtas, kas tiek izmantotas mērījumu veikšanai, nav vecākas par trim gadiem un atbalsta visas mobilā elektronisko sakaru tīklā izmantotās tehnoloģijas. Mērījumu galiekārtu nomaiņas cikla noteikšana ļauj gan prognozēt plānotos ieguldījumus un nodrošina to, ka veiktie mērījumi atspoguļo faktiski tirgū pieejamā pakalpojuma kvalitāti, šo prasību iekļaujot arī nacionālos normatīvos aktos.

Ņemot vērā veiktos pētījumus, konstatēts, ka signāla parametru mērījumi, kas veikti papildus *QoS* parametru mērījumiem, ir nepieciešami, lai izvēlētos mērījumu veikšanas vietu, kas nodrošinātu pēc iespējas vienlīdzīgākus apstākļus dažādu komersantu nodrošināta interneta piekļuves pakalpojuma mērījumiem šo komersantu mobilo elektronisko sakaru tīklos. Veicot padziļinātu signāla parametru un *QoS* parametru rezultātu pārbaudi dažādos mērījumu apstākļos, ir noteiktas optimālas signālā parametru vērtības, ko ieteicams, ja tas ir tehniski iespējams, ņemt vērā, izvietojot iekārtas, un kuru lietošana nodrošinās iegūto mērījumu rezultātu salīdzināmību un pamatotību. Ja nav iespējams veikt signāla parametru novērtējumu iekšējās vai transportlīdzeklī, pamatojoties uz praktisko mērījumu rezultātiem, ir noteiktas optimālas mērījumu iekārtu izvietojuma vietas dažādiem mērījumu veidiem. Signāla parametru mērījumu izmantošana interneta pakalpojuma kvalitātes mērījumu veikšanas procesā tika apliecināta, arī nosakot to, ka starp signāla parametru vērtībām un *QoS* parametru vērtībām pastāv stingra korelācija. No tā izriet, ka signāla parametru mērījumus var izmantot kā mērījumu vietas izvēles faktoru.

Pamatojoties uz starptautiskiem standartiem un rekomendācijām, kā arī nacionālajiem normatīvajiem aktiem, darbā noteikti mērījumu skaita plānošanas un pārbaudes kritēriji, kā arī

mērījumu vietu ģeogrāfiskā sadalījuma noteikšanas principi, pamatojoties uz datu apstrādes nolūkiem.

Ņemot vērā promocijas darba izstrādes gaitā veikto analīzi, teorētisko un praktisko pētījumu rezultātiem, ir izstrādātas interneta piekļuves pakalpojuma kvalitātes mērījumu veikšanas vadlīnijas, kas nosaka mērījumu veikšanas procedūras prasības, nodrošinot tās atklātumu, caurskatāmību, objektivitāti un mērījumu rezultātu salīdzināmību, kā to pieprasa gan Eiropas Savienības, gan nacionālie normatīvie akti un ieteikumi.

Papildus darbā izskatītas interneta pakalpojuma mērījumu un mērījumu datu apkopošanas automatizācijas iespējas un izstrādāts programmas kods, ko var pielāgot atbilstoši izmantojamai mērījumu sistēmai un ko var izmantot regulatīvo mērījumu procesa automatizācijai.

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

1. Pēc patstāvīgi funkcionējošās *NR* tehnoloģijas ieviešanas mobilo elektronisko sakaru tīklos interneta piekļuves pakalpojuma nodrošināšanai praksē izvērtēt promocijas darbā definēto interneta piekļuves pakalpojuma kvalitātes mērījumu veikšanas principu lietojumu un noteikt iespējamus pilnveidojumus, kas būtu nepieciešami, veicot interneta piekļuves pakalpojuma kvalitātes uzraudzību jaunās paaudzēs mobilos tīklos.
2. Izstrādāt un izvērtēt mērījumos iegūto datu analīzes algoritmus, kuru ietvaros, balstoties iegūtajās signāla un *QoS* parametru vērtībās, varētu noteikt teorētisko *QoS* parametru vērtību sadalījumu mobilās šūnas pārklājuma robežās.

IZMANTOTĀ LITERATŪRA

- [1] European Commission, “2030 DIGITAL COMPASS The European way for the digital decade”, 2021. ISBN 978-92-76-30777-8, 2.–3., 5.–8. lpp.
- [2] European Commission, "EU4Digital Facility", pieejams: <https://eufordigital.eu/discover-eu/eu4digital-supporting-digital-economy-and-society-in-the-eastern-partnership/>.
- [3] OECD dati par interneta piekļuves pakalpojuma pieslēgumu skaitu Latvijā un Eiropas Savienībā, pieejams: <http://www.oecd.org/sti/broadband/broadband-statistics/>.
- [4] CISCO, “Cisco Annual Internet Report (2018–2023)”, 2020, 6.–8. lpp.
- [5] Kajackas A., Vindašius A., “Analysis and Monitoring of end-user perceived QoS in Mobile Networks”, Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium, 2010, pp. 1–4.
- [6] BoR (17) 178 “Net Neutrality Regulatory Assessment Methodology”, 2017, 4.–8. lpp.
- [7] BoR (17) 179 “Net neutrality measurement tool specification”, 2017, 11.–15., 23.–25., 28.–30. lpp.
- [8] BoR (20) 165 “BEREC Guidelines on Very High Capacity Networks”, 2020, 4–6., 9.–14. lpp.
- [9] BoR (20) 99 “BEREC Report on Member States’ best practices to support the defining of adequate broadband Internet Access Service (IAS)”, 2020, 30.–35. lpp.
- [10] BOR (22) 81 “BEREC Guidelines on the Implementation of the Open Internet Regulation”, 2022, 37.–45. lpp.
- [11] Directive (EU) 2018/1972 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 establishing the European Electronic Communications Code, 2018.
- [12] SPRK “Priekšlikumu un komentāru apkopojums par konsultāciju dokumentu par elektronisko sakaru pakalpojumu kvalitātes mērījumu metodikas projektu”, 27.09.2022., 3.–4., 17.–31. lpp., pieejams: <https://sprk.gov.lv/content/publiskas-konsultacijas>.
- [13] Samsung A3 viedtālruna tehniskā specifikācija, pieejams: [https://www.gsmarena.com/samsung_galaxy_a3_\(2016\)-7791.php](https://www.gsmarena.com/samsung_galaxy_a3_(2016)-7791.php).
- [14] Samsung A70 viedtālruna tehniskā specifikācija, pieejams: https://www.gsmarena.com/samsung_galaxy_a70-9646.php.
- [15] Samsung S22 Ultra viedtālruna tehniskā specifikācija, pieejams: https://www.gsmarena.com/samsung_galaxy_s22_ultra_5g-11251.php.
- [16] ETSI TR 102 276, “User Group; Users' Quality of Service Criteria for Internet Access in Europe”, 2003, 7.–12. lpp.
- [17] SPRK Radiofrekvenču spektra lietošanas tiesību piešķirumi, pieejams: https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fwww.sprk.gov.lv%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Feditor%2FESPD%2FFaili%2FFrekvencu_pi_eskirumu_kopsavilkums_03Mar2022.xlsx&wdOrigin=BROWSELINK.

- [18] Hurricane electric BGP toolkit, pieejams: <https://bgp.he.net/>.
- [19] RIPE atlas, pieejams: <https://atlas.ripe.net/>.
- [20] SPRK, Elektronisko sakaru komersantu saraksts, pieejams: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjojNDg5N2RmODgtNGYzZi00NTJmLWE5ZmUtM2FmNzQ4MTAyNTdjIiwidCI6ImU0MGNhOTA5LTg3YmEtNGQ2NS05MTIILTU1YjVIMGRlODUwNSIsImMiOj9>.
- [21] Elektronisko sakaru likums (stājies spēkā 28.07.2022).
- [22] Ministru kabineta 2022. gada 11. oktobra noteikumi Nr. 635 “Ierobežoto radiofrekvenču joslu noteikumi”.
- [23] SPRK 2022. gada 15. septembra lēmums Nr. 1/22 “Vispārējās atļaujas un reģistrācijas noteikumi elektronisko sakaru nozarē”.
- [24] SPRK 2022. gada 22. septembra lēmums Nr. 1/28 “Elektronisko sakaru pakalpojumu kvalitātes prasību noteikumi”.
- [25] SPRK 2022. gada 22. septembra lēmums Nr. 1/30 “Elektronisko sakaru pakalpojumu līguma noteikumi”.
- [26] SPRK 2022. gada 27. septembra lēmums Nr. 1/31 “Elektronisko sakaru pakalpojumu kvalitātes mērījumu metodika”.
- [27] ECC Report 195 “Minimum Set of Quality of Service Parameters and Measurement Methods for Retail Internet Access Services”, 2013, 9.–37. lpp.
- [28] ECC Report 256 “LTE coverage measurements” 2016, 16.–23., 36.–38. lpp.
- [29] ITU-T Recommendation E.802: "Framework and methodologies for the determination and application of QoS parameters ", 2007, 5.–24. lpp.
- [30] ITU-T Recommendation E.806, “Measurement campaigns, monitoring systems and sampling methodologies to monitor the quality of service in mobile networks”, 2019, 3.–17. lpp.
- [31] ECC Report 312 “Measuring and evaluating Mobile Internet Access Service Quality (Mobile IASQ)”, 2020, 13.–14., 20.–35. lpp.
- [32] ETSI EG 202 057-1, “Speech Processing, Transmission and Quality Aspects (STQ); User related QoS parameter definitions and measurements; Part 1: General”, 2011, 13.–22. lpp.
- [33] ETSI EG 202 057-4, “Speech Processing, Transmission and Quality Aspects (STQ); User related QoS parameter definitions and measurements; Part 4: Internet access”, 2008, 14.–19., 24.–26. lpp.
- [34] Darba likums (stājies spēkā 09.08.2001).
- [35] Administratīvo teritoriju un apdzīvoto vietu likums (stājies spēkā 10.06.2020).
- [36] ITU Development sector, “Handbook for the collection of administrative data on telecommunications/ICT 2020 edition”, 2020, 21.–29. lpp.
- [37] ITU, “Quality of Service regulation manual”, 2017, 20.–22., 33.–49., 52.–54. lpp.
- [38] Stafacka, A., Lizunovs, A., Bobrovs, V. “Mobile LTE network signal and Quality of Service parameter evaluation from end-user premises”. Proceedings – 2018 Advances in Wireless and Optical Communications, RTUWO 2018, 2018, pp. 209–212, 8587890.

- [39] Stafecka, A., Lizunovs, A., Bobrovs, V., Gavars, P., Zarins, Z. “Quality of Service and Signal Evaluation Parameter Comparison between Different Mobile Network Operators in Urban Area”. Progress in Electromagnetics Research Symposium, 2019, 2019-June, pp. 3887–3894, 9017680.
- [40] Stafecka, A., Lizunovs, A., Ivanovs, G., Bobrovs, V. “Dependence between Signal Parameter Values and Perceived Internet Access Service QoS in Mobile Networks”. Progress in Electromagnetics Research Symposium, 2021, 2021-November, pp. 1419–1427.
- [41] Lizunovs, A., Stafecka, A., Bobrovs, V. “Internet Access Service QoS and Signal Parameter Measurements in Urban Environment”. Proceedings of the 23rd International Conference Electronics 2019, ELECTRONICS 2019, 2019, 8765584.



Alina Stafecka dzimusi 1992. gadā Rīgā. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvusi bakalaura grādu elektrozinātnē (2014) un maģistra grādu telekomunikācijās (2016). Elektronisko sakaru nozarē A. Stafecka strādā no 2015. gada. Patlaban ieņem Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas komisijas galvenās tīklu infrastruktūras ekspertes amatu, kā arī lektores un zinātniskās asistentes amatu RTU. Kopš 2023. gada ir Eiropas Pasta un telekomunikāciju administrāciju konferences (*CEPT*) Tīklu un numerācijas darba grupas (*WG NaN2*) priekšsēdētāja vietniece.