

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Karolis ŽVINYS

VARTOTOJŲ SUKURIAMŲ SRAUTŲ  
BALANSAVIMAS HETEROGENINIO  
KORINIO RYŠIO TINKLUOSE

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,  
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS INŽINERIJA (01T)



LEIDYKLA  
Vilnius TECHNIKA 2017

Disertacija rengta 2012–2017 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

### **Vadovas**

doc. dr. Darius GURŠNYS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

### **Pirmininkas**

prof. habil. dr. Romanas MARTAVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

### **Nariai:**

dr. Ali DZIRI (Nacionalinė menų ir amatų konservatorija, Prancūzija, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T),

doc. dr. Lina NARBUTAITĖ (Kauno technologijos universitetas, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T),

prof. dr. Dalius NAVAKAUSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T),

prof. dr. Artūras SERACKIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

Disertacija bus ginama viešame Elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2017 m. gegužės 23 d. 10 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2017 m. balandžio 21 d.

Disertaciją galima peržiūrėti VGTU talpykloje <http://dspace.vgtu.lt> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva) ir Valstybinio mokslinių tyrimų instituto Fizinių ir technologijos mokslų centro bibliotekoje (Savanorių pr. 231, LT-02300 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2017-026-M mokslo literatūros knyga  
<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-476-018-1

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2017

© Karolis Žvinys, 2017

[karolis.zvinys@vgtu.lt](mailto:karolis.zvinys@vgtu.lt)

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Karolis ŽVINYS

LOAD BALANCING OF USERS  
GENERATED TRAFFIC IN  
HETEROGENEOUS CELLULAR  
NETWORKS

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,  
ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING (01T)



LEIDYKLA  
Vilnius TECHNIKA 2017

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2012–2017.

### **Supervisor**

Assoc. Prof. Dr Darius GURŠNYS (Vilnius Gediminas Technical University, Electrical and Electronic Engineering – 01T).

The Dissertation Defence Council of Scientific Field of Electrical and Electronic Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

### **Chairman**

Prof. Dr Habil. Romanas MARTAVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Electrical and Electronic Engineering – 01T).

### **Members:**

Dr Ali DZIRI (National Conservatory of Arts and Crafts, Electrical and Electronic Engineering – 01T),

Assoc. Prof. Dr Lina NARBUTAITĖ (Kaunas University of Technology, Electrical and Electronic Engineering – 01T),

Prof. Dr Dalius NAVAKAUSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Electrical and Electronic Engineering – 01T),

Prof. Dr Artūras SERACKIS (Vilnius Gediminas Technical University, Electrical and Electronic Engineering – 01T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of Electrical Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **10 a. m. on 23 May 2017**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 21 April 2017.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at VGTU repository <http://dspace.vgtu.lt> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania) and State research institute Center for Physical Sciences and Technology (Savanorių al. 231, LT-02300 Vilnius, Lithuania).

# Reziუმė

Disertacijoje nagrinėjami heterogeninių korinio ryšio tinklų talpos ir paslaugų kokybės užtikrinimo klausimai, taikant vartotojų srauto balansavimą. Pagrindiniai tyrimo objektai yra vartotojų sukuriama balso ir duomenų srauto balansavimas tinkle. Srauto balansavimas yra svarbi sritis šių dienų telekomunikacijose, kai perduodamų duomenų srautai auga milžiniškais tempais. Įvairiapusiška ir lanksti vartotojų srauto balansavimo metodika leidžia efektyviai valdyti srautą tinkle, sumažinant tinklo apkrovą ir investicijas. Pagrindinis disertacijos tikslas – ištirti išplėstines vartotojų srautų balansavimo galimybes korinio ryšio sistemose. Darbe siekiama įvertinti srauto balansavimo įtaką tinklo vartotojams bei tinklui.

Darbe sprendžiami du pirmieji uždaviniai apima: balso paslaugų vartotojų srauto analizę, pagal vartotojų buvimo vietą, bei balso srauto balansavimą, taikant tarpsteminčius srauto balansavimo metodus. Kiti du uždaviniai siejami su vartotojų siunčiamo duomenų srauto augimu, kuris sukelia tinklo ląstelių persipildymą. Duomenų srauto valdymui taikomi paslaugų klasifikavimo pagal *QoS* ir tarpsluoksnių balansavimo metodai, kurie remiasi mažomis ląstelėmis.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai, priedai, reziumė anglų kalba.

Įvadiniamieji skyriuje aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, gaminieji teiginiai. Pabaigoje pristatomos disertacijos tema autoriaus paskelbtos publikacijos bei disertacijos struktūra. Pirmasis skyrius yra skirtas literatūros analizei. Jame aptariama srautų balansavimo samprata bei poreikis. Skyriuje pateikiama išsami srauto balansavimo metodų apžvalga, analizuojami konkretūs balso ir duomenų balansavimo būdai. Antrame skyriuje nagrinėjamas balso srauto pasiskirstymas realus korinio ryšio tinkle pagal surinktus metaduomenis. Skyriuje pateiktos srauto charakteristikos. Iš tinklo veiklos rodiklių nustatyta balso balansavimo įtaka tinklui ir vartotojams. Trečiasis skyrius atskleidžia duomenų srauto *QoS* prioritetą reikšmę paslaugų kokybei vienodomis ir skirtingomis ryšio kanalo sąlygomis. Tarpsluoksnių srauto balansavimo atveju pateiktas femto zoną reprezentuojantis modelis ir įvertinta ryšio paslaugų vartotojų patiriama paslaugų kokybė femto zonose. Tyrimai atliekami realiomis radijo aplinkos sąlygomis.

Disertacijos tema paskelbti 7 moksliniai straipsniai recenzuojamuose mokslo leidiniuose: 4 straipsniai mokslo žurnaluose referuojamuose kitose tarptautinėse duomenų bazėse ir 3 straipsniai konferencijų medžiagose. Disertacijos tema perskaityti 7 pranešimai Lietuvos ir užsienio šalių konferencijose.

# Abstract

The dissertation investigates the issues of capacity and quality of services in heterogeneous cellular networks, when load balancing is applied. The main objects of research involve load balancing of users voice and data traffic. Load balancing is especially important topic in nowadays telecommunications, when amount of transferred data is increasing drastically. Multidimensional and flexible methodology allows to control users' generated traffic effectively, at the same time reducing the load of network and investments for capacity expansion. The main purpose of dissertation is exploring the opportunities of extended voice and data load balancing. Also, it focuses on impact on customers and network.

The first task of the thesis includes: the analysis of voice traffic distribution and balancing, when load is balanced based on inter system load balancing strategies. The second task is related to growing data traffic from the users, which causes an overload of cells. The control of data volume is organised applying differentiated services based on QoS and inter-layer load balancing.

The dissertation consists of introduction, 3 chapters, general conclusions, references and list of authors publications, annexes, summary in english.

The introduction reveals the investigated problem, importance of the thesis and the object of research and describes the purpose and tasks of the thesis, research methodology, scientific novelty, the practical significance of results and defended statements. At the end of introduction the list of author's publications and the structure of dissertation are presented. Chapter 1 reviews used literature. The conception and need of traffic balancing are discussed and the strategies used for balancing are deeply overviewed. In addition, the concrete methods used for voice and data management are analysed. Chapter 2 analyzes the distribution of voice traffic, based on collected metadata measurements in commercial network. Also, contains obtained characteristics. The impact of load balancing for customers and network is provided. Chapter 3 reveals the importance of QoS priority for data services, under the same and different radio environment. In case of inter-layer load balancing the model representing femto zones is introduced. Service level evaluation results are presented, when femto zone is used for load balancing in live heterogeneous cellular networks.

7 articles focusing on the subject of dissertation are published, 4 of them in peer-reviewed scientific publications in other international databases, 3 in conference proceedings. 7 presentations on the subject were presented in conferences at national and international level.

---

# Žymėjimai

## Santrumpos

*ARP* – priskyrimo ir sulaikymo prioritetas (angl. *Allocation and Retention Priority*)

*AMR-NB* – adaptyvus daugelio spartų siaurajuostis (kodekas) (angl. *Adaptive Multirate Narrow Band*)

*ARFCN* – absoliutus kanalo radijo dažnio numeris (angl. *Absolute Radio Frequency Channel Number*)

*BE* – geriausių pastangų (principas) (angl. *Best Effort*)

*BHCA* – skambučių skaičius per piko valandą (angl. *Busy Hour Call Attempts*)

*CS* – grandinėmis komutuojami (balso skambučiai) (angl. *Circuit Switched*)

*CSFB* – grandinėmis komutuojamo (balso skambučio) perjungimas (angl. *Circuit Switched FallBack*)

*CPE* – vartotojo patalpos įrangą (angl. *Customer Premises Equipment*)

*CDR* – skambučio informacijos įrašas (angl. *Call Detail Record*)

*CQI* – kanalo kokybės indikatorius (angl. *Channel Quality Indicator*)

*CSG* – uždara vartotojų grupė (angl. *Closed Subscriber Group*)

*CE* – kanalo elementai (angl. *Channel Elements*)

*CPICH* – bendrasis pilotinis kanalas (angl. *Common Pilot Channel*)

*DPCCH* – skirtas fizinis valdymo kanalas (angl. *Dedicated Physical Control Channel*)

*DPDCH* – skirtas fizinis duomenų kanalas (angl. *Dedicated Physical Data Channel*)

*DRD* – pakartotinio bandymo sprendimas (angl. *Directed Retry Decision*)

*DL* – žemynkryptis (angl. *Downlink*)

*ETSI* – Europos telekomunikacijų standartų institutas (angl. *European Telecommunications Standards Institute*)

*E2E* – visoje atkarpoje (angl. *End To End*)

*E-DCH* – aukštynkryptis patobulintas dedikuotas kanalas (angl. *Enhanced Dedicated Channel*)

*GSM* – globali mobiliųjų komunikacijų sistema (angl. *Global System for Mobile communication*)

*HSPA* – greitos paketų prieigos (technologija) (angl. *High Speed Packet Access*)

*HSUPA* – aukštynkryptė greitos paketų prieigos (technologija) (angl. *High Speed Uplink Packet Access*)

*HSDPA* – žemynkryptė greitos paketų prieigos (technologija) (angl. *High Speed Downlink Packet Access*)

*HS-DSCH* – greitos paketų prieigos žemynkryptis dalinamas kanalas (angl. *High Speed Downlink Shared Channel*)

*HNB* – 3G namų zonos bazinė stotis, (femto zona) (angl. *Home NodeB*)

*HeNB* – 4G namų zonos bazinė stotis, (femto zona) (angl. *Home eNodeB*)

*HNB-Gw* – namų zonos bazinės stoties vartai (angl. *Home NodeB Gateway*)

*HetNet* – heterogeninis tinklas (angl. *Heterogeneous Network*)

*ICT* – informacinės ir ryšių technologijos (angl. *Information and Communication Technologies*)

*IoT* – daiktų internetas (angl. *Internet of Things*)

*Iub* – sąsaja tarp 3G bazinės stoties ir tinklo valdiklio

*IP* – interneto protokolas (angl. *Internet Protocol*)

*IMS* – IP multimedijos sistema (angl. *IP Multimedia Subsystem*)

*IPSec* – saugus interneto protokolas (angl. *Internet Protocol Security*)

*KPI* – pagrindinis veiklos rodiklis (angl. *Key Performance Indicator*)

*LTE* – ketvirtos kartos ryšio technologija (angl. *Long Term Evolution*)

*LBHO* – perjungimas grįstas apkrova (angl. *Load Based Handover*)

*MT* – mobilus terminalas (angl. *Mobile Terminal*)

*M2M* – sujungimas tarp dviejų įrenginių (angl. *Machine To Machine*)

*MLB* – mobilios apkrovos balansavimas (angl. *Mobility Load Balancing*)

*MRAB* – daugialypis ryšio paslaugos nešlys (angl. *Multi Radio Access Bearer*)

*MCS* – moduliavimo ir kodavimo schema (angl. *Modulation and Coding Scheme*)

*MOCN* – keleto operatorių kamieninis tinklas (angl. *Multi Operator Core Network*)

*MOS* – vidutinis nuomonių balas (angl. *Mean Opinion Score*)



*P2P* – taškas – taškas (sujungimas) (angl. *Point To Point*)  
*PLMN* – viešas antžeminis mobilusis tinklas (angl. *Public Land Mobile Network*)  
*PESQ* – suvokimu pagrįsta kalbos kokybė (angl. *Perceptual Evaluation of Speech Quality*)  
*QoS* – paslaugos kokybė (angl. *Quality of Service*)  
*QoE* – vartotojo patirties kokybė (angl. *Quality of Experience*)  
*RAB* – radijo paslaugos nešlys (angl. *Radio Access Bearer*)  
*RRC* – radijo išteklių valdymo (protokolas) (angl. *Radio Resource Control*)  
*RTP* – realaus laiko protokolas (angl. *Real Time Protocol*)  
*RxLev* – 2G priimamo signalo lygis (angl. *Received Level*)  
*RSCP* – 3G priimto signalo kodo galia (angl. *Received Signal Code Power*)  
*RIM* – išteklių informacijos valdymas (angl. *Resource Information Management*)  
*RNC* – radijo tinklo valdiklis (angl. *Radio Network Controller*)  
*SON* – savioptimizuojantis tinklas (angl. *Self-Optimizing Network*)  
*SMS* – trumpųjų žinučių paslauga (angl. *Short Message Service*)  
*SHO* – minkštas perjungimas (angl. *Soft Handover*)  
*SPI* – planavimo prioriteto indikatorius (angl. *Scheduling Priority Indicator*)  
*TE* – terminalinė įranga (angl. *Terminal Equipment*)  
*TTI* – siuntimo laiko intervalas (angl. *Transmission Time Interval*)  
*TTF* – tikimybės tankio funkcija (angl. *Probability Density Function*)  
*THP* – srauto koordinavimo prioritetas (angl. *Traffic Handling Priority*)  
*TCH* – transportinis kanalas (angl. *Transport Channel*)  
*TBS* – transportinio bloko dydis (angl. *Transport Block Size*)  
*TVWS* – baltosios televizijos kanalų vietos (angl. *Television White Spaces*)  
*UMTS* – universali mobiliųjų telekomunikacijų sistema (angl. *Universal Mobile Telecommunications System*)  
*Uu* – vartotojo oro sąsaja (angl. *User Air Interface*)  
*UE* – vartotojo įranga (angl. *User Equipment*)  
*UL* – aukštynkryptis (angl. *Uplink*)  
*VoLTE* – balsas per LTE (angl. *Voice over LTE*)  
*WLAN* – belaidis vietinis tinklas (angl. *Wireless Local Area Network*)  
*WiFi* – belaidžio ryšio technologija  
*3GPP* – trečios kartos partnerystės projektas (angl. *3rd Generation Partnership Project*)



---

# Turinys

IVADAS .....	1
Problemos formulavimas .....	1
Darbo aktualumas .....	3
Tyrimų objektas .....	4
Darbo tikslas .....	4
Darbo uždaviniai .....	4
Tyrimų metodika .....	5
Darbo mokslinis naujumas .....	5
Darbo rezultatų praktinė reikšmė .....	6
Ginamieji teiginiai .....	6
Darbo rezultatų aprobavimas .....	7
Disertacijos struktūra .....	7
1. VARTOTOJŲ BALSŲ IR DUOMENŲ SRAUTO BALANSAVIMO ANALIZĖ .....	9
1.1. Vartotojų sukuriama srauto heterogeniniuose korinio ryšio tinkluose balansavimo samprata .....	10
1.2. Vartotojų sukuriama srauto balansavimo poreikis .....	12
1.3. Vartotojų srauto balansavimo metodai .....	13
1.4. Vartotojų balsų srauto balansavimas .....	17
1.4.1. Balsų skambučių vartotojų įpročiai .....	17
1.4.2. Balsų skambučių balansavimo algoritmai .....	19
1.4.3. Apkrova grįstas balsų srauto balansavimo metodas .....	20
1.4.4. Tiesioginio balsų srauto nukreipimo balansavimo metodas .....	21
1.5. Vartotojų duomenų srauto balansavimas .....	23

1.5.1. Srauto balansavimas pagal reikalaujamą paslaugų kokybę .....	27
1.5.2. Srauto balansavimas taikant mažų ląstelių sluoksnius .....	29
1.5.3. Femto ląstelės koncepcija.....	31
1.5.4. Femto ląstelių tyrimai šiuolaikinėse telekomunikacijų sistemose.....	32
1.6. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	33
2. BALSŲ SKAMBUČIŲ SRAUTO BALANSAVIMAS .....	35
2.1. Balsų skambučių trukmės matavimų metodika .....	36
2.1.1. Balsų skambučių trukmių pasiskirstymas pagal vartotojų buvimo vietą... ..	38
2.1.2. Balsų skambučių vartotojų grupių elgsenos skirtumai .....	46
2.1.3. Balsų skambučių trukmės pasiskirstymas pagal naudojamą technologiją. ..	50
2.2. Balsų srauto pasiskirstymas taikant skambučių balansavimą .....	53
2.2.1. Balsų skambučių sėkmingų perjungimų priklausomybė taikant balsų srauto balansavimą.....	56
2.2.2. 3G tinklo išteklių perskirstymas taikant balsų srauto balansavimą .....	58
2.2.3. Kanalo elementų pasiskirstymas taikant balsų srauto balansavimą.....	61
2.2.4. 2G skambučių blokavimas taikant balsų srauto balansavimą.....	62
2.3. Antrojo skyriaus išvados .....	64
3. DUOMENŲ SRAUTO BALANSAVIMAS.....	65
3.1. Vartotojų suvokiamų paslaugų kokybės valdymas.....	66
3.1.1. Vartotojo profilio sudarymas .....	67
3.1.2. Greitos paketų prieigos duomenų srauto prioritetas vienodomis ryšio sąlygomis .....	68
3.1.3. Greitos paketų prieigos duomenų srauto prioritetas skirtingomis ryšio sąlygomis.....	73
3.2. Mažos ląstelės heterogeninėje tinklo struktūroje.....	80
3.2.1. Mažų ląstelių savybės ir problematika .....	81
3.2.2. Femto ląstelės integracijos modelis.....	84
3.2.3. Femto ląstelių plėtros galimybės telekomunikacijų versle.....	86
3.2.4. Femto ląstelės Lietuvoje.....	92
3.3. Trečiojo skyriaus išvados .....	99
BENDROSIOS IŠVADOS .....	101
REKOMENDACIJOS .....	103
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	105
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS ..	115
SUMMARY IN ENGLISH.....	117
PRIEDAI <sup>1</sup> .....	133
A priedas. Disertacijos autoriaus sąžiningumo deklaracija .....	135
B priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijų medžiagą disertacijoje.....	137
C priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos.....	141

<sup>1</sup>Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje

---

# Content

INTRODUCTION .....	1
Problem formulation.....	1
Relevance of the thesis .....	3
The object of the research.....	5
The aim of thesis .....	5
The objectives of the thesis .....	5
Research methodology .....	5
Scientific novelty on the thesis.....	6
Practical value of the research findings.....	6
The defendent statements .....	7
Approval of the research findings .....	7
Structure of dissertation.....	8
1. ANALYSIS OF USERS VOICE AND DATA TRAFFIC BALANCING.....	9
1.1. Concept of users load balancing in heterogeneous cellular networks.....	10
1.2. The demand of users generated load balancing .....	12
1.3. Methods of users generated load balancing.....	13
1.4. Balancing of users voice traffic .....	17
1.4.1. The habits of voice call users.....	17
1.4.2. Algorithms of voice calls load balancing.....	19
1.4.3. Load based method of voice traffic balancing .....	20
1.4.4. Direct retry method of voice traffic balancing.....	21
1.5. Balancing of users data traffic .....	23

1.5.1. Load balancing based on quality of service .....	27
1.5.2. Load balancing based on small cells.....	29
1.5.3. Concept of femto cells .....	31
1.5.4. The researches of femto cells in today’s telecommunication systems .....	32
1.6. Conclusions of the 1st chapter and formulation of the thesis objectives .....	33
2. BALANCING OF VOICE TRAFFIC .....	35
2.1. Methodology of voice calls duration measurements .....	36
2.1.1. Distribution of voice calls duration based on user location .....	38
2.1.2. The differences of behavior between voice calls users groups .....	46
2.1.3. Distribution of voice calls duration based on used technology .....	50
2.2. Distribution of voice traffic when voice load balancing is used.....	53
2.2.1. Success of handovers when voice load balancing is used.....	56
2.2.2. Distribution of 3G resources when voice load balancing is used.....	58
2.2.3. Distribution of channel elements when voice load balancing is used .....	61
2.2.4. Blocking rate of 2G voice calls when voice load balancing is used .....	62
2.3. Conclusions of the 2nd chapter .....	64
3. BALANCING OF DATA TRAFFIC.....	65
3.1. The management of users perceived service quality .....	66
3.1.1. Creation of user profile .....	67
3.1.2. Prioritized data load balancing of high speed packet access at similar radio conditions .....	68
3.1.3. Prioritized data load balancing of high speed packet access at dynamic radio conditions .....	73
3.2. Small cells in heterogeneous network .....	80
3.2.1. Features and challenges of small cells .....	81
3.2.2. Integration model of femto cells .....	84
3.2.3. Development of femto cells in telecommunication business .....	86
3.2.4. Femto cells in Lithuania .....	92
3.3. Conclusions of the 3rd chapter .....	99
GENERAL CONCLUSIONS .....	101
RECOMMENDATIONS .....	103
REFERENCES .....	105
LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION .....	115
SUMMARY IN ENGLISH.....	117
ANNEXES <sup>1</sup> .....	133
Annex A. Created intellectual property cores .....	135
Annex B. The co-authors agreement to present publications material in the dissertation .....	137
Annex C. Copies of scientific publications by the author on the topic of the dissertation .....	141

---

<sup>1</sup>The annexes are supplied in the enclosed compact disc

---

# Įvadas

## Problemos formulavimas

Heterogeninės korinio ryšio sistemos yra viena pagrindinių priemonių leidžiančių vartotojams siųsti ir priimti informaciją. Dėl plačios skverbties, mobilumo ir įvairiapusių paslaugų, jos tapo itin svarbios visose žmonių gyvenimo srityse. Esama korinio ryšio infrastruktūra ir prieinama paslaugų kaina lėmė, kad vartotojų skaičius korinėse ryšio sistemose išaugo tūkstančius kartų. Perduodamų duomenų kiekis šoktelėjo 6–7 kartus. Dėl to korinio ryšio sistemos susidūrė su radijo tinklo išteklių trūkumo problema. Problemos reikšmingumą sustiprino nekoordinuotas vartotojų judėjimas kompleksiškoje, iš keleto skirtingų ryšio technologijų sudarytoje heterogeninėje tinklo struktūroje. Vartotojų pasklidimą sistemoje apsprendžia turima daugiastandartė galinė įranga ir padengimo zona. Daugelis mobiliojo ryšio prietaisų veikia automatinio tinklo pasirinkimo režimu, o tinklo technologijų aprėpties zonos siekia 99 % šalies teritorijos. Dėl susidariusios padėties, didelis vartotojų skaičius susikoncentravo aukštesnio prioriteto ryšio perdavimo technologijose. Tai sąlygoja, kad dalis korinio tinklo ląstelių tampa perpildytos, o teikiamų paslaugų kokybė jose prastėja. Dėl to disertacijoje sprendžiama korinio ryšio tinklo vartotojų sukuriamų balso ir duomenų srautų paskirstymo problema, srautų balansuojant tarp esamų ir aplinkinių tinklo ląstelių. Plėsti korinio makro tinklo ryšio sistemos talpą yra brangu, o kartais ir labai sudėtinga, todėl pasitelkiami kiti

tinklo ląstelių talpos optimizavimo būdai. Labiausiai tinkama alternatyva yra korinio ryšio vartotojų srauto balansavimas heterogeninėje ryšio sistemoje.

Telekomunikacijų tinklo struktūra yra kompleksinė, sudaryta iš *GSM* (angl. *Global System for Mobile communication*), *UMTS* (angl. *Universal Mobile Telecommunications System*) ir *LTE* (angl. *Long Term Evolution*) ryšio technologijų (Sauter, 2011). Daugelis vartotojų prisijungia prie tų pačių tinklo ląstelių. Realybėje pagrindinis srautas yra persiunčiamas per 10–15 % tinklo ląstelių. Tokios ląstelės yra stipriai apkraunamos, jose susidaro sangrūdos. Išvengti sangrūdų ir vartotojų srautui tinkle balansuoti naudojami judriosios apkrovos balansavimo (angl. *Mobility Load Balancing – MLB*) metodai (3GPP TS 32.521 Self-Organizing Networks (*SON*), 2011). *MLB* leidžia tinklo ląstelėms, kuriose susidaro sangrūdos, dalį apkrovos perduoti kitoms tinklo ląstelėms, turinčioms laisvų išteklių.

Srauto balansavimas dažniausiai naudotas interneto duomenų srautui tinklo ląstelėse paskirstyti. Toks kelias laikomas tradiciniu. Šiandien, tradiciniai *MLB* metodai ne visada padeda išspręsti tinklo talpos klausimus. Dėl to dėmesys krypsta į naujas srauto valdymo priemones. Pastarųjų reikšmė didėja, siekiant užtikrinti efektyvų išteklių paskirstymą ir teikti kokybiškas paslaugas vartotojams.

Šiai problemai spręsti, disertacijoje analizuojami įvairialypiai, *MLB* pagrindu veikiantys balso ir duomenų srautų balansavimo metodai. Darbe keliami hipotezė, kad *MLB* metodai gali padidinti korinio ryšio tinklo talpą, sumaniai paskirstant vartotojų srautą tinkle ir pagerinti vartotojų patirtį naudojantis telekomunikacijų paslaugomis. Ieškant atsakymų, daroma prielaida, kad sumanus srauto balansavimas teiks abipusę naudą korinio ryšio sistemai ir jos vartotojams.

Balso srauto atveju, reikia išanalizuoti balso srauto pasiskirstymą šiandieninėse korinio ryšio sistemose. Tuomet vykdant balso srauto balansavimą, skambučiai iš *UMTS* ryšio ląstelių nukreipiami į *GSM* ląsteles. Laisvi radijo tinklo išteklių trečios kartos technologijoje priskiriami duomenų perdavimo sesijoms.

Duomenų srauto perdavimo atveju, stipriai apkrautose tinklo ląstelėse atliekamas vartotojų profiliavimas. Vartotojai ryšio sistemoje klasifikuojami pagal skirtingus *QoS* (angl. *Quality of Service*) profilius, tokiu būdu užtikrinant jų pranašumą pikiniais tinklo apkrovos momentais. Zonose, kur vartotojų koncentracija didelė, srauto balansavimas makro ryšio sistemoje kartais gali būti beprasmiškas, nes nėra kur nukreipti vartotojų srauto dėl aplinkinių tinklo ląstelių persipildymo. Tokiais atvejais ryšio sistemose kuriami atskiri mažų ląstelių sluoksniai skirti paslaugas teikti ribotoje zonoje. Srauto balansavimas vykdomas tarp išorinio makro tinklo ir mažų ląstelių sluoksnio. Darbe konstruojamas mažų femto ląstelių modelis, apibūdinantis tokio tipo tinklo elementų integraciją į šiuolaikines *HetNet* tinklų struktūras. Analizuojama mažų tinklo ląstelių efektyvumas atliekant srauto paskirstymą.



## Darbo aktualumas

Vartotojų įpročiai naudotis telekomunikacinėmis paslaugomis prieš dešimtmetį ir šiandien gerokai skiriasi. Tam įtakos turi daugelis veiksnių. Svarbiausi jų yra pasikeitęs žmonių gyvenimo būdas bei technologinė pažanga. Prieinamas interneto turinys reikalauja didelės duomenų kanalo pralaidos, o vartotojai teikiamų paslaugų kokybei kelia vis aukštesnius reikalavimus. Spartus duomenų perdavimas ir aukštos kokybės paslaugos tarp vartotojų tampa ne privalumu, o būtinybe.

Sparti išmaniųjų įrenginių skverbtis lėmė vartotojų srauto augimą (Ericsson Mobility Report, 2016). Vartotojų duomenų suvartojimas mobiliajame telefone, neseniai siekęs kelis šimtus megabaitų pakilo iki gigabaitų ir šiandien vidutiniškai siekia 7–9 GB. Prognozuojama, kad 2020-ais metais perduodamų duomenų poreikis sieks 18 GB (Mobile Marketing Statistics compilation, 2016).

Dėl vartotojų judrumo korinio ryšio sistemose vyksta nuolatinis vartotojų balso ir duomenų srautų persiskirstymas. Daugiau nei 70 % korinio ryšio srauto yra generuojama pastatų viduje (SimpleCore: an appeal for less complex core networks, 2016; Upponor *et al.* 2016), o tinkle įprastai egzistuoja keleta didelio srauto intensyvumo zonų. Jose vartotojai greitai išsekvoja bazinės stoties išteklius, todėl ląstelė tampa nepajėgi teikti kokybiškų ryšio paslaugų. Maksimali apkrova įtakoja prastą balso kokybę, sisteminius trukdžius, mažinama duomenų perdavimo sparta, o nauji prisijungimai blokuojami (Aijaz *et al.* 2013).

Siekiant užtikrinti geriausią vartotojų patirtį ir aptarnauti visus vartotojus, reikalinga užtikrinti ląstelės talpą. Plėsti ląstelių talpą nepakanka, reikalingi kiti aparatinės įrangos efektyvesnio panaudojimo būdai. Dažnu atveju, dėl intensyvaus vartotojų mobilumo, numatyti būsimas apkrovas yra sudėtinga. Vartotojų srauto balansavimas ryšio sistemoje yra bene pigiausias ir paprasčiausias būdas, leidžiantis efektyviai išnaudoti esamos įrangos išteklius. Balansuojant srautą, skambučiai nukreipiami į žemesnes ryšio technologijas, o duomenų perdavimo technologijų ištekliai paskiriami kitiems vartotojams. Tokiu būdu aparatinė tinklo įranga apkraunama tolygiai, kartu sumažinamos išlaidos naujos įrangos įsigijimui.

Masinių susibūrimų vietose vartotojų srautas nukreipiamas į mažų ląstelių sluoksnius, sumažinant makro tinklo apkrovą. Tinklo vartotojų klasifikavimas vykdomas ir tarp atskirų vartotojų vienus padarant reikšmingesnius nei kiti. Šios priemonės praplečia jau esamų srauto balansavimo metodų funkcionalumą ir užtikrina efektyvų korinio ryšio tinklo vartotojų valdymą. Vartotojų informacijos srauto valdymui taikant tarpsteminčius ir sistemos viduje atliekamus srauto balansavimo metodus įgyvendinamas visavertis ryšio sistemos išteklių panaudojimas. Didelė dalis tyrimų siejami su inovatyvių srauto valdymo priemonių paieška (Song *et al.* 2007, Ye *et al.* 2013, Garcia-Lozano *et al.* 2004). Šia kryptimi dirba ir didieji pasaulio telekomunikacijų įrangos gamintojai (Siomina *et al.* 2012).

Vartotojų sukuriama srauto balansavimo problematika yra aktuali ir ateities ryšio perdavimo sistemoms. Tai rodo kitų tyrimų rezultatai, kurie teigia, kad duomenų perdavimo poreikis toliau augs, o heterogeninių ryšio sistemų apkrova didės. Naujos daiktų interneto technologijos neapsieis be duomenų perdavimo ryšio sistemomis, o vartotojai vis daugiau duomenų persiųs koriniu ryšio tinklu.

Pateikti faktai ir pastebėjimai, skatina tolimesnius vartotojų balso ir duomenų srautų valdymo priemonių tyrimus. Augant vartotojų reiklumui ir didėjant sistemų apkrovai, srauto valdymo metodai yra būdas leisiantis efektyviai koordinuoti tinklo vartotojų generuojamą srautą.

## Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas yra heterogeninėse korinio ryšio sistemose vartotojų generuojamų balso ir duomenų srautų balansavimo metodai tarp tinklo ląstelių ir kitų ryšio technologijų.

## Darbo tikslas

Šio darbo tikslas yra subalansuoti, vartotojų sukuriamą informacijos srautą heterogeninėse korinio ryšio sistemose, pasiūlant išplėstinius balso ir duomenų srautų balansavimo metodus.

## Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti darbe sprendžiami šie uždaviniai:

1. Įvertinti vartotojų balso srauto pasiskirstymo charakteringąsias savybes heterogeninėse korinio ryšio sistemose.
2. Pasiūlyti ir iširti tarpsteminis balso srauto balansavimo metodus, įvertinant poveikį ryšio sistemoms ir vartotojams.
3. Įvertinti *QoS* profiliavimo pagrindu sudarytų vartotojų duomenų srauto balansavimo veiksmingumą ir priimamų paslaugų kokybės efektyvumą.
4. Sudaryti mažų ląstelių integracijos modelį, tinkantį balansuoti makro korinio ryšio sistemų apkrovą ir iširti mažų ląstelių efektyvumą balansuojant vartotojų srautą.

## Tyrimų metodika

Darbe taikoma matematinė ir taikomoji statistika, teletrafiko inžinerijos, didžiųjų duomenų, korinio ryšio tinklo planavimo teorijos, signalų analizės metodai. Balso skambučių trukmių metaduomenų analizei naudojama metaanalizė. Darbe naudojami srauto balansavimo tarp aplinkinių tinklo ląstelių ir ląstelių viduje vykdomo balansavimo būdai. Pasitelkiami suspausto režimo balso skambučių perdavimo metodai. Duomenų srauto balansavimui naudojama *3GPP* (angl. *3rd Generation Partnership Project*) standartizuota vartotojų profiliavimo metodika bei savioptimizacija grįstų ląstelių tinklų koncepcija. Eksperimentais tikrinami analizuojamų srauto balansavimo metodų rezultatai. Darbo išvados grindžiamos matavimais. Matavimams naudojama Tems Pocket aparatinė įranga bei Tems Investigation programinė įranga. Tyrimai atliekami realiose korinio ryšio tinklų sistemose, kuriose veikia Huawei BTS3900 ir Ericsson RBS6000 šeimų bazinės stotys.

## Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie elektros ir elektronikos inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Įvertintas Lietuvos heterogeninio korinio ryšio sistemų balso skambučių vartotojų grupių sukuriamų skambučių srautų pasiskirstymas, priklausantis nuo skambučio vietos, analizei panaudojant vartotojų grupes, o ne pavienius vartotojus.
2. Įgyvendinti tarp sisteminiai 2G ir 3G korinio ryšio tinklo balso srauto balansavimo metodai komerciniame operatoriaus tinkle, taikant kraštines, švelnaus bei agresyvaus balso srauto balansavimo sąlygas. Nustatyta priimtinausia balso srauto balansavimo strategija tinklo išteklių panaudojimo ir vartotojų paslaugų kokybės atžvilgiais.
3. Gauti nauji, pagal *QoS* prioritetus klasifikuotų vartotojų gaunamų duomenų pernašos paslaugų efektyvumo duomenys, skirtingomis ryšio sąlygomis, susieti su radijo kanalo parametrais.
4. Sudarytas savaimine konfigūracija pagrįstų mažų ląstelių integracijos modelis, tinkantis mažų ląstelių HetNet struktūroms charakterizuoti ir vystyti bei pirmą kartą ištirtas tarp sluoksninio srauto balansavimo efektyvumas Lietuvos korinio ryšio tinkle, panaudojant mažas ląsteles.

## Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Dirbant su realiomis korinio ryšio sistemomis, nustatytas Lietuvos korinio ryšio balso paslaugų vartotojų generuojamo srauto pobūdis, priklausomai nuo vartotojų buvimo vietos. Gauti tyrimų rezultatai gali būti naudojami korinio ryšio vartotojų bendravimo įpročių analizei, numatant galimą įtaką ryšio sistemoms. Vartotojų balso srauto valdymui tinkle pasiūlyti tarpsteminiai srauto balansavimo metodai, kurių taikymas visame tinkle leistų tinklo operatoriams efektyviai išnaudoti visų korinio ryšio technologijų išteklius.

Duomenų srauto balansavimo atveju, nustatyta, vartotojų patiriama paslaugų kokybė, gauta taikant *QoS* ir tarp sluoksnių vartotojų srauto balansavimą. Remiantis praktiniais matavimais, atliktais realiomis ryšio sąlygomis, parodytas vartotojų gaunamų paslaugų efektyvumas. Ryšio operatoriaus tinkle įgyvendinus šias priemones gali būti pagerinta teikiamų paslaugų kokybė esamiems vartotojams. Tai leistų tikėtis operatoriaus populiarumo padidėjimo tarp naujų vartotojų ir pajamų augimo. Atlikti tyrimai neturi panašių analogų Lietuvoje ir pasižymi išskirtinumu, nes analizė atliekama realiomis ryšio sąlygomis su veikiančiomis sistemomis.

## Ginamieji teiginiai

1. Balso skambučių vartotojus heterogeniniuose korinio ryšio tinkluose rekomenduojama klasifikuoti pagal skambučio vietą. Tai leistų detaliau įvertinti vartotojų elgsenos įpročius jiems esant skirtingose vietose bei numatyti bazinės stoties įtaką korinei ryšio sistemai.
2. Nuosaikus tarp technologinio balso srauto balansavimo metodas, leidžia heterogeniniame korinio ryšio tinkle užtikrinti optimalų sistemos išteklių panaudojimą, išlaikant aukštą vartotojų paslaugų kokybę.
3. Duomenų pernašos paslaugų vartotojus korinėse ryšio sistemose klasifikuojant į turinčius skirtingą *QoS* profilį, būtų užtikrinamas efektyvesnis tinklo talpos panaudojimas ir vartotojų išskirtinumas, tačiau tik esant geroms radijo ryšio sąlygoms.
4. Savaiminės konfigūracijos mažų ląstelių taikymas *HetNet* sistemose vidutiniškai dvigubai sumažina makro tinklo apkrovą, o tai sąlygoja vartotojų gaunamų paslaugų kokybės pagerėjimą.

## Darbo rezultatų apibavimas

Disertacijos tema paskelbti 7 moksliniai straipsniai recenzuojamuose mokslo leidiniuose: 3 straipsniai mokslo žurnaluose referuojamuose kitose tarptautinėse duomenų bazėse ir 4 straipsniai konferencijų medžiagoje. Autoriaus publikacijų sąrašas pateiktas 115–116 puslapiuose.

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti septyniose mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje:

- Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „*Mokslas – Lietuvos ateitis: Elektronika ir elektrotechnika*“ 2013–2014 m., Vilniuje;
- Tarptautinėje konferencijoje „*The 1st IEEE Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering*“ 2013 m., Rygoje;
- Tarptautinėje konferencijoje „*Baltic Young PhD Conference „10 Years Baltic Summer School*“ 2014 m., Rygoje;
- Tarptautinėje konferencijoje „*Progress In Electromagnetics Research Symposium*“ 2015 m., Prahoje;
- Respublikinėje konferencijoje „*eStream*“ 2015–2016 m., Vilniuje.

## Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai ir bendrosios išvados.

Darbo apimtis yra 133 puslapiai, tekste panaudoti 59 paveiksai ir 7 lentelės. Rašant disertaciją apžvelgti 128 literatūros šaltiniai.



---

## Vartotojų balso ir duomenų srauto balansavimo analizė

Skyriuje apžvelgiamos balso ir duomenų vartotojų srauto balansavimo technologijos bei metodai, skirti vartotojų generuojamo srauto balansavimui korinėse ryšio sistemose. Pirmajame poskyryje aptariama vartotojų srauto balansavimo samprata, įvardijami veiksniai dėl kurių kyla vartotojų srauto balansavimo poreikis. Antrasis poskyris analizuoja šiuolaikinių heterogeninio korinio ryšio tinklų vartotojų įpročius ir su jais susijusius perduodamo srauto pokyčius korinėse ryšio sistemose. Likusieji poskyriai skirti konkrečių balso ir duomenų srautų balansavimo metodų apžvalgai. Juose analizuojami progresyvūs vartotojų srauto balansavimo metodai, kurie leidžia palengvinti *HetNet* (angl. *Heterogeneous Network*) topologijos tinklų apkrovą ir išplėsti talpą. Aptariami srauto balansavimo būdai leidžia atlikti vartotojų srauto balansavimą, kuomet įprastiniai srauto balansavimo algoritmai nebėra pajėgūs to daryti. Tai itin svarbu, toliau stebint perduodamo vartotojų informacijos srauto augimą korinėmis ryšio sistemomis.

Skyriaus tematika paskelbti keturi autoriaus straipsniai: Žvinys (2013), Stirbys *et al.* (2014), Žvinys *et al.* (2014), Žvinys *et al.* (2015). Perskaityti keturi pranešimai užsienio ir respublikinėse konferencijose: „Mokslas – Lietuvos ateitis: Elektronika ir elektrotechnika“ (Vilnius, 2013–2014), „AIEEE“ (Ryga, 2014), „PIERS“ (Praha, 2015).

## 1.1. Vartotojų sukuriama srauto heterogeniniuose korinio ryšio tinkluose balansavimo samprata

Įvairios ryšio perdavimo sistemos visais laikais kuriamos vienu tikslu – perduoti informacijos srautui. Korinio ryšio tinklai taip pat. Ankstyvųjų korinio ryšio sistemų laikotarpiu, kurios veikė analoginės telefonijos principais, vartotojų skaičius tinkluose buvo minimalus. Suprantama, kad vartotojų sukuriamas srautas irgi buvo ne didelis. Pirmieji mobilaus ryšio tinklai buvo skirti perduoti žmonių kalbai, todėl anuomet veikusiuose tinkluose vyraujantis buvo balso informacijos srautas. Padėtis stipriai pasikeitė analogines ryšio sistemas pakeitus skaitmeninėmis. Pradėjus naudoti skaitmeninius komponentus įranga stipriai atpigo ir tapo daug pasiekemesnė. Vartotojų skaičius korinėse ryšio sistemose ėmė augti itin greitai. Svarbiu momentu laikomas duomenų perdavimo *IP* paketais įtraukimas į korines ryšio sistemas. Mobilūs duomenys ne tik išplėtė korinio ryšio paslaugų įvairovę, tačiau pritraukė dar didesnę vartotojų būrį.

Atkreipkime dėmesį, kad didelis vartotojų skaičius ir srauto intensyvumas tinklo ląstelėje neigiamai veikia paslaugų kokybę. Lygiai taip pat, kaip automobilių srauto atveju gatvėje valdymui, heterogeniniame korinio ryšio tinkle vykdomas vartotojų srauto valdymas. Valdyti vartotojų srautą reikalinga dėl keletos priežasčių. Daugialypėje korinio ryšio tinklo struktūroje vartotojai ir jų kuriamas srautas pasiskirsto netolygiai. Taip nutinka, nes daugiafunkcinė vartotojų įranga sukonfigūruota veikti automatiniu režimu ir įprastai daug vartotojų susitelkia tose pačiose tinklo ląstelėse. Dėl to neefektyviai išnaudojami tinklo išteklių. Kitas svarbus momentas yra vartotojų telekomunikacijų paslaugų naudojimo įpročiai. Jie nuolat kinta ir yra stipriai priklausomi nuo vartotojų gyvenimo tempo, būdo, naujų tendencijų, ar netgi technologinių madų. Mobilumas ir beveik nepertraukiamas duomenų perdavimas mobiliojo ryšio tinklu sąlygoja, kad tinklo ląstelės yra perpildomos, o tai neigiamai veikia paslaugų kokybę. Vartotojų srauto balansavimas yra sprendimas skirtas paskirstyti vartotojų srautą korinėje ryšio sistemoje, jį nukreipiant į kitas tinklo ląsteles ar suteikiant srautui aukštesnį prioritetą.

Griežtai standartizuotų srauto balansavimo taisyklių ir kriterijų nėra. Komerinės telekomunikacijų įrangos gamintojai ir ryšio operatoriai patys nustato kriterijus, pagal kuriuos vartotojų srautas yra paskirstomas. Dažniausiai srauto balansavimo kriterijumi yra pasirenkamas vartotojų skaičiaus tinklo ląstelėje slenkstis ar ląstelės išteklių išnaudojimo lygis (Haldar *et al.* 2010, Siomina *et al.* 2004, Das *et al.* 2003). Kritiniais išteklių reikalingais paslaugoms teikti yra laikomi ląstelės siųstuvo galia, išteklių blokų, transportinių kanalų skaičius, kanalo elementų ir kiti radijo išteklių. Kanalo elementas yra išteklių vienetas 3G ryšio sistemoje, kuris reikalingas paslaugai gauti. Vienas kanalo elementas užtikrina vieno balso skambučio talpą su būtinosiomis procedūromis, kurios apima signalizacijos,



minkštųjų perjungimų ir skambučio tęstinumo kitoje ryšio technologijoje procedūras. Ląstelės radijo išteklių panaudojimas yra tiesiogiai susietas su aktyviais vartotojais ląstelėje.

Nuo vartotojų skaičiaus ir jų aktyvumo korinio tinklo ląstelėje priklauso visų kitų toje ląstelėje esančių vartotojų paslaugų kokybė. Pagal *ETSI* (angl. *European Telecommunications Standards Institute*) paslaugų kokybė *QoS* (angl. *Quality of Service – QoS*) – apibūdinama, kaip vartotojo pasitenkinimas gauta paslauga (3GPP *QoS*, 2002). Jei vartotojas ilgai negauna paslaugos iš tinklo arba jei jos kokybė yra prasta, tuomet kyla vartotojų nepasitenkinimas, o tinklo veiklos rodikliai blogėja. *QoS* užtikrinimas ir tinklo *KPI* (angl. *Key Performance Indicator – KPI*) stabilus palaikymas yra pagrindinė tinklo inžinierių užduotis. Prižiūrint šiuolaikines telekomunikacijų sistemas siekiama užtikrinti optimalų tinklo ląstelių apkrovos ir teikiamų paslaugų *QoS* santykį. Tinkamas srauto balansavimo priemonių panaudojimas ryšio sistemoje leidžia tai pasiekti. Ryšio sistemoje dalyvaujančių vartotojų generuojami srautai paskirstomi tarp tinklo ląstelių ir technologijų, taip subalansuojant sistemos apkrovą.

Srautas koriniame ryšio tinkle klasifikuojamas į tris stambias klases: signalizacijos, balso ir duomenų. Balso ir duomenų srautai yra laikomi vartotojų informacija, o signalizacijos srautas skirtas techniniai informacijai perduoti, sujungimams sudaryti bei palaikyti. Signalizacijos srautų balansavimui tinkle taip pat taikomos įvairios metodikos, tačiau principai ir būdai skiriasi nuo vartotojų informacijos srauto valdymo. Disertacijoje nagrinėjami tik vartotojų balso ir duomenų srautų balansavimo klausimai. Vartotojų srauto valdymas vykdomas dviem būdais: pagal paslaugos nešlio tipą *RAB* (angl. *Radio Access Bearer – RAB*) arba suteikiant aukštesnį prioritetą.

*RAB* mobiliajame tinkle apibrėžia paslaugos srauto tipą. Pagal paslaugos tipą skiriamos keturios pagrindinės grupės: pokalbių, interaktyvioji, transliacijų ir foninė. Paskutiniai trys priklauso duomenų perdavimo paslaugoms, o juos skiria reikalavimai vėlinimui. Srauto balansavimo pagal paslaugos tipą ypatybė – galima tiksliai apibrėžti kaip konkretaus paslaugos tipo srautas turi būti balansuojamas ryšio sistemoje. Šiuo srauto balansavimo atveju vartotojai heterogeniniame tinkle paskirstomi skirtingose tinklo ląstelėse ir technologijose. Yra atvejų, kai vartotojų srautas yra nukreipiamas į kito operatoriaus tinklą (Choi *et al.* 2013).

*QoS* srauto balansavimo atveju tinkle, prioretizuojamas vartotojo, paslaugos ar terminalo informacijos srautas tarp kitų vartotojų ar paslaugų. Tinklo išteklių priskyrimo įranga bazinėse stotyse vartotojams ir paslaugoms su aukštesniu *QoS* prioritetu dažniau išskiria duomenų siuntimo langą. *QoS* srauto balansavimas atliekamas tos pačios tinklo ląstelės ir technologijos viduje.

Augant prisijungusių prie tinklo aktyvių vartotojų skaičiui, srautų balansavimas mobiliojo ryšio sistemose yra tiesiog neišvengiamas. Jis yra būtinas kiekvie-

nai heterogeninio ryšio sistemai. Daugelyje jų, jau taikomos įvairios srauto valdymo priemonės, tačiau jų spektras vis plečiamas. Skirtingos priemonės pasitelkiamos balso ir duomenų srautų balansavimui, siekiant efektyvaus tinklo išteklių išnaudojimo. Tai lemia, kad korinio ryšio srautų balansavimas yra svarbi šiuolaikinių telekomunikacijų sistemų dalis. Jų analizei ir taikymui skiriamas didelis dėmesys.

## 1.2. Vartotojų sukuriamo srauto balansavimo poreikis

Informacinių technologijų raida daro didelę įtaką žmonių gyvenimui. Korinio ryšio sistemų plėtra ir ja teikiamų paslaugų pažanga, taip pat ne išimtis. Šis progresas sąlygoja, kad vartotojų priklausomybė nuo mobiliojo ryšio technologijų auga, o paslaugų naudojimo įpročiai kinta. Šiuolaikinių heterogeninių korinio ryšio tinklų aprėptis viršija 90 % populiacijos padengimo *GSM* atveju, 65 % *UMTS* ir 40 % *LTE* atvejais. Tikimasi, kad 2021-aisiais metais tinklų aprėptis atitinkamai sieks 95 %, 90 % ir 75 % populiacijos (GSMA, 2016). Suteikta mobilumo laisvė lemia, kad korinio ryšio sistemos tampa vis reikšmingesnės. Plačiai išvystyta mobiliojo ryšio tinklų sistema užtikrina vartotojų pasiekiamumą ir efektyvią prieigą praktiškai iš bet kur. Nuotolinis darbas, studijos, nutolusių įrenginių stebėjimas, tai tik dalis sričių, kuriose šiandien būtų sunku apsieiti be mobiliojo ryšio technologijų. Išmaniųjų įrenginių karta atvėrė plačias galimybes naujoms koriniu ryšio tinklu teikiamoms paslaugoms. Realus laiko žaidimai, virtualios realybės, e-sveikatos paslaugos yra neatsiejama šiandienos telekomunikacinių paslaugų dalis. Daiktų interneto technologijos taip pat yra glaudžiai susietos su korinio ryšio sistemomis. *M2M* (angl. *Machine to Machine*) sprendimų tolimesnei plėtrai prognozuojama šviesi ateitis ir laukiama kasmetinio 25 % augimo. Po penkerių metų tikimasi, jog *IoT* (angl. *Internet of Things*) įrenginių skaičius bus bene keturis kartus didesnis nei šiuo metu. Aptartieji veiksniai lėmė, kad aktyvių mobiliojo ryšio vartotojų skaičius šiuo metu siekia 7,3 milijardo vartotojų. Balso srautas korinėse sistemose toliau neauga ir išlieka stabilus, tačiau duomenų perdavimas poreikis kasmet didėja apie 60 %. Prie to prisideda ne tik technologinė pažanga, tačiau ir kintantys mobiliojo ryšio vartotojų įpročiai bei elgsena susijusi su paslaugų vartojimu (Naboulsi *et al.* 2015, Xu *et al.* 2016).

Ribotas fiksuoto interneto prieigos paplitimas sąlygoja, kad mobilus interneto prieiga tampa vienintele plačiajuostės prieigos alternatyva. Tikėtina, kad apie 90 % viso siunčiamo interneto srauto bus perduota heterogeninėmis ryšio sistemomis. Spėjama, kad vyraujantis duomenų srautas bus sudarytas iš vaizdo medžiagos, kuri yra pagrindinis perduodamo duomenų srauto augimo šaltinis (Westphal *et al.* 2016).

Šiandienos telekomunikacijų paslaugų vartotojų grupė yra sudaryta iš įvairaus amžiaus ir skirtingų poreikių klientų. Tyrimų duomenimis išsivysčiusiose vakarų pasaulio šalyse išmaniuosius mobilius telefonus naudoja beveik kiekvienas, o apie 50 % vartotojų turi daugiau nei vieną mobilų įrenginį. Remiantis statistikos duomenimis naujų prisijungimų prie korinio ryšio sistemų skaičius auga 5 % naujų abonentų kasmet (Radicati, 2016). Daugiausiai išmanieji mobilūs telefonai naudojami naujienu sekimui, bendravimui socialiniais tinklais, vaizdo medžiagos peržiūrai. Laikas praleistas prie išmaniųjų telefonų lyginant dabar ir keletą metų atgal pasikeitė gana stipriai. Mobilieji telefonai tapo pagrindine informacijos paieškos priemone. Daugiau nei puse vartotojų išmanųjį įrenginį per visą dieną tikrina, naršo daugiau nei penkiasdešimt kartų. Tinklų veiklos rodikliai rodo, kad vartotojui atsinaujinus išmanųjį įrenginį vartotojo duomenų sunaudojimas išauga nuo 20 iki 45 % (Ma *et al.* 2015).

Akivaizdu, kad stebimi pokyčiai yra glaudžiai susiję su pasikeitusiomis žmonių gyvenimo tendencijomis, kurios įtakoja srauto balansą tinkle. Kintant poreikiams, reikalinga ryšio sistemas pritaikyti pagal naujus reikalavimus, kad jos ir toliau galėtų sėkmingai veikti ir atitikti vartotojų lūkesčius. Fiziškai ir finansiškai užtikrinti neišsenkančius tinklo ląstelių išteklius yra sunku, todėl pasitelkiant srauto balansavimą siekiama efektyviai išnaudoti esamus išteklius. Kad toks kelias svarbus ir reikalingas įrodo kitų tyrėjų atliekami tyrimai (Ye *et al.* 2013, Aldabbagh *et al.* 2015, Chardy *et al.* 2016). Srauto balansavimas jų darbuose vykdomas skirtingomis priemonėmis, tačiau siekiama kiek įmanoma efektyvesnio išteklių panaudojimo. Autoriai sprendžia srauto balansavimo uždavinius, bandydami taupyti energijos suvartojimą koriniame tinkle. Analizuojami srauto paskirstymo būdai į nelicencijuoto dažnio ruožus. Didelės dalies tyrimų esmė yra efektyvesnio srauto paskirstymo būdų paieška. Tinklo vartotojų įpročių vertinimas ir poreikių supratimas, taip pat reikšmingai prisideda prie tinkamiausių *MLB* metodų pritaikymo (Mahajan *et al.* 2016).

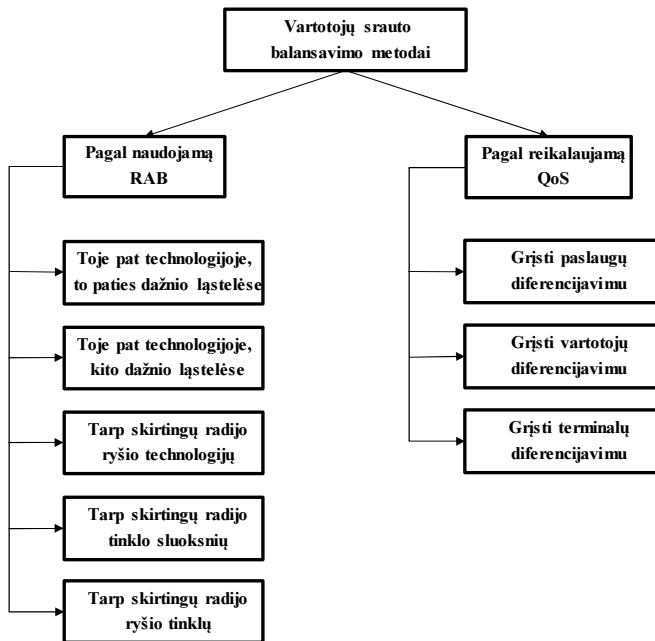
Toliau aptarsime metodus, kurie naudojami vartotojų sukurtų srautų balansavimui heterogeninėse ryšio sistemose.

### 1.3. Vartotojų srauto balansavimo metodai

Vartotojų srauto balansavimas nėra įprastinė heterogeninės ryšio sistemos funkcija. Srauto paskirstymo tinkle strategija yra individualus sprendimas, dažniausiai priklausantis nuo tinklo operatoriaus požiūrio, turimos infrastruktūros ir vartotojų srauto valdymo taktikos. Ilgą laiką joks 3GPP standartas nenustatė, kaip srauto balansavimas turėtų būti vykdomas heterogeninėse korinio ryšio sistemose. Kuriami ir taikomi srauto balansavimo metodai tarp skirtingų tinklo ląstelių buvo tinklo įrangos gamintojų rankose. Pradedant 8-os laidos 3GPP

standartu *MLB* funkcionalumas, kaip sudėtinė savaiminė optimizacija *SON* grįstų tinklų dalis, buvo įtrauktas į inžinerinius dokumentus. Tai buvo momentas žymintis vartotojų srauto balansavimo heterogeninėje tinklo struktūroje oficialią pradžią 2009-aisiais.

Ilgainiui savaiminės optimizacijos savybių sąrašas buvo plečiamas pridėdant naują funkcionalumą, taip palengvinant korinių tinklų priežiūrą. *MLB* tapus *SON* dalimi srautų balansavimas taip pat tapo labiau struktūrizuotas. Atsižvelgiant į ankstesnes srautų balansavimo strategijas bei metodus, taikomus *SON* aplinkoje, vartotojų balso ir duomenų srauto balansavimo metodai gali būti suklasifikuoti. 1.1 paveiksle pateikta *MLB* metodų klasifikacija.



**1.1 pav.** Srauto balansavimo metodų klasifikavimas  
**Fig. 1.1.** Classification of load balancing methods

Vartotojų balso ir duomenų balansavimui heterogeninėje korinio ryšio sistemoje pagal nešlio tipą galimi penki būdai.

Toje pat technologijoje ir to paties dažnio ląstelėse bei į kito dažnio ląsteles srauto balansavimo metodai pagal *RAB* vadinami atliekamais ryšio technologijos viduje. Šių srauto balansavimo strategijų skirtumas toks, kad vienu atveju vartotojų srautas nukreipiamas į tinklo ląsteles veikiančias tuo pačiu dažniu. Kitu atveju vartotojas yra perkeliamas į kito dažnio ląstelę. Tinkamiausias pavyzdys

būtų, ryšio vartotojų srauto nukreipimas iš 3G 2100 MHz dažnių juostos ruože veikiančios ląstelės į 900 MHz ruože veikiančią ląstelę. Šie srauto valdymo būdai yra efektyvi ir tinkama priemonė srauto balansavimui koriniuose ryšio sistemose, kai duomenų ar balsų srautą siekiama paskirstyti toje pačioje technologijoje tarp skirtingų nešlių.

Panašiu principu veikia srauto balansavimas tarp skirtingų tinklo sluoksnių. Jo metu vartotojas prisiregistravęs makro tinklo ląstelėje didelės apkrovos momentais yra nukreipiamas į mikro, piko ar femto tipo tinklo ląsteles, kurios ryšio sistemoje sudaro atskirą sluoksnį. Dažnu atveju, jei vartotojo buvimo zonoje yra pasiekiamas mažo tipo ląstelė, vartotojas nedelsiant perkeliamas į ją, tokiu būdu nukraunamas makro tinklas ir išsaugomi ištekliai. Šis metodas leidžia vartotojus perkelti į mažas tinklo ląsteles palaikančias tą pačią ryšio technologiją arba kitą, todėl tai yra tarpinis variantas tarp srauto balansavimo metodų technologijos viduje ir tarp sisteminių. Šis metodas leidžia stipriai padidinti bendrą korinio ryšio tinklo talpą, tačiau reikalauja papildomų investicijų diegiant naujas ląsteles.

Balansavimo tarp skirtingų radijo ryšio technologijų ir tarp skirtingų tinklo sluoksnių metodai vadinami tarp sisteminiiais. Tarp sisteminio srauto balansavimo metu vartotojai iš dabartinės ryšio perdavimo technologijos yra nukreipiami į kitos technologijos tinklo ląsteles. Tarp sisteminių srauto balansavimo metodų privalumas yra tai, kad srautas gali būti balansuojamas visoje heterogeninėje ryšio sistemoje, išnaudojant visus turimus išteklius. Tai itin efektyvu, kai vartotojai prisiregistravę aukštesnėse ryšio technologijose yra nukreipiami į žemesnes ryšio technologijas. Tokio srauto balansavimo esmė yra vartotojų srauto nukreipimas pagal paslaugų poreikį. Tai yra, jeigu vartotojas yra prisiregistravęs aukštesnėje ryšio technologijoje, tačiau jo pageidaujamos paslaugoms gauti pakanka žemesnės technologijos pajėgumo, tuomet toks vartotojas gali būti perkeltas. Korinio ryšio operatorių tinkluose, kurie yra sudaryti iš *GSM*, *UMTS* bei *LTE* ryšio technologijų toks vartotojų srauto balansavimas leidžia gerokai palengvinti vienu ryšio technologijų apkrovą, kartu efektyviai išnaudojant talpą kitose. Tarp sisteminio srauto balansavimo būdas yra laikomas vienu efektyviausių atliekant srauto balansavimą koriniame tinkle.

Kai kada tinklų operatoriai pasirenka plėtoti tik vienos ar kelių mobilios ryšio perdavimo technologijų tinklus. Tokiais atvejais tarp kelių šalies operatorių sudaromos tarptinklinio ryšio sutartys, kurios leidžia vartotojams judėti tarp skirtingų operatorių. Vartotojai iš operatoriaus A tinklo, kuris palaiko tik *LTE* ryšio technologiją yra perkelti į operatoriaus B *UMTS* tinklą. Vartotojų atžvilgiu užtikrinamos tęstinės paslaugos, o operatoriams gerokai sumažėja tinklų plėtos kaštai. Toks sprendimas veikia ir kaip gera tarp sisteminė vartotojų balsų ir duomenų srauto paskirstymo priemonė. Visgi, šis srauto balansavimo būdas pritaikomas tik išskirtiniais atvejais ir ne visada gali užtikrinti gerą paslaugų kokybę, dėl padidėjusio vartotojų skaičiaus.

Verta paminėti, kad pagal paslaugos tipą vykdomas srauto balansavimas atliekamas remiantis matavimais grįstu perjungimu arba aklu perjungimu. Matavimais grįsto perjungimo metu įrangai liepiama išmatuoti ląstelės kandidatės ryšio sąlygas prieš perjungimo vykdymą. Jei sąlygos yra palankios, srauto balansavimo algoritmas liepia įrenginiui atlikti persijungimą. Tuo tarpu aklo perjungimo metu vartotojas iš dabartinės tinklo ląstelės, be papildomų ryšio sąlygų įvertinimo yra akiai nukreipiamas į iš anksto nurodytą ląstelę kandidatę (Wen, 2016).

Ne visi vartotojai ir jų sukuriamas balso bei duomenų srautas korinio ryšio sistemoje gali būti perkeltas į kitas tinklo ląsteles ar technologijas. Tam priežasčių yra gana daug: aprėpties zona, tinklo talpa, daugialypės vienu metu teikiamos paslaugos (angl. *MRAB – Multi RAB*), mobiliųjų įrenginių nustatymai ir pan. Dėl to tinklo ląstelėse susidarius sangrūdams ir susidūrus su išteklių trūkumu tenka imtis kitų priemonių. *QoS* klasifikavimu pagrįstas srauto valdymas leidžia tinkle prioritetizuoti norimą srautą. Klasifikavimas vykdomas pagal paslaugos rūšį, vartotoją ar terminalą. Kai tinklo ląstelėje ima trūkti išteklių aukštesnio prioriteto paslaugų, vartotojų ar terminalų perduodamam srautui yra skiriami papildomi ląstelės ištekliai, lyginant su žemesnio prioriteto paslaugomis ir vartotojais. Taip ryšio sistemoje užtikrinama prioritetinio srauto pirmenybė didelės apkrovos momentais. *QoS* prioretizavimo nauda pasireiškia ir tuo, jog tinklų operatoriai įgauna galimybę prioretizuoti skirtingai apmokestintus vartotojų duomenis. Tokiu būdu pirmiau yra perduodamas srautas vartotojų, kurie operatoriui yra ekonomiškai naudingesni. Tarpusavyje vartotojai yra skirstomi į turinčius auksinį, sidabrinį ir varinį profilius (Sarraf *et al.* 2013). *QoS* srauto balansavimas klasifikuojant paslaugas ar vartotojus yra vienintelė tinkama priemonė srautui valdyti, kai galimybės jo perkelti į kitas ląsteles nėra.

Aptartos srautų balansavimo priemonės yra nelygiavertiškai taikomos korinio ryšio tinkluose. Srauto balansavimas pagal paslaugos nešlio tipą yra naudojamos dažniau, tačiau ne visos jo rūšys vienodai. Srauto balansavimas toje pačioje ryšio technologijoje, skirtingose arba to paties dažnio ląstelėse yra sutinkami dažniausiai. Balansavimas tarp skirtingų operatorių tinklų yra sąlyginai naujas ir tinkamas tik specifiniais atvejais, kuomet ryšio operatorius vysto ne visų technologijų ryšio tinklus. Vartotojų srauto paskirstymas tarp skirtingų radijo tinklo sluoksnių taip pat yra ganėtinai nesenas ir sparčiai plinta HetNet tipo tinklų struktūrose. Didelis dėmesys nebuvo skiriamas ir srauto balansavimui tarp skirtingų ryšio technologijų makro tinklo lygmenyje. Pastaruoju metu šis metodas įgauna vis didesnę svarbą, kalbant apie balso vartotojų nukreipimą į *GSM* standarto tinklus. To prireikė stipriai išaugus vartotojų perduodamo duomenų srauto kiekiui *UMTS* tinkle. Duomenų kiekis sąlygojo ir pagal *QoS* prioretizuojamo srauto metodų įtraukimą į ryšio sistemas. Natūralu, kad žinios apie rečiau taikytas srauto balansavimo priemones yra menkesnės. Scenarijai, kuriuose jie būtų efektyvūs buvo reti. Ypatingai, kai kalbama apie jų veikimą realiomis sąlygomis su realiu

vartotojų srautu. Stipriai pasikeitus situacijai heterogeninio ryšio tinkluose, scenarijai, kai tinklo ląstelėse įvyksta sangrūdos pasitaiko vis dažniau. Metodai, kurie anksčiau buvo aptariami tik teoriškai, šiandien yra taikomi dirbant su komercinėmis ryšio sistemomis. Daugeliu atveju gaunami rezultatai yra nauji telekomunikacijų srautų balansavimo srityje.

Toliau disertacija analizuoja tarpsteminis balso srauto balansavimo metodus ir su jais susijusius tyrimus. Duomenų srauto balansavimo atveju nagrinėjama *HetNet* struktūros tinklo nauda, taikant vartotojų srauto perkėlimą tarp skirtingų radijo tinklo sluoksnių. Dėmesys skiriamas duomenų srauto prioretizavimui pasikirstant vartotojų srautą tinklo ląstelėje, pagal *QoS* prioritetus. Srauto balansavimo metodai pagal *RAB*, kurie yra vykdomi ryšio technologijos viduje nėra šios disertacijos tikslas. Tokie srauto valdymo metodai literatūroje yra aptarti gana išsamiai. Srauto balansavimas tarp skirtingų operatorių tinklų šiame darbe taip pat nenagrinėjamas, nes jo pritaikomumas yra ribotas.

## 1.4. Vartotojų balso srauto balansavimas

Balso skambučiai yra viena kertinių telekomunikacijų tinklo paslauga. Nors balso skambučiai palaipsniui iš komutuojamų grandinėmis pereina į perduodamus paketus, vyraujantis balso srautas vis dar perduodamas *CS* (angl. *Circuit Switch*) principais. Taip balsas keliauja *GSM* ir *UMTS* ryšio sistemomis. Skambučiai pradėti *LTE* tinkle, *CSFB* (angl. *Circuit Switch Fall Back*) procedūros metu yra perduodami į pastarąsias technologijas. Net tinklų operatoriams pradėjus plėtoti *IMS* (angl. *IP Multimedia Subsystem*) platformą, kuri reikalinga *VoLTE* (angl. *Voice over LTE*) skambučiams, laiko prireiktų vartotojų įrangai pasklisti. Tikėtina, kad ir patys operatoriai bandytų balso paslaugas perkelti į *GSM* ir *UMTS* ryšio sistemas, *LTE* tinklo išteklius skiriant spartesniam duomenų perdavimui. Šios priežastys įtakoja, kad balso srauto balansavimas vykdomas tarp 2G/3G ryšio kartų.

### 1.4.1. Balso skambučių vartotojų įpročiai

Prieš vykdant balso srauto balansavimą pravartu suprasti kur ir kaip yra tikslinga tai daryti. Siekiant tinkamai įvertinti balso srauto pasiskirstymą korinio ryšio tinkluose analizuojamas ne tik vartotojų sukuriamo balso srauto pobūdis, tačiau ir pačių vartotojų elgsena. Balso srauto pasiskirstymą tinkle lemia daugelis faktorių: metų laikai, paros laikas, šventiniai periodai ir panašūs veiksniai (Kang *et al.* 2012). Tuo tarpu vartotojų elgsena ir įpročiai atliekant balso skambučius yra priklausomi nuo socialinio ryšio tarp pašnekovų, amžiaus (Dong *et al.* 2013). Kaip balso srautas tinkle yra priklausomas nuo šventinių periodų, atostogų yra žinoma

pakankamai gerai (Gao *et al.* 2013). Sunkiau įvertinti balso srauto pasiskirstymą priklausantį nuo vartotojų elgsenos. Apskritai, balso skambučių srauto apkrova tinkle yra išreiškiama Erlangais, o skambučiui parametrizuoti dažniausiai naudojama jo trukmė (Villy 2001, Cooper *et al.* 1998, Kivi 2007). Dažni ir ilgi skambučiai tinklo ląstelėse rodo didelę balso srauto apkrovą. Vertinti vartotojų balso srauto pasiskirstymą svarbu dėl to, kad būtų nustatyta galima apkrova piko momentais. Šiuo tikslu pagal vartotojų balso skambučių aktyvumo parametrus vertinami su tuo susiję rodikliai: *BHCA* (angl. *Busy Hour Call Attempt*), skambučio perjungimų proporcija, trukmė, vartotojui tenkantis skambučių skaičius ir srautas per laiką.

Darbai susiję su balso skambučių vartotojų tyrimais įprastai nagrinėja pavienių vartotojų balso skambučių srautų pasiskirstymą. Į vartotojų balso skambučių trukmę žiūrima per socialinius ryšius tarp vartotojų (Center for strategic and international studies, 2012). Sąryšio tarp vartotojų balso skambučių trukmių ieškoma analizuojant vartotojus pagal socialinį statusą, lytį (Laxmi *et al.* 2012). Autoriai identifikuoja, kad kuo artimesni ryšiai jungia žmones tuo trumpesni būna jų skambučiai tarpusavyje. Taip pat atlikti tyrimai teigia, kad moterų atliktų skambučių trukmė yra ilgesnė nei vyrų. Ilgesnė skambučio trukmė būdinga ir jaunimo tarpe. Šių tyrimų rezultatai suteikia vertingų žinių apie žmonių savitarpio bendravimo įpročius, bendravimui pasitelkiant balso skambučius korinėmis ryšio sistemomis. Dažnai, praktiškai neįmanoma nustatyti kokio tipo vartotojai gali susiburti tam tikrose vietose, todėl nagrinėti vartotojų balso srauto apkrovą remiantis tik socialiniais ryšiais, amžiumi ar lytimi yra rizikinga. Geriau balso srauto pasiskirstymą heterogeninėse korinio ryšio sistemose gali atspindėti vartotojų balso srauto pasiskirstymas pagal vartotojo buvimo vietą. Tyrimų nagrinėjančių balso srauto pasiskirstymą nuo skambučio vietos beveik nėra. Keletas autorių abstrakčiai teigia, kad teritorijos turinčios didesnę gyventojų tankį nebūtinai pasižymi didesniu skambučių kiekiu (Loibl *et al.* 2012). Balso srauto apkrovos intensyvumo laike analizė rodo, kad pikiniai apkrovos momentai irgi yra skirtingi. Teritoriniu požiūriu intensyvesni skambučių srautai kaimiško tipo vietovėse fiksuojami anksti ryte, o miestų teritorijose darbo dienos metu ir vakare. Tai rodo, jog sangrūdos tinklo elementuose gali atsirasti nepriklausomai. Gauti skambučių trukmių duomenys aproksimuojami matematinėmis funkcijomis, siekiant įvertinti jų pasiskirstymo charakteristikas (Ranjan *et al.* 2012, Becker *et al.* 2013). Tam dažniausiai pasitelkiami log-normalūs, Erlango, eksponentinis skirstiniai. Naudojamos skirstinių aproksimacijos gerai atspindi aproksimuojamo skirstinio antrąją dalį, tačiau praktiškai visiškai netinka pirmajai. Todėl kuriami nauji balso skambučių aproksimavimo skirstiniai, kurie individualių vartotojų skambučių skirstinius aproksimuoja geriau, nei bet kuris kitas gerai žinomas skirstinys (De Melo *et al.* 2010). Balso skambučių vartotojų įpročių nulemtas balso srauto pasiskirstymas leidžia žymiai



paprasciau nustatyti tinklo talpos poreikius bei prognozuoti vartotojų įtaką korinėms sistemoms.

Analizuojami pavienių balso vartotojų skambučių trukmių skirstiniai dažnu atveju neleidžia daryti tikslių išvadų apie tikėtiną didelės vartotojų grupės apkrovą korinėms ryšio sistemoms. Dėl šios priežasties šiame darbe atliktas tyrimas, kuris analizuoja skirtingų vartotojų grupių, sudarytų iš nuolatinių balso skambučių vartotojų skambučių trukmių pasiskirstymą, pagal vartotojo buvimo vietą. Balso vartotojų įpročiai skirtingose vietose pagal skambučio trukmę skiriasi. Tai gali būti geras atspirties taškas nustatant vietas, kuriose galima didelė balso srauto apkrova ir balso skambučių balansavimas yra tikslingas.

### 1.4.2. Balso skambučių balansavimo algoritmai

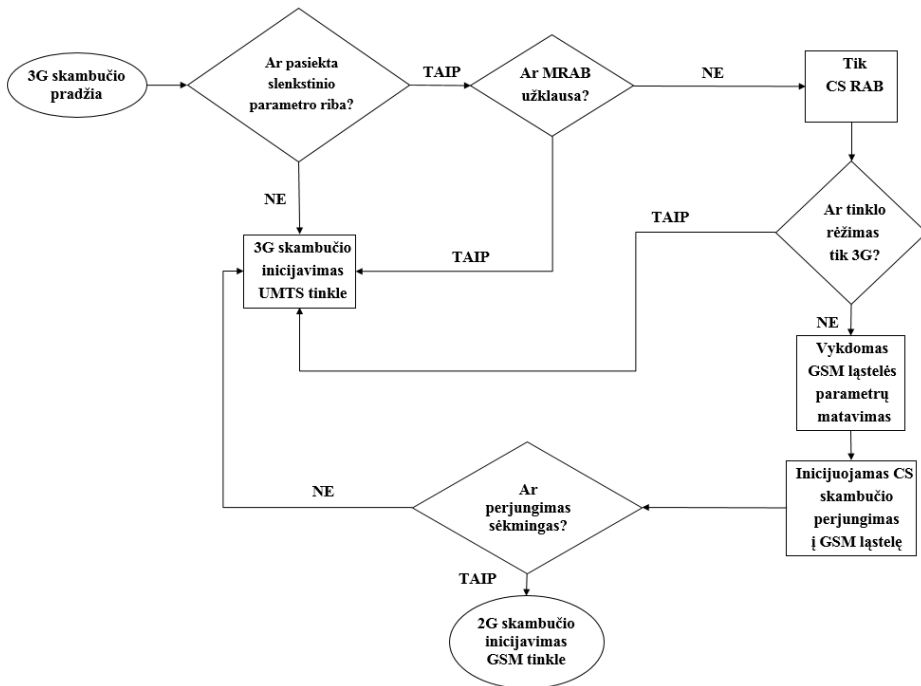
Apie įvairius balso srauto balansavimo būdus korinio ryšio tinklo ląstelėse galvojama jau seniai. Pirmieji srauto paskirstymo principai gerokai skyrėsi nuo taikomų šiandien. Pagrindinis ribojimas buvo homogeniškos tinklų sistemos, kurios veikė tik vienos technologijos ribose. Plečiant ryšio sistemos talpą buvo didinamas vartotojų skaičius laikiniame balso perdavimo kanale (Keshavachar, 2003). Dėl to vartotojams buvo skiriami mažesnės spartos balso kodekai, taikomos daugelio vartotojų srauto perdavimo viename kanale technologijos. Visa tai, lėmė prastesnę balso paslaugų kokybę. Tobulesni sprendimai rėmėsi perjungimų slenksčių į gretimas tinklo ląsteles korekcijomis, priklausomai nuo esamos apkrovos (Tolli *et al.* 2003). Adaptyvi tinklo parametrų optimizacija, antenų palenkimas leido sumažinti vartotojų blokavimo tikimybę apkrovos momentais (Sudhindra *et al.* 2014). Panašius klausimus sprendžiantys tyrimai analizuoja ir kitus alternatyvius srauto paskirstymo metodus. Siūloma vartotojus informuoti apie didelę tinklo ląstelių apkrovą remiantis transliacijų žinutėmis. Vartotojams yra rekomenduojami būdai leisiantys sėkmingai gauti paslaugas iš tinklo perkrovos metu. Metodas veikia informacinių pranešimų pagalba, o vartotojams esantiems didelės tinklo apkrovos zonose rekomenduoja keisti vietą, laukti arba pasirinkti kitą būdą informacijai perduoti. Rezultatai rodo, kad vietos keitimas ar laukimas korinio tinklo apkrovą sumažina nežymiai, tačiau informacijos perdavimas SMS žinute, ženkliai sumažina paslaugos blokavimo tikimybę (Shinagawa *et al.* 2009).

Situacija stipriai ėmė keistis iš homogenišκών ryšio tinklų žengus link heterogeninių. Vystantis trečios kartos korinėms ryšio technologijoms palaiapsniui vartotojų skaičius jose didėjo. Atitinkamai antros kartos ryšio perdavimo tinklų apkrova nebeaugo. *GSM* standartu veikiantis radijo tinklas tapo dideliu išteklių šaltiniu tinkamu balso srautui perduoti. Tuo labiau, kad *GSM* tinklas nėra pritaikytas didelės spartos duomenų perdavimui. Stipriai padidėjęs duomenų srautui siunčiamam 3G tinklu iškilo tarpsteminio balso srauto balansavimo poreikis. Balso

skambučių vartotojų paskirstymas tarp *GSM* ir *UMTS* tinklų leidžia pasiekti abipusį efektyvų išteklių panaudojimą. Didžiausias efektas pasiekiamas srauto balansavimą vykdant didelės apkrovos tinklo ląstelėse, kurios veikia miestų centruose, masinių renginių vietose. Tarp sisteminiams srauto balansavimo algoritmams būdingas aklo arba matavimais grįsto balso skambučių perjungimas į *GSM* tinklą (Pischella, 2007). Perjungimas inicijuojamas, kai *UMTS* tinklo valdiklis nustato, kad vartotojui reikalingas tik paslaugos nešlys skirtas balsui perduoti. Tuomet *Uu* vartotojo sąsaja, *RRC* (angl. *Radio Resource Control*) protokolu vartotojui siunčiami konfigūracijos keitimo pranešimai, kuriuose nurodoma persijungti į *GSM* tinklo ląstelę. Tarp sisteminis vartotojo balso skambučio perjungimas iš 3G technologijos negalimas, jei vartotojas naudojami sudėtinį paslaugos nešliu. Sėkmingai atlikus vartotojo perjungimą į 2G tinklą vartotojui skubaus priskyrimo procedūros (angl. *Immediate Assignment*) metu išskiriamas transportinis balso kanalas. Toliau balso skambutis tęsiamas *GSM* tinkle, o sujungimai su *UMTS* tinklu vartotojui nutraukiami. Aklo ir matavimais grįsto balso srauto balansavimo algoritmai aptariami toliau.

### 1.4.3. Apkrova grįstas balso srauto balansavimo metodas

Apkrova grįstas, *LBHO* (angl. *Load Based Handover*) balso srauto balansavimo metodas priklauso matavimais grįstų balso skambučių nukreipimo į *GSM* ryšio sistemą metodų grupei. Metodo esmė remiasi balso skambučių perjungimu, paremtu sesijos perdavimo procedūra, jos nenutraukiant. Perjungimas atliekamas priverstinai *UMTS* tinklo ląstelėje viršijus apkrovos slenkstinę ribą. *LBHO* atveju slenkstine riba yra laikoma žemynkrypčio nešlio galios, kodų medžio, kanalo elementų ar *Iub* sąsajos apkrovos viršijimas. Algoritmas inicijuoja balso vartotojų perkėlimą į *GSM* technologiją priklausomai nuo aukštynkryptės ar žemynkryptės interferencijos lygio. Viršijus vieną iš slenkstinių ribų 3G tinkle atliekama *RRC* konfigūracijos keitimo procedūra su indikacija balso skambutį perduoti į 2G tinklą. Aktyvuotas srauto valdymo algoritmas vienu metu gali perkelti net keletą balso vartotojų. Tuo metu 3G tinklo ląstelė gali priimti naujas sesijų užklausas. Pagrindinis sėkmingo *LBHO* veikimo reikalavimas yra tai, kad ląstelė į kurią atliekamas skambučio perjungimas visiškai persidengtų su ląstele iš kurios skambutis atkeliauja. Priešingu atveju perjungimas gali būti nesėkmingas, nes nebūs aptikta ląstelė į kurią nurodyta persijungti. *UMTS* tinklo ląstelėje peržengus slenkstinę *MLB* ribą *UE* kryptimi išsiunčiamas pranešimas su 3A įvykio žyme, kuris žymi tai, kad kaimyninės ląstelės signalo lygis yra stipresnis. Tuomet terminalas atlieka nurodytos ląstelės parametrų matavimą ir gavęs sutikimą iš *GSM* sistemos perjungia skambutį. Struktūrinė *LBHO* algoritmo veikimo schema pateikta 1.2 paveiksle.



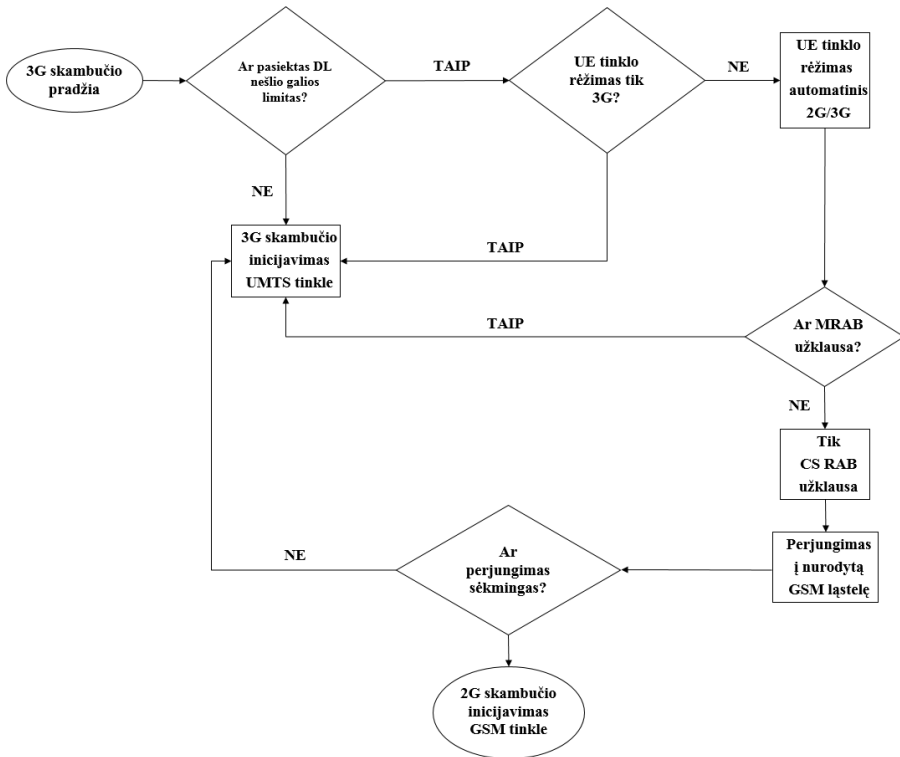
1.2 pav. Struktūrinė apkrova grįšto balansavimo algoritmo schema  
 Fig. 1.2. Structural scheme of load based balancing algorithm

*LBHO* algoritmo privalumas yra tai, kad perkeliamų balso skambučių skaičius ir tankis gali būti nustatomi atskirai, o tai suteikia galimybę balso srautą perskirstyti staiga nepadidinant *GSM* tinklo apkrovos ir nepabloginant balso kokybės. *LBHO* balansavimui svarbu, kad *GSM* ryšio sistema aktyvios sesijos metu negalėtų skambučio perjungti į *UMTS* ryšio tinklą. Įprastai, abipusiai persijungimai tinkle skambučio metu nėra naudojami. Pateiktas algoritmas rodo, kad balso srauto balansavimas draudžiamas atvejais, kai *UE* yra tik 3G režime arba naudoja sudėtinę paslaugos nešlį. Pagalbos skambučio atveju algoritmas tokio skambučio perjungti į *GSM* sistemą nebandys (Alsenmyr, 2003).

#### 1.4.4. Tiesioginio balso srauto nukreipimo balansavimo metodas

Tiesioginio balso srauto nukreipimo (angl. *Direct Retry*) metodas veikia panašiu principu kaip ir *LBHO*, tačiau skambučio perjungimas atliekamas akiai. Skambučio perjungimo kriterijumi laikomas žemynkryptės nešlio galios limitų viršijimas.

Pavyzdžiui, jei maksimali nešlio galia siekia 46 dBm (40 W), o pasirinktas galios limitas yra 75 %. Tuomet nustačius 80 % leistiną galios limitą viršijimą algoritmas balso skambučių vartotojus nukreips į *GSM* ląsteles, kai žemynkryptė galia pasieks 24 W ribą. Skirtingai nei *LBHO* atveju, balso skambutis tiesioginio nukreipimo metu yra perjungiamas į iš anksto numatytą *GSM* tinklo ląstelę. Pastaroji turi persidengti su *UMTS* tinklo ląstele. Algoritmo savitumas yra tai, kad *UE* neturi progos įvertinti galimų kandidačių ląstelių *GSM* tinkle. Balso skambutis perkeliamas aklo perjungimo būdu. 3G ląstelė, kurioje slenkstinė *MLB* riba buvo peržengta, į *UE* siunčia priverstinio persijungimo pranešimą su *GSM* ląstelės dažniu ir numeriu. Vykdamt aklą skambučio perjungimą, pasitaiko, kad dėl *GSM* ląstelės apkrovos skambučio perjungimas negalimas. Tada *UE* *UMTS* ląstelei praneša apie nepavykusį prisijungimą. Pastaroji leidžia vartotojui pratęsti skambutį *UMTS* tinkle, nepaisant srauto balansavimo algoritmo. Tiesioginio nukreipimo balso skambučių srauto valdymo algoritmą iliustruoja tolimesnė schema 1.3 paveiksle.



1.3 pav. Struktūrinė tiesioginio nukreipimo algoritmo schema

Fig. 1.3. Structural scheme of direct retry

*UMTS* skambučių srauto balansavimas į *GSM* ryšio sistemos ląsteles tiesioginio nukreipimo algoritmo atveju negalimas dėl tų pačių priežasčių, kaip ir *LBHO* atveju. Šio srauto balansavimo metodo suveikimo metu, balso skambučio perjungimas įvyksta greičiau, nes išvengiama papildomų matavimų. Nesėkmingo perjungimo atveju signalizacijos srautas dar labiau išauga dėl būtino sugrįžimo į pradinę ląstelę. Signalizacijos pranešimų srauto padidėjimas yra neišvengiamas bet kurio *MLB* algoritmo taikyme. Balso srauto balansavimo algoritmų perkeliama vartotojų skaičius tinkluose yra didelis, nes tik balso skambučio paslaugos nešlį naudojančių *UE* pasitaiko daug. Retas vartotojas pokalbio metu naršo internete (Furtenback, 2004).

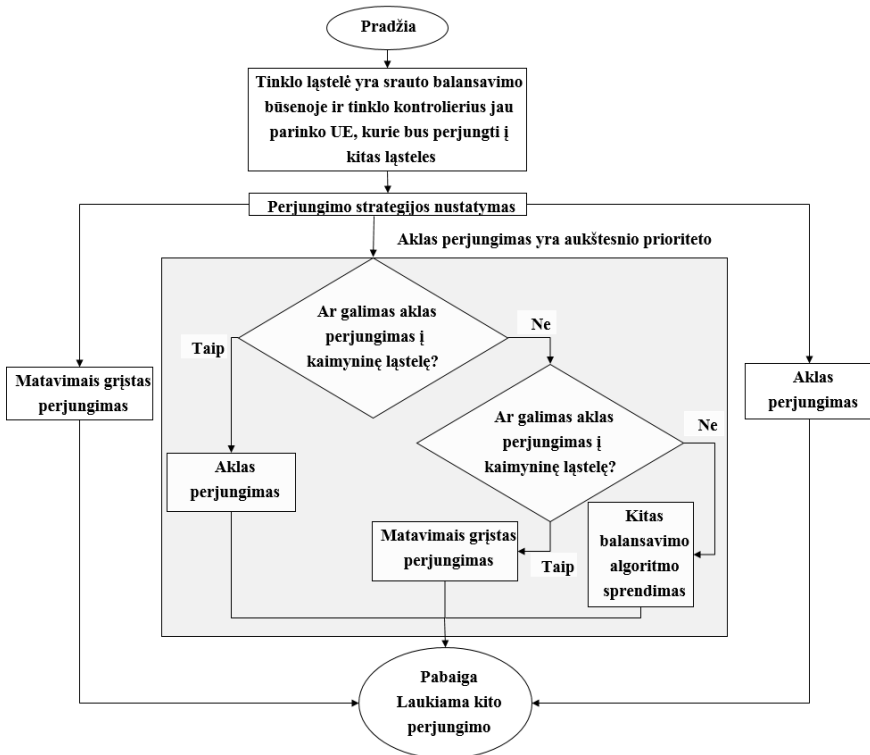
## 1.5. Vartotojų duomenų srauto balansavimas

Priešingai negu balso skambučių srauto atveju, tyrinėti vartotojų duomenų srauto pasiskirstymą priklausomai nuo vartotojų įpročių yra sudėtingiau. Taip yra, nes duomenų sesijos ne visuomet yra valdomos vartotojo ir gali vykti netgi be jo žinios. Automatinis programų atnaujinimas, elektroninių laiškų sinchronizacija yra procesai, kurie yra aktyvuojami nepriklausomai nuo korinio ryšio tinklo vartotojo buvimo vietos ar jo įsikišimo. Dėl šios priežasties, duomenų srauto pasiskirstymas korinio ryšio sistemose tampa sunkiau prognozuojamas. Ši priežastis lemia tai, kad dažnas heterogeninių korinių ryšio tinklų operatorius yra priverstas tipinius duomenų srauto balansavimo metodus diegti iš karto visame tinkle. Juo labiau, kad duomenų sesijų sukuriama apkrova tinklui yra gerokai reikšmingesnė, nei balso skambučių srauto (Zhang, 2012). Tokia specifika lemia, kad didelis duomenų sesijų srautas žymiai greičiau perpildo tinklo ląsteles nei balso pokalbiai. Todėl tradiciniai vartotojų duomenų srauto balansavimo metodai yra praktiškai neišvengiami nė vienoje korinio ryšio sistemoje.

Tipiniais laikomi ryšio technologijos viduje veikiančios *MLB* metodai, duomenų srautą paskirstantys tarp to paties arba skirtingo dažnio tinklo ląstelių. *UE* jungiantis prie tinklo ląstelės veikiančios vienu dažniu, kurios esama apkrova yra didelė, vartotojai *DRD* (angl. *Direct Retry Decision*) procedūros metu, srauto balansavimo tikslais yra nukreipiami į mažesnės apkrovos to paties ar kito dažnio nešlius. Tyrimai rodo, kad toks srauto balansavimo būdas leidžia stipriai padidinti ląstelės talpą (Sankaran, 2012). Kartu pagerinama gaunamų paslaugų kokybė tose tinklo ląstelėse, kurių apkrova yra sumažinama. Dažnu atveju ryšio technologijos viduje atliekamas srauto balansavimas remiasi didžiausios apkrovos ląstelės pilotinio kanalo *P-CPICH* (angl. *Common Pilot Channel*) perduodamos galios sumažinimu. Tokiu būdu pasiekiami, kad ląstelės pakraščiuose esantys vartotojai perjungiami į gretimas, mažiau apkrautas kaimynines ląsteles. Apkrovai tinklo ląstelėje sumažėjus, *P-CPICH* galia atstatoma. Perjungimai (angl. *SHO* – *Soft*

*Handovers*) tarp ląstelių tos pačios tinklo technologijos viduje gali būti vykdomi ir priklausomai nuo tinklo ląstelės išteklių slenksčio. Slenkstine riba įprastai laikomi aukštykrypčio ir žemynkrypčio kanalo galios ištekliai, kanalų elementai, kodų ištekliai. Duomenų srauto balansavimas pasitelkiant bazinės stoties ar tinklo ląstelės išteklių slenksčius yra naudojamas ir tuomet, kai reikalinga vartotojų duomenų srautą paskirstyti tarp skirtingų gamintojų tinklo įrangos, ar tarp atskirų radijo tinklo valdiklių. Duomenų srauto balansavimas pagal slenkstines sistemos išteklių vertes leidžia sumažinti sangrūdą tinklo ląstelėse, kurios susidaro dėl kanalo elementų, siųstuvo galios stygiaus. Vartotojų atžvilgiu paskirsčius duomenų srautą pagerėja duomenų perdavimo sparta (Gelabert, 2005).

Kaip ir balso skambučių srauto balansavimo atveju, duomenų srauto balansavimas į gretimas tinklo ląsteles vykdomas remiantis matavimais grįstų ar aklo perjungimų principais. Tipinė technologijos viduje atliekamo srauto balansavimo proceso struktūra parodyta 1.4 paveiksle.



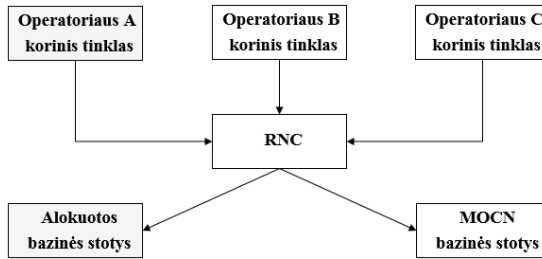
1.4 pav. Srauto balansavimo ryšio technologijos viduje schema  
Fig. 1.4. Scheme of load balancing inside the same radio technology

Kaip matyti iš 1.4 paveiksle korinės ryšio sistemos technologijos viduje atliekamam srauto balansavimui teikiamas aklo perjungimo prioritetas. Aklo perjungimo metu perjungimo procedūra gerokai sutrumpėja, o ištekliai atlaisvinami greičiau. Tačiau praktikoje laikomasi nuostatos, kad aklo perjungimo naudojimas tikslingas srauto balansavimą vykdant tarp to paties dažnio ląstelių arba tada, kai ląstelių kandidačių aprėpties zona yra panašiai lygi ląstelės aprėpties zonai iš kurios vartotojas perkeliamas. Kitais atvejais rekomenduojama taikyti matavimais paremtą vartotojų perjungimą.

Retesniais atvejais duomenų vartotojų srauto balansavimui pasitelkiamas srauto valdymo priemonės tos pačios ryšio technologijos viduje tarp skirtingų dažnių juostų (angl. *Inter-Band Load Balancing*). Toks srauto balansavimo metodas yra prasmingas tinkluose, kuriuose veikia aukšto ir žemo dažnių juostų tinklo ląstelės. Piko apkrovos akimirkomis vartotojų srautas yra nukreipiamas į aukšto dažnio ląsteles, kurios įprastai yra apkraunamos mažiau. Ne piko momentais vartotojų srautas yra balansuojamas tarp žemo dažnio tinklo ląstelių, kurių signalo lygis yra aukštesnis, o signalas triukšmas santykiškai geresnis. Taip užtikrinama galimai geriausia vartotojų paslaugų kokybė. Sisteminė heterogeninio tinklo talpa taikant tokį srautų balansavimą padidėja daugiau nei 5 % (Munoz *et al.* 2013, Tolli *et al.* 2002).

Be jau aptartų duomenų srauto balansavimo scenarijų galimi tarpsisteminiai srauto balansavimo metodai. Įprastai jie būdingi srauto balansavimą vykdant tarp *LTE* ir *UMTS* technologijų. Dažniausiai vartotojo duomenų srautas iš *LTE* tinklo yra nukreipiamas į 3G ląsteles dėl susidariusių sangrūdų. Galimas ir srauto balansavimas tarp *UMTS* bei *GSM* technologijų. Pastarasis dažniausiai naudojamas siekiant visą balso srautą perkelti į 2G sistemas, o duomenų perdavimą palikti 3G tinklui. Tokio tipo srauto balansavimo metodai remiasi radijo išteklių panaudojimo informacijos apsikeitimu tarp skirtingų ryšio technologijų. Keičiantis vidine technologijos apkrovos informacija pagerinama tarpsisteminio srauto balansavimo kokybė. Užtikrinamas aukštesnis sėkmingų tarpsisteminių perjungimų santykis bei sumažinama sangrūdų tikimybė. Rezultatai rodo, kad vartotojo lygmens naršymo duomenų perdavimo sparta tampa iki 15 % didesnė. *P2P* (angl. *Point to Point*) duomenų perdavimo metu jaučiamas net iki 90 % pagerėjimas (Giupponi *et al.* 2006, Singh *et al.* 2013).

Operatorių tinkluose, kurie vysto bendrą radijo tinklą, srauto balansavimas vykdomas dalinant laisvus tinklo valdiklio ir bazinės stoties išteklius. *MOCN* (angl. *Multi Operator Core Network*) atveju visi radijo tinklo ištekliai priklauso prie radijo tinklo prijungtiems operatoriams. Bazinės stotys tokio tipo koriniame tinkle gali būti priskirtos konkrečiam operatoriui arba naudojamos bendrai. *MOCN* srautų balansavimo metu įvykus priskirtų tinklo ląstelių ar bazinių stočių perpildymui, vartotojai gali jungtis prie bendrų tinklo ląstelių. *MOCN* tinklo struktūrinė schema pateikta 1.5 paveiksle.



1.5 pav. Daugelio operatorių tinklo struktūra  
Fig. 1.5. Structure of multi operator network

Jei *MOCN* tinkle yra specialiai operatoriui priskirtų bazinių stočių tuomet, to operatoriaus vartotojas jungsis prie jų. Kitais atvejais visi vartotojai naudoja *MOCN* bazines stotis, kurios yra bendros. *MOCN* tinklo vystymas ne tik stipriai sumažina operatoriui tenkančias tinklo diegimo išlaidas, tačiau leidžia pasiekti itin didelę radijo tinklo talpą (Salami *et al.* 2010, Costa-Perez *et al.* 2013).

Aptarti duomenų srauto balansavimo būdai priklauso pagal paslaugos tipą vykdomo srauto balansavimo grupei. Duomenų srauto balansavimo makro tinklo technologijos viduje ir tarp technologiniai metodai korinio ryšio sistemose taikomi jau kuris laikas. *MOCN* tinklams būdingas srauto balansavimas yra tinkamas tik vienos ryšio technologijos topologijos korinėms ryšio sistemoms. Duomenų srautui koriniuose tinkluose toliau augant, didėja tarp skirtingų tinklo sluoksnių ir *QoS* paremtų srauto balansavimo metodų svarba. Kaip viena iš alternatyvų makro tinklų apkrovai sumažinti naudojamos mažos tinklo ląstelės. Diegiant tokias ląsteles didelio duomenų srauto zonose sukuriama atskiras tinklo sluoksnis. Mažo tipo ir makro tinklo tipo ląstelės tarpusavyje sudaro *HetNet* korinio tinklo struktūrą. Duomenų srauto balansavimas tokioje struktūroje laikomas atliekamu tarp skirtingų tinklo sluoksnių (Jin *et al.* 2011, Hwang *et al.* 2013).

Kartais duomenų srautą nukreipti į kitas tinklo ląsteles yra tiesiog neįmanoma. Taip yra dėl keleto priežasčių. Viena iš jų, kad aplinkinių tinklo ląstelių apkrova yra tokia pat didelė. Kita, kad aplinkui nėra kitų tinklo ląstelių, kurios galėtų perimti dalį duomenų srauto. Tokiu atveju tenka verstis su esamais tinklo ištekliais. Tokio scenarijaus metu vartotojų srautas yra balansuojamas tinklo ląstelės viduje, vartotojams su skirtingais prioritetais priskiriant esamus išteklius. Išteklių paskyrimas yra atliekamas nustatant vartotojui ar paslaugai *QoS* prioritetą (Ackermann *et al.* 2011, Soldani *et al.* 2007).

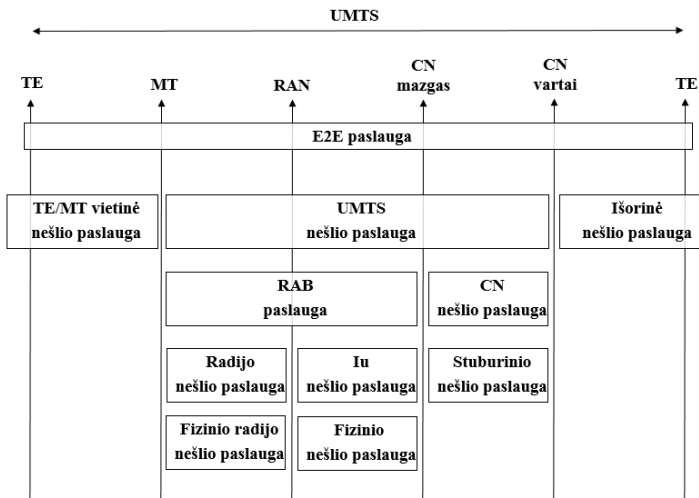
Toliau detalčiau aptarsime aspektus susijusius su srauto balansavimu vykdomu pagal skirtingus *QoS* prioritetus bei *HetNet* struktūrų įtraukimą tinklo apkrovos mažinimui.



### 1.5.1. Srauto balansavimas pagal reikalaujamą paslaugų kokybę

Vartotojų poreikiai naudojantis telekomunikacijų paslaugomis yra labai skirtingi. Niekas nekeičia, kad vartotojų turimi duomenų paketai taip pat išnaudojami skirtingoms reikmėms. Vieni daugiau dėmesio skiria bylų parsisiuntimui, vaizdo medžiagos peržiūrai, kiti tuo tarpu laiką leidžia socialiniuose tinkluose ar tiesiog naršydami. Beto skiriasi ir vartotojų perduotų duomenų apimtys. Dalis duomenų tinklo vartotojų mobilųjį internetą naudoja tik naujienų sekimui ar elektroninių laiškų siuntimui. Kita dalis vartotojų mobiliuoju tinklu persiunčia didelės apimties duomenų bylas. Tokios vartotojų kategorijos yra visiškai nelygiavertiškos perduodamo duomenų srauto atžvilgiu. Svarbu ir tai, kad vartotojų mokymas už suteiktas paslaugas taip pat skiriasi. Vieni vartotojai gali sau leisti mokėti daugiau nei kiti, todėl iš teikiamų paslaugų jie tikisi papildomos vertės. Jei tinklo ląstelė yra pajėgi aptarnauti visus aktyvius vartotojus, tikėtina, kad juos pasiekia kokybiškos paslaugos. Tačiau tinklo ląstelėje susidarius sangrūdams užtikrinti visų vartotojų teigiamą *QoE* (angl. *Quality of Experience*) nepavyksta. Tuomet reikalinga vartotojams prisijungusiems prie tinklo ląstelės paslaugas teikti klasifikuotai. Tinklo vartotojų klasifikavimas padeda suvaldyti tinklo vartotojų duomenų srautą sangrūdų metu, o taip pat leidžia užtikrinti svarbesnių tinklo vartotojų duomenų perdavimo pirmumą. Tokiu būdu valdoma vartotojų gaunamų paslaugų kokybė skirtingos tinklo apkrovos momentais.

Pagrindinis vartotojų klasifikavimo principas korinio ryšio sistemose remiasi skirtingų *QoS* prioritetų vartotojams suteikimu. Pagal *3GPP QoS* yra visapusiškas rodiklis atspindintis *E2E* (angl. *End to end*) vartotojo pasitenkinimą gautomis paslaugomis. *QoS* mechanizmams keliami lankstumo ir efektyvaus išteklių priskyrimo reikalavimai (*3GPP QoS*, 2002, Jain *et al.* 2016). *QoS* architektūros viena pagrindinių užduočių yra apibrėžti skirtingus paslaugų kokybės lygius. Reikalavimai apibrėžiami taikant *QoS* požymius. Išskirtinių požymių deriniai leidžia teikti klasifikuotas paslaugas ir užtikrinti vartotojų pirmenybę. Pagal *ETSI* specifikacijas išskiriami trys vartotojų tipai: auksinis, sidabrinis ir varinis, o jų prioritetai sudaromi naudojant *ARP* (angl. *Allocation and Retention Priority*), *SPI* (angl. *Scheduling Priority Indicator*) ir *THP* (angl. *Traffic Handling Priority*) parametrų derinius. Vartotojo požiūriu, *QoS* suteikimas pagerina jo gaunamų paslaugų kokybę lyginant su likusiais žemesnio prioriteto tinklo vartotojais. Tinklo atžvilgiu, tinklo ištekliai esant jų trūkumui paskirstomi tikslingiau. Kitaip tariant prioritetas duomenų srautas tinklu perduodamas greičiau, o *E2E* patiriama vartotojo paslaugų kokybė pagerinama. Tipinė, *3GPP TS 23.107* nustatyta *UMTS QoS* architektūra (*3GPP TS 23.107 Universal Mobile Telecommunications System (UMTS)*, 2002) *E2E* paslaugų kokybės užtikrinimui pateikta 1.6 paveiksle.



1.6 pav. *UMTS* paslaugų kokybės architektūra  
Fig. 1.6. Architecture of *UMTS* quality of service

Pagal pateiktą *E2E QoS* užtikrinimo architektūrą, vartotojo paslaugos kokybės užtikrinimas yra paremtas žemesnių lygmenų nešlių paslaugomis. Jas sudaro vietinio, *UMTS* ir išorinio nešlio paslaugos. Vietinio ir išorinio nešlių paslaugos yra nepriklausomos nuo *UMTS QoS* užtikrinimo priemonių. *UMTS* nešlio paslauga sudaryta iš *RAB* ir kamieninio nešlių. *RAB* nešlys apima visas radijo tinklo sąsajas. Jai priskiriamas ir *QoS* užtikrinimas *Iu* sąsajoje.

Įprastai duomenų srauto prioretizavimas korinio ryšio tinkle vykdomas dviem etapais. Pirminio vartotojų prioretizavimo metu vartotojo profilis apibrėžiamas stuburiniame duomenų perdavimo tinkle. Pagal vartotojui priskirtą profilį radijo tinklo bazinių stočių valdiklis nurodo bazinėms stotims, kurie vartotojai tinkle yra prioretizuoti. Tuomet radijo tinklo bazinės stotys išteklių išskyrimo planavimo etape, vartotojams su aukštesniu prioritetu skiria ilgesnį duomenų perdavimo langą *TTI* (angl. *Transmission Time Interval*). Tokiems vartotojams dažniau yra išskiriami papildomi kanalo elementai, kurie leidžia pasiekti didesnę duomenų perdavimo spartą, jų duomenų srautą prioretizuojant *Uu* ir *Iub* sąsajomis.

Vieningo algoritmo kaip bazinės stoties išteklių planuotojas turi paskirstyti turimus išteklius nėra. Tai palikta spręsti tinklo įrangos gamintojams. Dėl tarpusavio komercinių paslapčių, dokumentacija apie detalų tinklo stočių išteklių planuotojų veikimą beveik neprieinama. Todėl didelis dėmesys skiriamas tyrimams siejamiems su naujų išteklių valdymo ir išnaudojimo metodų paieška, siekiant pagerinti vartotojų paslaugų kokybę ir pasitenkinimą. Siūlomi metodai apima sudėtingas kokybės valdymo strategijas, susijusias su paketų planuotojais, energijos

paskirstymu ir išteklių koordinavimu (Enderle *et al.* 2003, Laraspata *et al.* 2010). Nagrinėjami lankstūs išteklių valdymo metodai pagrįsti *QoS* užtikrinimu mobiliojo ryšio sistemose. Nemaža dalis darbų skirta skambučių priėmimo valdymo klausimams susietiems su skirtinga skambučių *QoS* (Subramaniam *et al.* 2005). Taip pat tobulinami duomenų perdavimo sesijų prioretizavimo metodai (Golaup *et al.* 2015, Ouyang *et al.* 2010). Numatant tolimesnę korinio ryšio sistemų tarpusavio sąveiką su IEEE 802.11 technologijos tinklais analizuojami tarptinkliniai *QoS* užtikrinimo būdai duomenis siunčiant tarp *UMTS/LTE* ir *WLAN* technologijų tinklų. Tyrimai apie vartotojų patiriamą naudą yra pakankamai riboti, tačiau esami rezultatai rodo, kad suteiktas *QoS* yra glaudžiai susijęs su vartotojų patiriama *QoE* (Kim *et al.* 2008, Oyman *et al.* 2012). *QoS* įtaka vertinama atliekant skirtingų tipų paslaugų analizę bei atsižvelgiant į tai, kad jos naudojamos skirtingose aplinkose (Skorin-Kapov *et al.* 2004, Diaz *et al.* 2010).

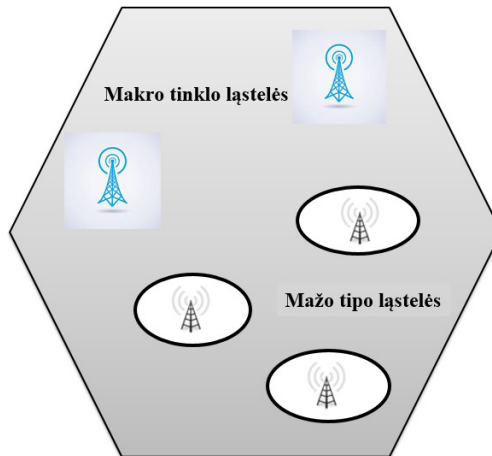
*UTRAN QoS* valdymo strategijos tikslas yra užtikrinti galimai geriausią vartotojų paslaugų kokybę, kai paslaugos yra teikiamos klasifikuotai skirtingiems vartotojams. Kartu stengiantis patenkinti daugelio vartotojų reikalavimus. Strategija įgyvendinama taikant konkrečias *QoS* valdymo funkcijas. Pradedant radijo nešlio, galios valdymo, *HSPA* (angl. *High Speed Packet Access*) išteklių planavimo funkcijų adaptavimu, bei perjungimų tarp skirtingų tinklo ląstelių atlikimu, kurių visuma užtikrina reikiamą *QoS* ir paslaugų tęstinumą. Be to, pagal *QoS* klasifikuotų paslaugų įtraukimas į korines ryšio sistemas leidžia atlikti vartotojų sukuriamo duomenų srauto balansavimą. Vartotojų srautas yra prioretizuojamas, dėl to ištekliai pasiskirstomi ne vienodai. *HSPA* technologijos atveju, žemo prioriteto vartotojams radijo tinklo ištekliai yra ribojami. Atvirkščiai yra su aukšto prioriteto vartotojais. Jiems tinklo ištekliai rezervuojami, todėl pagerinama jų patirtis. Klasifikuotų paslaugų teikimas tinklo vartotojams leidžia padidinti sistemos talpą.

Srauto balansavimo pagal *QoS* taikymo metu dalis duomenų tinklo vartotojų patiria prastesnę paslaugų kokybę, nei galėtų gauti esant pakankamam skaičiui tinklo išteklių. Užtikrinti tinklo išteklius galima, kuriant naujus tinklo ląstelių sluoksnius. Mažos, savaimine konfigūracija pagrįstos tinklo ląstelės yra tinkama alternatyva plėsti heterogeninio tinklo talpą bei paskirstyti ryšio vartotojų srautą.

### 1.5.2. Srauto balansavimas taikant mažų ląstelių sluoksnius

Vartotojų vietos nustatymo duomenys teigia, kad apie 50 % balsinių skambučių ir 70 % duomenų srauto yra generuojama pastatų viduje (Huang *et al.* 2013). Pasak tinklo įrangos gamintojų atliekamų korinio ryšio tinklų srauto ir kitų rodiklių audito, aišku tai, jog net 90 % vartotojų sukuriamo srauto yra perduodama išnaudojant tik 10 % tinklo infrastruktūros (Paul *et al.* 2011, Li *et al.* 2016). Paprastai didelė duomenų srauto apkrova pasireiškia tankiai apgyvendintose vietose ar

verslo centrų rajonuose. Likusi tinklo dalis yra mažai apkrauta (Viavi, 2012). Didelė vartotojų koncentracija yra tiesiogiai susijusi su stipriai išaugusia tinklo ląstelių apkrova. Nuolatinis žemynkryptės galios, kanalų elementų trūkumas, aukštas aukštynkrypties kanalo interferencijos lygis yra įprasti reiškiniai tokiomis sąlygomis. Vartotojų sesijų užklausų atmetimas, sangrūdos, ilgainiui tinklo vartotojams sukelia nepasitenkinimą operatoriaus tinklu ir paslaugomis. Sumažinti šių pasekmių įtaką įmanoma užtikrinant mažą vartotojų skaičių tinklo ląstelėje. Pastarasis reikalavimas gali būti patenkintas priartinus tinklo ląsteles arčiau klientų. Korinis makro tinklas yra nepajėgus to padaryti, tačiau tam puikiai tinka mažos tinklo ląstelės. Mažų tinklo ląstelių perima dalį srauto ir leidžia užtikrinti 3C (angl. *Coverage, Capacity, Capability*) prieinamumą. Kartu pasiekiamas makro tinklo apkrovos palengvėjimas, pagerinama vartotojų *QoE*. Mažų tinklo ląstelių struktūros leidžia padidinti erdvinį tinklo efektyvumą ir išplėsti talpą. Tarpusavio jų sąveika su makro tinklo sluoksniu užtikrina efektyvų vartotojų srauto balansavimą *HetNet* tinklo topologijoje. Apklausų duomenimis net 60 % ryšio operatorių mato mažas ląsteles kaip svarbią dalį teikiant 3G/4G ryšio paslaugas ir tikisi, jog net 25 % mobiliųjų duomenų bus perduodami jomis jau 2016-aisiais (Small Cell Forum, 2012). *HetNet* topologijos tinklo struktūra, sudaryta iš didelės galios makro celių ir mažos galios mažų celių pavaizduota 1.7 paveiksle.



1.7 pav. Heterogeninio tinklo topologija  
 Fig. 1.7. Topology of heterogeneous network

Tarpusavyje makro tinklo ląstelės ir mažos ląstelės sudaro vieningą korinio ryšio tinklo struktūrą, kuri išplečia tinklo aprėptį bei talpą. Mažų ląstelių forumas šias ląsteles apibrėžia kaip: mažos galios bevielinius įrenginius veikiančius licencijuoto spektro ruože ir valdomus ryšio operatoriaus. Jų paskirtis užtikrinti ryšio

signalą skirtingo dydžio patalpoms, todėl atitinkamai yra skirstomos į femto, piko, mikro ir metro ląsteles (Leem *et al.* 2014). Mikro ir metro ląstelės yra skirtos nedidelėms, atviroms ar uždaroms teritorijoms. Tipiškai naudojamos viešbučių, aikščių teritorijoms ryšio signalu padengti. Piko ląstelė pasižymi iki 200 metrų aprėptimi ir pagrinde skirta teikti *GSM* ryšio paslaugas biuruose. *UMTS* ir *LTE* paslaugų prieinamumas patalpose užtikrinamas femto ląstelių pagalba. Pastarosios, 3G atveju vadinamos *HNB* (angl. *Home NodeB*) ir *HeNB* (angl. *Home eNodeB*) 4G atveju bei laikomos pagrindu plėtoti *HetNet* topologiją. Femto ląstelių tikslas yra vartotojų srauto nukrovimas nuo išorinio tinklo, vykdant tarpusluoksninį vartotojų srauto balansavimą. Mažų ląstelių naudojimas šiuolaikinėse telekomunikacijų sistemose nėra masinis, tačiau labiau skirtas paslaugų kokybės pagerinimui. Prognozuojama, kad penktos kartos ryšio sistemose mažų ląstelių svarba bus žymiai reikšmingesnė. Sąlyginai dėl savo naujumo mažos ląstelės kelia nemažai diskusijų ir klausimų. Iki galo nėra aišku su kokiais sunkumais bus susiduriama diegiant tokias ląsteles masiškai. Palengvinti šiai situacijai darbe yra detalai analizuojamos mažų ląstelių savybės ir jų koncepcija. Siekiant aiškiai pateikti mažų ląstelių privalumus ir trūkumus sudaromas femto zonos integracijos modelis, kurio esmė – charakterizuoti femto zoną. Darbe siūlomas integracijos modelis yra informatyvi priemonė, palengvinanti mažų ląstelių integraciją į korinio ryšio sistemas. Modelis taip pat naudingas analizuojant mažas ląsteles iš ekonominės perspektyvos.

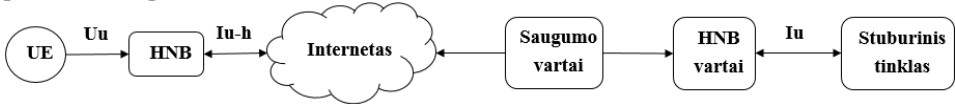
### 1.5.3. Femto ląstelės koncepcija

*HNB* – paprastas, nepriklausomas, savarankiškai vartotojo įmonės ar gyvenamosiose patalpose „plug and play“ principu diegiamas įrenginys. Pagrindinis keliamas reikalavimas – tranzitinio *IP* tinklo prieiga ląstelės įrengimo vietoje. Svarbu tai, kad femto ląstelių diegimo principai yra visiškai nepanašūs į standartinio tinklo planavimo principus. Todėl naujoms femto ląstelėms keliami griežti reikalavimai (3GPP TS 22.220 Service requirements for Home Node B (HNB) and Home eNode B (HeNB), 2011):

1. Naujų *HNB* atsiradimas turi nedaryti įtakos esamai tinklo infrastruktūrai.
2. Femto ląstelės sujungimas su kamieniniu tinklu per interneto liniją turi būti saugus.
3. *HNB* turi būti konfigūruojamas nuotoliniu būdu.

Femto ląstelės pajungimas prie operatoriaus tinklo vykdomas *Iu-h* sąsaja, sujungiant su *HNB-Gw* (angl. *Gateway*), kuris atlieka *RNC* funkcijas ir apdoroja visų *HNB* prisijungimus. Stuburinis korinio ryšio tinklas standartiškai pasiekiamas *Iu* sąsaja. Saugus sujungimas tarp *HNB* ir *HNB-Gw* sudaromas *IPSec* (angl. *Internet Protocol Security*) protokolu. Vartotojo patalpose įdiegta *HNB* atlieka

standartines *NodeB* funkcijas, o su *UE* bendrauja įprastine *Uu* sąsaja (Chen *et al.* 2010). „*Plug and play*“ bei savaiminės auto konfigūracijos savybės leidžia femto ląsteles diegti patiems vartotojams. Femto ląstelės įjungimo į tinklą architektūra pateikta 1.8 paveiksle.



1.8 pav. Femto celių architektūra  
Fig. 1.8. Architecture of femto cells

Naujų femto zonų kūrimas kelia tam tikrų iššūkių, nes ląstelės yra diegiamos vartotojų neturinčių patirties su mobiliojo ryšio sistemomis. Dažnai yra nepaisoma jokių tinklo planavimo principų, todėl iškyla ląstelės prieigos, vartotojų mobilumo tinklo ląstelėje, sąveikos su makro tinklu nesuderinamumo klausimų. Naudojama nesaugi ir nepatikima interneto linija, kuri sukelia didelį vėlinimą, paketų praradimus, dėl to nukenčia realus laiko paslaugos (Hoadley *et al.* 2012).

Nepaisant šių sunkumų femto ląstelės yra abipusiškai naudingos tinklų operatoriams ir paslaugų vartotojams. Operatoriaus požiūriu femto ląstelės užtikrina tinklo talpą, aprėptį, sumažina makro tinklo apkrovą. Sumažėja išlaidos makro tinklo plėtrai, pagreitinama tinklo plėtra. Vartotojo požiūriu pagerėja balso ir duomenų perdavimo paslaugų lygis patalpose. Prieinamos tampa femto zonų paslaugos, užtikrinami žemesni paslaugų tarifai femto zonose. Išauga *UE* baterijų budėjimo laikas, sumažėja *UE* spinduliavimo galia (Zhang *et al.* 2010).

#### 1.5.4. Femto ląstelių tyrimai šiuolaikinėse telekomunikacijų sistemose

Nors femto ląstelių paplitimas tokiose šalyse kaip Lietuva nėra didelis, esami tinklų operatoriai palaipsniui žvelgia į femto ląstelių teikiamas naudas. Tuo tarpu turtingesnėse vakarų Europos, Amerikos ir Skandinavijos regionuose femto ląstelių banga įsibėgėja (Paolini *et al.* 2012). Kylantis vartotojų sunaudojamų duomenų kiekis, licencijuotų ir laisvų spektro juostų išnaudojimas žada, kad femto zonose vyks pagrindinis duomenų srautų absorbavimas (Liu *et al.* 2015). Kartu su *WiFi* taškais jos sudarys kombinotą mažų ląstelių sluoksnį.

Femto ląstelių tematika vykdomų tyrimų yra apstu. Daugelis jų nagrinėja su mažų ląstelių pritaikymu šiuolaikinėse heterogeninio korinio ryšio sistemose susijusius klausimus. Pagrindė sprendžiamos opios technologinės problemos susijusios su interferencijos mažinimu, kuri yra dažnai sutinkama dėl nekoordinuoto femto ląstelių integracijos proceso (Zyoud *et al.* 2012, Cheng *et al.* 2011). Ženkli

tyrimų dalis skirta vartotojų mobilumo klausimams femto zonose ir femto ląstelių pakraščiuose, kuriuose pasireiškia stipri sąveika su makro tinklo ląstelėmis (*3GPP HNB Mobility*, 2011, Yavuz *et al.* 2009). Čia nagrinėjami klausimai, susiję su femto ląstelių adaptyviais spinduliuojamos galios valdymo būdais (Morita *et al.* 2010). Sutinkami apžvalginiai straipsniai analizuojantys teigiamas ir neigiamas femto ląstelių savybes, tačiau juose pasigendama apibendrintų rezultatų. Mažai dėmesio skiriama femto ląstelių integracijos į tinklus aptarimui. Siekdami papildyti šią nišą darbe dėmesį skiriame apibendrinto femto ląstelių modelio sudarymui, kurio tikslas pateikti femto ląstelių poziciją tinklo operatorių ir vartotojų atžvilgiais. Vienas iš pateiktų poskyrių analizuoja femto ląstelių įtraukimo į korines ryšio sistemas galimybes per verslo modelių prizmę.

Svarbi femto ląstelių temos dalis siejama su femto zonų vartotojų patiriama nauda ir paslaugų *QoS* (Meshkati *et al.* 2009, Claussen *et al.* 2009, Yuan *et al.* 2014). Esama keletu tyrimų, kuriuose apžvelgiami femto ląstelių veiklos rezultatai. Įprastai jie apima duomenų perdavimo spartos matavimus, kurie dažniausiai lyginami su makro tinklo duomenų perdavimo sparta (Acakpovi *et al.* 2013). Femto ląstelių galybės lygiagretinamos su *WiFi* prieigos taškų duomenų perdavimo spartos, naršymo spartos, delsos matavimų rezultatais (Qutqut *et al.* 2013, Hasan *et al.* 2009). Teigiama, kad femto ląstelių pranašumas išryškėja duomenų perdavimui naudojant *RTP* (angl. *Real-time Transport Protocol*). Taip pat jos pasižymi mažesniu paketų praradimų santykiu, tačiau nusileidžia duomenų perdavimo spartos matavimais. Femto zonų įsteigimas gerokai pagerina makro tinklo vartotojų paslaugų kokybę (Calin *et al.* 2010).

Deja, darbų susijusių su femto ląstelių naudojimo problematika Lietuvos kontekste aptikti nepavyko. Tad, vienas iš uždavinių yra nustatyti Lietuvos korinio mobiliojo ryšio tinklo vartotojų patiriamą naudą įsteigiant femto zonas. Dėmesys skiriamas vartotojų patirtos paslaugų kokybės matavimams, ryšio kanalo kokybiniam įvertinimui. Atsižvelgiama į tarpusavio makro – femto ląstelių sluoksnių apkrovos pasidalinimo klausimus.

## 1.6. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Kasmet, vartotojų perduodamos informacijos srautams ryšio sistemoje augant po 60 %, vis dažniau susiduriama su dalies tinklo ląstelių perkrovomis, kurios sąlygoja paslaugų kokybės pablogėjimą.
2. Atlikus literatūros analizę paaiškėjo, kad pagrindinės ląstelių sangrūdų priežastys yra: pakitusi vartotojų paslaugų naudojimo specifika bei netolygus vartotojų pasiskirstymas heterogeninėje tinklo struktūroje.

3. Tipinėms judriosios apkrovos srauto balansavimo priemonės nepavyksta efektyviai balansuoti viso vartotojų srauto korinėje ryšio sistemoje, todėl reikalinga ištirti išplėstinių balso ir duomenų srautų balansavimo metodų efektyvumą tinkle.
4. Praktinių duomenų, susijusių su vartotojų srauto balansavimu koriniame ryšio tinkle taikant tarp sisteminį, tarp sluoksnių ir pagal QoS lygius įgyvendinamą srauto valdymą yra mažai.

Siekiant efektyvesnio vartotojų informacijos srauto balansavimo korinėse ryšio sistemose bus tiriama išplėstinių srauto balansavimo priemonių efektyvumas. Taikant šias priemones dėmesys skiriamas vartotojų patiriamos paslaugų kokybės įvertinimui bei poveikio korinio ryšio tinklui nustatymui.

Atsižvelgiant į apžvelgtų srauto balansavimo priemonių visumą ir taikymą bei įvertinus vartotojų įpročių pokyčius, tikslinga išsikelti šiuos uždavinius:

1. Nustatyti vartotojų balso srauto pasiskirstymo charakteringąsias savybes heterogeninėse korinio ryšio sistemose.
2. Pasiūlyti ir ištirti tarp sisteminis balso srauto balansavimo metodus, įvertinant poveikį ryšio sistemai ir jos vartotojams.
3. Nustatyti QoS profiliavimo pagrindu sudarytų vartotojų duomenų srauto balansavimo veiksmingumą ir priimamą paslaugų kokybės efektyvumą.
4. Sudaryti mažų ląstelių integracijos modelį, tinkantį balansuoti makro korinio ryšio sistemų apkrovą ir ištirti mažų ląstelių efektyvumą balansuojant vartotojų srautą.



# 2

---

## Balso skambučių srauto balansavimas

Šiame skyriuje sprendžiami pirmieji du disertacijoje keliami uždaviniai, kurie yra siejami su vartotojų balso srauto pasiskirstymo nustatymu heterogeninėse korinio ryšio sistemose ir tarp sisteminiu balso srauto balansavimu. Šiuo tikslu skyriuje apžvelgiama vartotojų balso srauto pasiskirstymo specifika ir jo balansavimo galimybės šiuolaikinėse heterogeninių tinklų sistemose. Nagrinėjami vartotojų balso skambučių naudojimo įpročiai vartotojus grupuojant į grupes. Taikant didžiųjų duomenų analizę balso skambučių trukmėms, nustatomi vartotojų elgsenos įpročiai. Pagal gautus duomenis, vartotojų balso srautas balansuojamas koriniame tinkle, tarp skirtingų technologijų. Srauto balansavimui taikomos skirtingos srauto balansavimo taisyklės. Apdorojus sukauptus duomenis, atliekamas balso srauto balansavimo poveikio vertinimas tinklui ir vartotojams. Skyriaus pabaigoje pateikiamos išvados, sietinos su balso srauto pasiskirstymo tinkle ir subalansuoto balso srauto rezultatais.

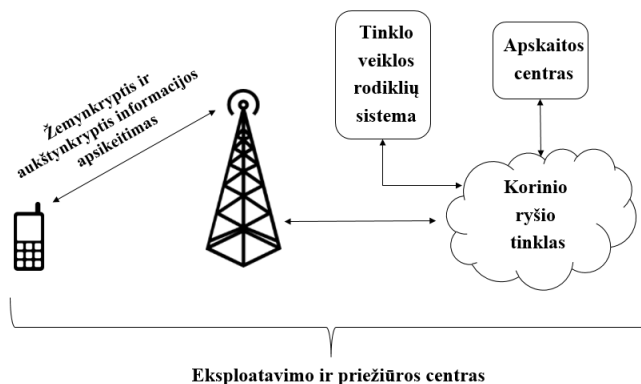
Skyriaus tematika paskelbti trys autoriaus straipsniai: Žvinys *et al.* (2014), Stirbys *et al.* (2014), Žvinys *et al.* (2016). Perskaityti trys pranešimai užsienio ir respublikinėse konferencijose: „Mokslas – Lietuvos ateitis: Elektronika ir elektrotechnika“ (Vilnius, 2014), „AIEEE“ (Ryga, 2014), „eStream“ (Vilnius, 2016).

## 2.1. Balsų skambučių trukmės matavimų metodika

Daugelis šiandieninių korinio ryšio tinklų yra hibridiniai – sudaryti iš keleto skirtingų ryšio technologijų. Antros kartos tinklo praktinė nauda pasireiškia didele jų aprėpties zona ir geromis bangų skvarbos savybėmis. Tai lemia, kad 2G tinklai plačiai naudojami balsų skambučiams perduoti ir *M2M* komunikacijai. Trečios kartos tinklo paskirtis yra spartus duomenų perdavimas, tačiau juo perduodama 50–90 % viso balsų skambučių srauto generuojamo tinkle (Kim, 2015). Nors didelė duomenų srauto dalis migruoja į *LTE* ryšio technologiją, 3G apkrova išlieka didžiausia vertinant tinklo kartų požiūriu.

Šiuolaikiniai išmanieji korinio ryšio įrenginiai be didesnių kliūčių migruoja tarp visų ryšio technologijų kartų, o vartotojui visiškai nereikia rūpintis kokiame tinkle jis prisijungęs. Tinklo pasirinkimas priklauso nuo vartotojo įrangos ir tinklo aprėpties. Tipiniu atveju, vartotojas visuomet bus perkeliamas į aukščiausios technologijos tinklą. Ar toks vartotojų koordinavimas tinkle yra geriausias, išlieka diskutuotina. Viena vertus naujesnę technologiją palaikantis tinklas yra patrauklesnis vartotojams. Kita vertus, jei naujausią technologiją teikiantis tinklas yra perkraunamas tie patys vartotojai susiduria su nepatenkinama paslaugų kokybe.

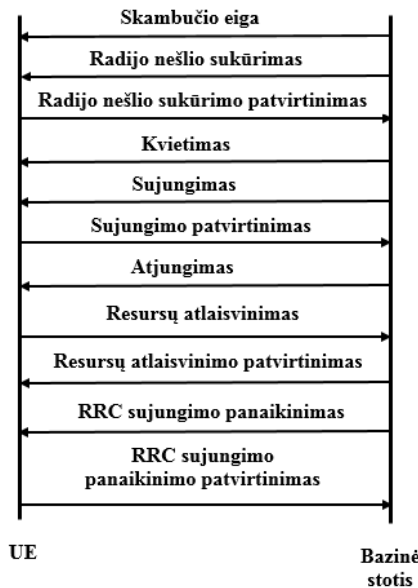
Siekiant užtikrinti paslaugų kokybės ir tinklo išteklių prieinamumą tinklų priežiūros specialistai nuolat stebi korinio ryšio tinklų apkrovos rodiklius. Šiuo tikslu pasitelkiamos įvairios specializuotos tinklų stebėsenos priemonės ir įrankiai. Taikomi skirtingų tinklo elementų talpos skaičiavimo ir apkrovos numatymo metodai (Vujic *et al.* 2014, Lister *et al.* 2000). Skambučių srautų analizės atveju svarbiausiais laikomi balsų srauto tinkle apkrova ir tiesiogiai su vartotojų balsų srautu siejami *CDR* (angl. *Call Detail Record*) metaduomenys.



2.1 pav. Vartotojų paslaugų vartojimo ir tinklo rodiklių duomenų rinkimo schema  
Fig. 2.1. Scheme of data collection for users service usage and network performance

Iš *CDR* duomenų, taikant didžiųjų duomenų analizės metodus atliekami balso paslaugų vartotojų įpročių vertinimai. Duomenys taip pat naudojami paslaugų apmokestinimui ir tinklo veiklos rodiklių nustatymui. Pagal surinktus metaduomenis nustatoma ne tik vartotojo balso skambučio trukmė, vieta, tačiau įvertinama koks yra sėkmingų skambučių santykis tinklo mastu ir kitų rodiklių vertės. *CDR* duomenys naudojami ir kaip įvesties duomenys atpažįstant tinklo elementus, kuriuose atsiranda poreikis taikyti srauto balansavimo priemones.

Tyrimo naudota tinklo veiklos rodiklių ir vartotojų metaduomenų matavimo bei rinkimo metodika parodyta 2.1 paveiksle. Duomenys siunčiami oro sąsaja tarp vartotojo ir mobiliojo tinklo stoties aukštynkrypčiu ir žemynkrypčiu duomenų perdavimo kanalais apdorojami ir kaupiami prie korinio tinklo prijungtuose serveriuose. Balso skambučių vartotojų skambučio laiko trukmė fiksuojama nuo pokalbio sujungimo iki sujungimo nutraukimo stadijos. Balso skambučio inicijavimo diagramos fragmentas, *UMTS* skambučio atveju pateiktas 2.2 paveiksle (*3GPP TS 25.331 Radio Resource Control (RRC) protocol specification, 2004*)



2.2 pav. Balso skambučio diagrama

Fig. 2.2. Diagram of voice call flow

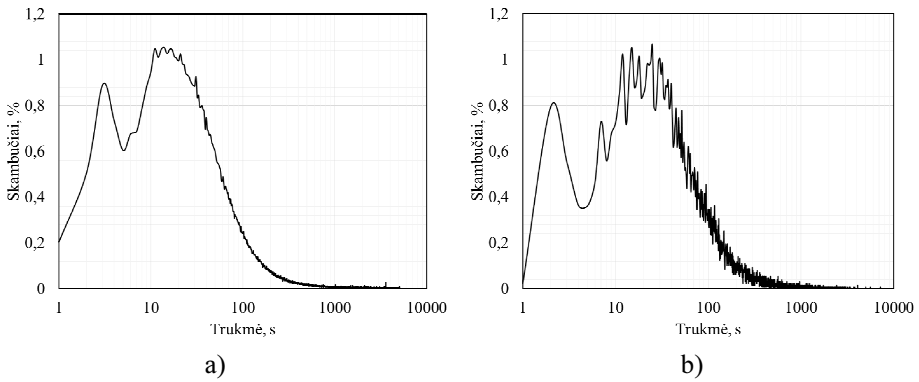
Pagal pateiktą skambučio inicijavimo struktūrinę diagramą, balso skambučio trukmė skaičiuojama nuo *Sujungimo* fazės, kol skambutis visiškai baigiamas *Atjungimo* pranešimu. Siekiant išsiaiškinti skirtingose tinklo vietose esančių balso

skambučių vartotojų skambučių trukmių pasiskirstymą, buvo organizuoti eksperimentiniai tyrimai.

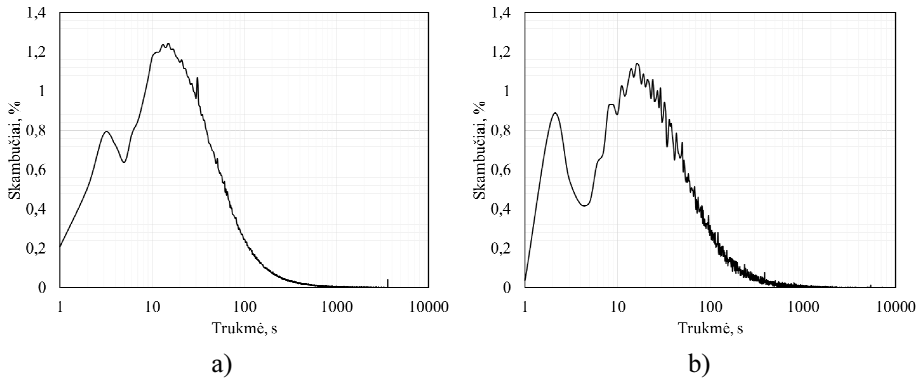
Keleto, Lietuvos komercinių mobiliojo ryšio operatorių tinkluose buvo surinkti *CDR* metaduomenys. Analizei panaudota daugiau negu 6 milijonai vartotojų balsinių skambučių. Skambučiai surinkti iš bazinių korinio ryšio tinklo stočių išdėstytų skirtingose Lietuvos teritorijos vietose. Bazinių stočių vietos apima mažus miestelius, kaimus, kelius, gyvenamuosius miesto rajonus, pramogų ir verslo centrus. Atitinkamai pagal korinio ryšio bazinių stočių vietas sudarytos balso skambučių vartotojų grupės. Surinkti *CDR* metaduomenys sudaryti iš skambučių trukmių, bazinės stoties ląstelės atpažinimo numerio, vartotojo tipo pagal paslaugų apmokėjimo rūšį bei skambučio metu naudotos ryšio technologijos. Ląstelės atpažinimo numeris naudojamas skambučių grupavimui pagal vietą. Pagal šią metodiką surinkti vartotojų vietos ir kiti duomenys naudojami praktinėje tyrimo dalyje, 2.1.1–2.1.3 poskyriuose.

### **2.1.1. Balso skambučių trukmių pasiskirstymas pagal vartotojų buvimo vietą**

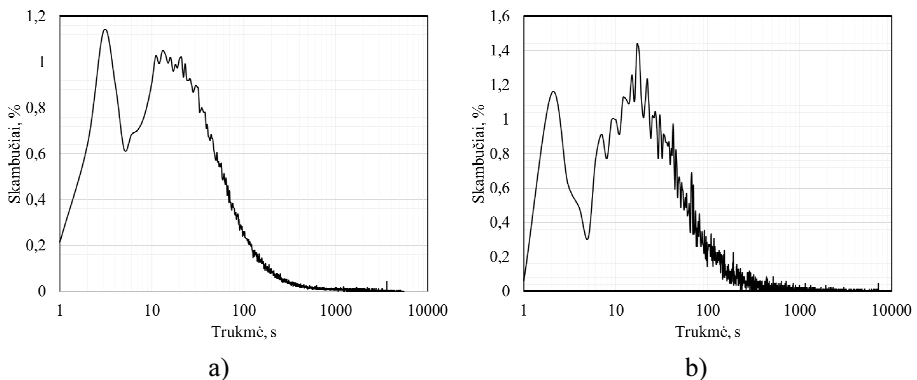
Praktinė surinktų metaduomenų analizė leido išskirti šešias balso paslaugų vartotojų grupes. Tokios grupės sudarytos remiantis tipiniais bazinių stočių vietų planavimo principais ir zonomis, kurios yra išskiriamos sudarant bangų sklidimo aprėpties žemėlapius (Prasad *et al.* 2008). Skambučių trukmių skirstiniai nagrinėjami vartotojų grupėms skirtingų Lietuvos korinio ryšio operatorių tinkluose pateikti 2.3–2.8 paveiksluose. Statistiniai balso skambučių duomenys apima visus skambučius, atliktus *GSM* ir *UMTS* ryšio tinkluose. Balso trukmių pasiskirstymuose nėra išskiriama, skambutis priklauso įeinančio ar išeinančio skambučio tipui. Vartotojų grupių skirstiniai pristato visų amžiaus grupių, lyčių, socialinių sluoksnių, vartotojų tipų pagal paslaugų apmokėjimą balso skambučių trukmių pasiskirstymą. Literatūroje sutinkami panašaus tipo vartotojų balso trukmių skirstiniai įprastai analizuoja vieno vartotojo skambučio trukmės priklausomybes. Dažnai, tai neatskleidžia tikrųjų operatoriaus tinklo vartotojų įpročių. Paminėsim, kad toliau pateikiami skirstiniai galioja daugelio išsivysčiusių vakarų pasaulio valstybių vartotojų grupėms. Tai galima teigti, nes vartotojų grupės analizuojamos tipinio korinio ryšio tinklo aplinkoje, kurio planavimas atliekamas laikantis korinių ryšio tinklų planavimo taisyklių. Taip pat korinio ryšio tinklas teikia visas šiuo metu prieinamas radijo ryšio technologijas ir turi įdiegtas pagrindines funkcijas. Pateikiami rezultatai gali stipriai skirtis, jei panašus tyrimas būtų vykdomas ne visas korinio ryšio tinklo technologijas teikiančiame tinkle arba ne tipinėje šalyje, kurios vartotojų aparatinės įrangos pasklidimas nėra tolygus (daug 2G įrenginių).



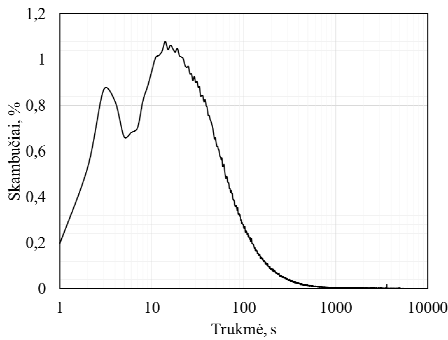
**2.3 pav.** Kelio vartotojų grupės skirstiniai: a) 1 operatorius; b) 2 operatorius  
**Fig. 2.3.** Distributions of road user group: a) 1 operator; b) 2 operator



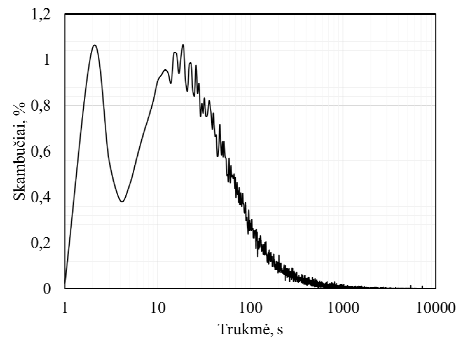
**2.4 pav.** Miestelio vartotojų grupės skirstiniai: a) 1 operatorius; b) 2 operatorius  
**Fig. 2.4.** Distributions of small city user group: a) 1 operator; b) 2 operator



**2.5 pav.** Kaimo vartotojų grupės skirstiniai: a) 1 operatorius; b) 2 operatorius  
**Fig. 2.5.** Distributions of village user group: a) 1 operator; b) 2 operator

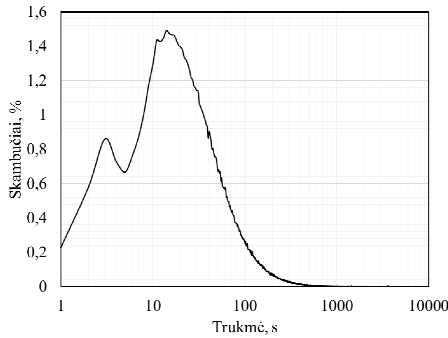


a)

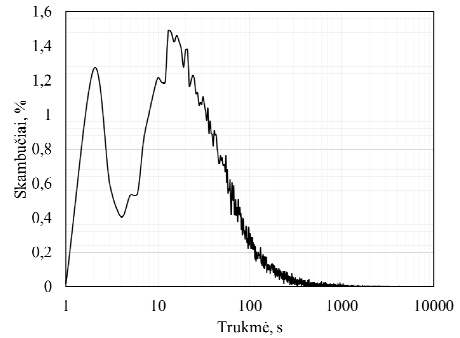


b)

**2.6 pav.** Gyv. raj. mieste vartotojų grupės skirstiniai: a) 1 operatorius; b) 2 operatorius  
**Fig. 2.6.** Distributions of residential district user group: a) 1 operator; b) 2 operator

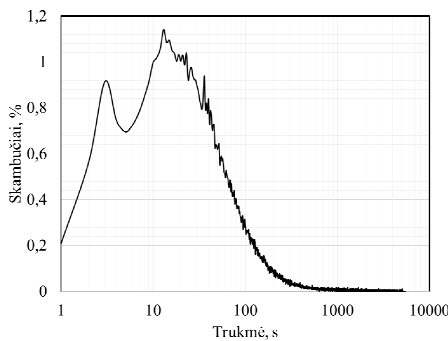


a)

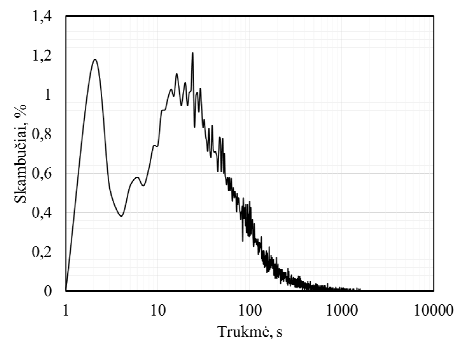


b)

**2.7 pav.** Pramogų centro vartotojų grupės skirstiniai: a) 1 operatorius; b) 2 operatorius  
**Fig. 2.7.** Distributions of entertainment center user group: a) 1 operator; b) 2 operator



a)



b)

**2.8 pav.** Verslo centro vartotojų grupės skirstiniai: a) 1 operatorius; b) 2 operatorius  
**Fig. 2.8.** Distributions for business center user group: a) 1 operator; b) 2 operator

Gauti skambučių trukmių pasiskirstymai iš pirmo žvilgsnio yra gana panašūs. Balsų paslaugų naudojimas korinio ryšio tinkle nepriklausomai nuo naudojimo vietos turi tą pačią kitimo tendenciją. Lyginant skirstinius tarpusavyje, jų panašumo koeficientas kinta nuo 0,965 iki 0,983. Pastebėsime, kad skirstiniams aproksimuoti nepavyksta pritaikyti jokios gerai žinomos funkcijos. Su šia problema susiduria ir kiti autoriai, analizuojantys pavienių vartotojų balsų paslaugų naudojimo įpročius. Tenka trukmių pasiskirstymą skaidyti dalimis, pirmąją dalimi laikant atkarpą iki antrosios pikinės skirstinio vertės, o antrąją skirstinio uodegą. Pastarajai aprašyti tinka log-normalusis skirstinys, kurio tikimybės tankio funkcija randama:

$$f(x|\mu,\sigma)=\frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}}\exp\left\{-\frac{(\ln x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\};x>0. \quad (2.1)$$

Tikimybės tankio funkcija priklauso nuo dviejų charakteristikų:  $\mu$  ir  $\sigma$ . Šios randamos pagal:

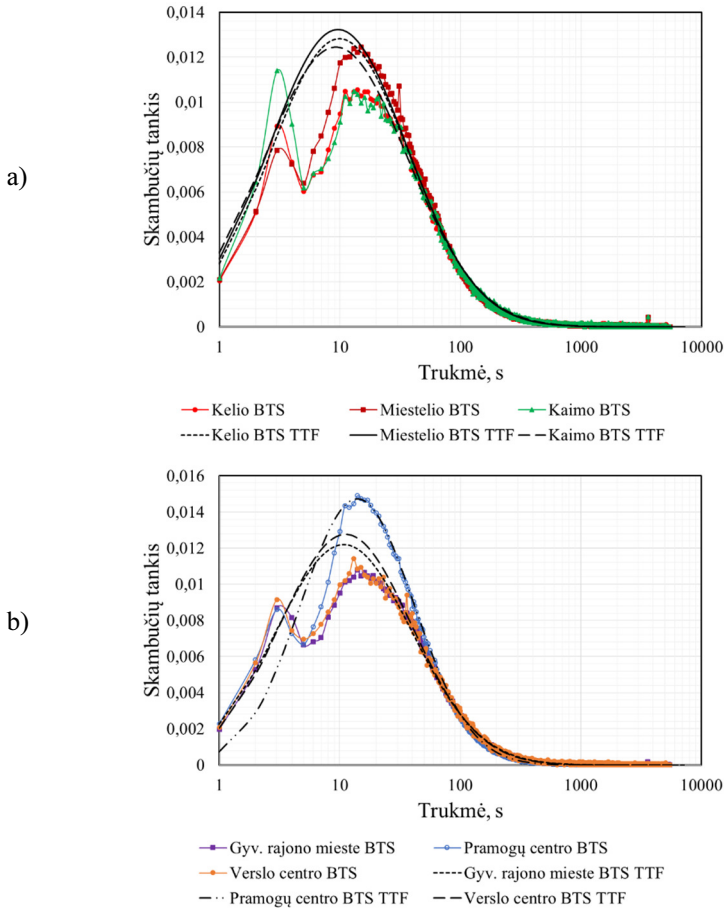
$$\mu=\ln\left(\frac{m^2}{\sqrt{v+m^2}}\right); \quad (2.2)$$

$$\sigma=\sqrt{\ln\left(1+\frac{v}{m^2}\right)}. \quad (2.3)$$

Kintamasis  $x$  yra skambučio trukmė. Formulėse  $m$  ir  $v$  yra skambučių trukmių vidurkis bei standartinė deviacija.

Apskaičiavus  $m$  ir  $v$  parametrus išmatuotiems skirstiniams, galima pastebėti jų verčių kitimą. Tai rodo, kad sudarytų vartotojų grupių skambučių trukmės nėra vienodos. Išskirtine grupe laikytina pramogų centro vartotojų grupė, kurios trumpų skambučių skaičius yra didelis. Atlikus konkrečių vartotojų skambučių trukmių skirtingose teritorijose tyrimą, paaiškėjo, kad tie patys tinklo vartotojai būdami skirtingose vietose yra linkę keisti savo bendravimo stilių.

Grįžtant prie pirmosios skirstinių dalies reikėtų pabrėžti, kad kreivės kitimo tendencija yra sudėtingesnė. Pirmoji visų grupių skirstinio dalis neatitinka log-normaliojo skirstinio. Neatitikimai pasireiškia nepriklausomai nuo to, kur buvo atliktas balsų skambutis. Tai matyti 2.9–2.10 paveiksluose, kur vartotojų grupių skirstiniai grupuojami pagal balsų skambučio vietą: mieste ir priemiestyje. Miesto grupei priklauso gyvenamųjų rajonų, pramogų ir verslo centrų grupės, o priemiesčių – kelio, miestelio ir kaimo grupės. Grafikuose pateiktos vartotojų grupių tikimybės tankio funkcijos (TTF), aproksimacijai naudojant log-normalųjį pasiskirstymą. Pateikti grafikai pristato dviejų skirtingų ryšio operatorių vartotojų grupių skambučių trukmių pasiskirstymą to paties tipo vartotojų grupėse. Atitinkamai paveiksluose: a) 1 operatorius, b) 2 operatorius.

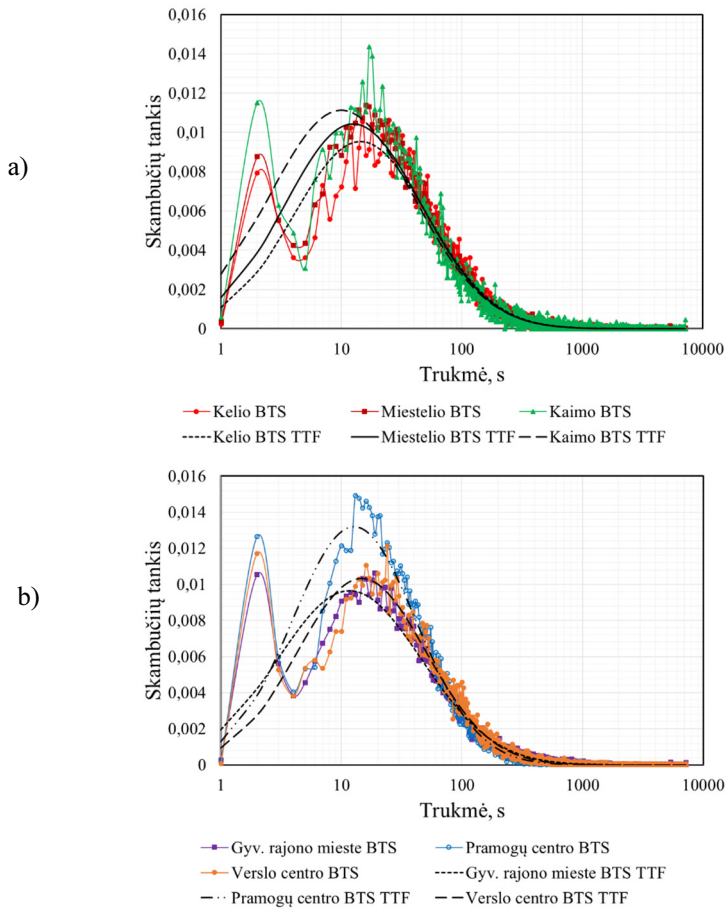


**2.9 pav.** Pirmojo operatoriaus skambučių trukmių skirstiniai ir jų tikimybės tankio  $f$ -jos:  
 a) priemiestyje; b) mieste

**Fig. 2.9.** Call durations and their probability density functions for first operator:  
 a) suburban; b) urban

Iš grafikų matyti, kad aproksimavimas log-normaliuoju pasiskirstymu netinka nė vieno skirstinio pradžiai, kuri susidaro dėl didelio trumpų skambučių skaičiaus. Antroji skirstinio dalis praktiškai sutampa su aproksimacija. Skambučių trukmių skirstinių pradžioje neatitiktimai atsiranda dėl stipriai padidėjusio trumpų skambučių skaičiaus, kurie trunka 2–3 s. Analizė parodė, kad didelis skaičius trumpų skambučių korinio ryšio sistemose yra sąlygotas peradresuotų (atsiliepia auto atsakiklis) skambučių.





**2.10 pav.** Antrojo operatoriaus skambučių trukmių skirstiniai ir jų tikimybės tankio f-jos: a) priemiestyje; b) mieste

**Fig. 2.10.** Call durations and their probability density functions for second operator: a) suburban; b) urban

Skambučių peradresavimas buvo sukurtas *GSM* plėtros laikotarpiu, kaip išplėstinė funkcija. Kaip paslauga pradėta naudoti vėliau, o šiomis dienomis skambučių peradresavimas taikomas labai įvairiapusiškai. Tokio tipo skambučiai yra būdingi daugeliui mobiliojo ryšio tinklų. Pagrindinė jų paskirtis nukreipti vartotojo skambutį į kitą numerį susidarius tam tikroms sąlygoms. Vartotojas nustatyti skambučių peradresavimą gali ir pats, tačiau dažniausiai skambučio peradresavimas įvyksta dėl korinio ryšio tinklų konfigūracijos. Įprastai skambučio peradresavimas vykdomas, kai skambučio gavėjas yra užimtas ar nepasiekiamas. Pastaraisiais atvejais, tikslo nepasiekę skambučiai yra nukreipiami į auto atsakiklius, todėl

sugeneruojami dideli trumpų skambučių srautai. Vartotojas girdi auto atsakiklio pranešimą, kad kita pusė yra nepasiekiamą ar užimta. Dažniausiai vartotojas nėra linkęs klausytis girdimo pranešimo iki galo ir skambutį nutraukia.

Aptarto pobūdžio skambučiai sudaro apie 11–15 % visų skambučių kiekviename vartotojų grupėje (Žvinys *et al.* 2014). Technologiniu požiūriu peradresuoti skambučiai nesiskiria nuo įprastų balso skambučių. Jiems yra sukuriama balso kanalas taikant grandinių komutacijos principus, išskiriami kiti reikiami tinklo ištekliams sujungimui sudaryti. Skambučio peradresavimas padidina skambučio sujungimo laiką. Paprastai tyrimuose, tokio tipo skambučiai neaptariami. Didelė dalis balso skambučių trukmių tyrimų buvo atlikta klasikinės telefonijos tinkluose, kuriuose trumpų skambučių efektas nebuvo jaučiamas. Toks didelis trumpų skambučių egzistavimas yra įtakotas šiuolaikinės telefonijos principų. Tyrinėjant individualius vartotojus trumpi skambučiai taip pat gali nepasitaikyti, arba jų yra labai mažai. Todėl skambučių trukmių skirstinių pradžiams, kurios apima trumpus skambučius dėmesys dažnai neskiriamas.

Peradresuoti skambučiai gali vykti tik pradėdant skambutį, o ne jį priimant. Ar vykdomas skambutis bus peradresuotas priklauso nuo *UE* ieškos procedūros rezultato. Ieškos procedūra naudojama koriniame tinkle aptikti *UE* ir informuoti jį apie įeinantį skambutį. Jei ieškos procedūros rezultatas yra neigiamas įvyksta peradresavimas.

Taikant mažiausių kvadratų metodą gauti nagrinėjamų skambučių trukmių skirstinių aproksimacijų determinacijos koeficientai skirtingoms vartotojų grupėms. Determinacijos koeficientai 2.1 lentelėje.

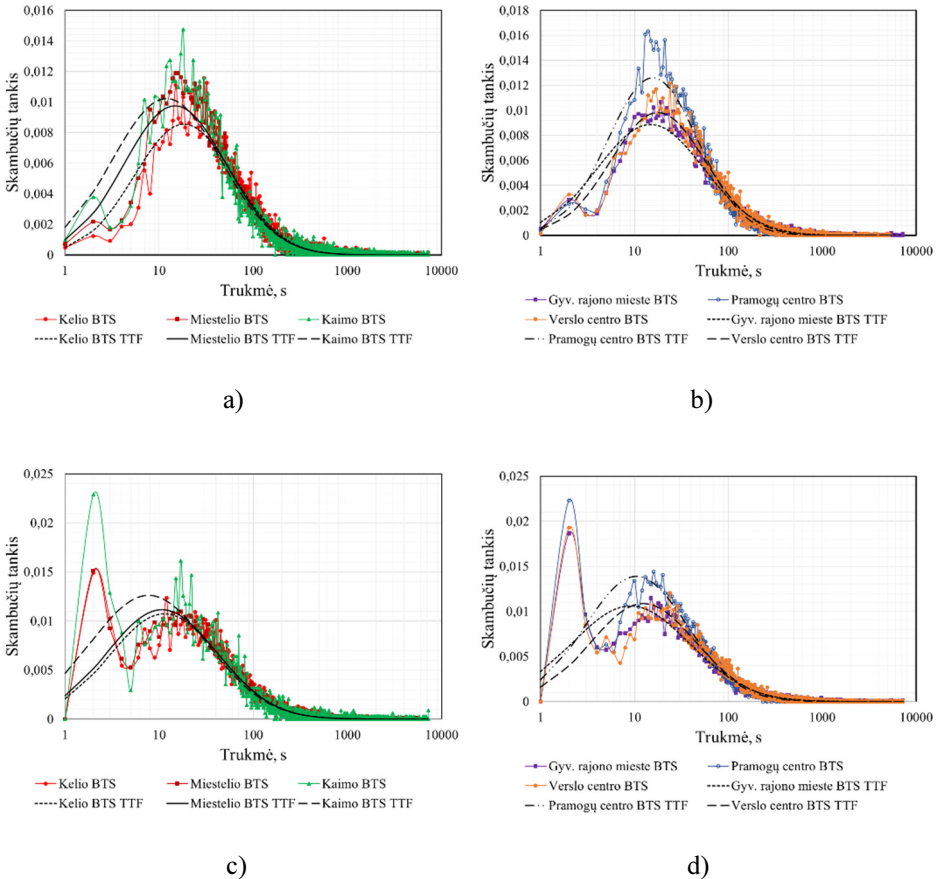
### 2.1 lentelė. Vartotojų grupių skirstinių aproksimacijų determinacijos koeficientas

**Table 2.1.** Determination coefficient of approximations for user groups

Vartotojų grupė	Kelio	Miestelio	Kaimo	Gyv. rajono mieste	Pramogų centro	Verslo centro
$R^2$	0,9886	0,9894	0,9856	0,991	0,9958	0,9914

Toliau pateikti atskirų vartotojų grupių skambučių trukmių skirstiniai atskirti pagal skambučio tipą: įeinantys ir išeinantys. Skirstiniai aproksimuoti log-normaliaja funkcija. Skirstiniai su įeinančiais skambučiais neturi peradresuotų skambučių, o skirstiniuose su išeinančiais skambučiais jie yra. Rezultatai sudarytų skirstinių ir jų TTF pavaizduoti 2.11 paveiksle. Įeinančių skambučių skirstinių forma kinta skirstinių pradžioje. Trumpų skambučių pasitaikymo dalis sumažėjo nuo trijų iki šešių kartų, atitinkamai visų vartotojų grupių įeinančių skambučių skirstiniuose. Visiškai trumpi skambučiai neišnyko, tačiau likusieji nepriklauso perad-

resuotų skambučių kategorijai. Likę skambučiai priklauso įprastiems balso skambučiams. Nedidelis trumpų įeinančių skambučių kiekis koriniame tinkle yra natūralus, nes tam tikrą informacijos kiekį žmogus sugeba perduoti per keletą sekundžių. Šis laikas gali skirtis priklausomai nuo kalbos savybių.



**2.11 pav.** Įeinančių ir išeinančių skambučių trukmių skirstiniai ir jų tikimybės tankio funkcijos: a) 1 operatorius priemiestyje; c) 2 operatorius priemiestyje; b) 1 operatorius mieste; d) 2 operatorius mieste

**Fig. 2.11.** Distributions of call duration and their probability density functions for incoming and outgoing calls: a) 1 operator suburban; c) 2 operator suburban; b) 1 operator urban; d) 2 operator urban

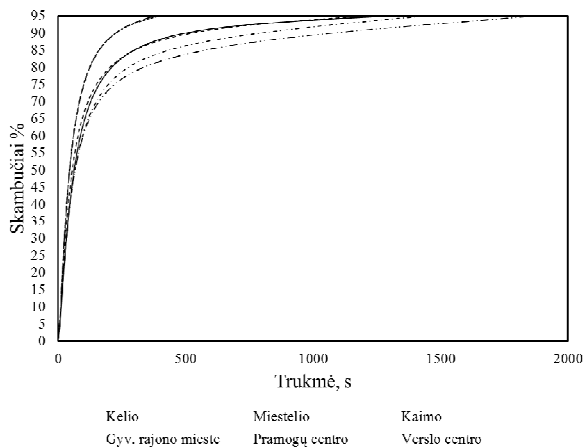
Naujai gautiems tik įeinančių skambučių skirstiniams pritaikius aproksimaciją log-normaliąja funkcija matyti, kad pastaroji daug tiksliau tinka tokio tipo skirstiniams aproksimuoti. Tai patvirtina literatūroje aptinkamus duomenis, kai

aprosimuojami tik iš klasikinių balsų skambučių sudaryti skirstiniai. Tuo tarpu nagrinėjant tik išeinančių skambučių skirstinius stebimas žymus trumpų skambučių padidėjimas. Šiems skirstiniams taikant log-normaliąją aproksimaciją visiškai nepataikoma į skirstinio pradžią, o skirstinio pabaiga aproksimuojama gana tiksliai, kaip ir visų skambučių grupėse atveju. Tokiems skirstiniams aproksimuoti naudojamos sudėtinės funkcijos. Svarbu, kad peradresuotų skambučių poveikis korinio ryšio tinklui keičia balsų skambučių srauto modelį. Tinklo elementuose išauga signalizacijos pranešimų srautas, kinta tinklo rodikliai. Planuojant tinklo stočių talpą aptarti skambučiai turi būti įtraukti sudarant vartotojų srautų modelį.

### 2.1.2. Balsų skambučių vartotojų grupių elgsenos skirtumai

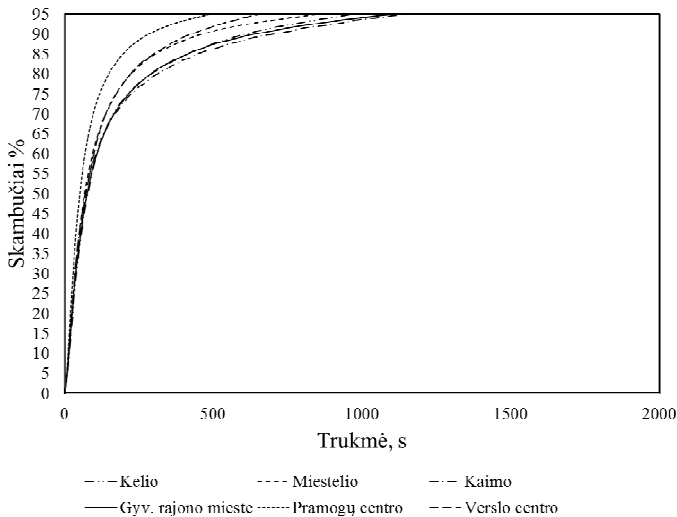
Korinio ryšio tinklo vartotojų įpročiai yra priklausomi nuo daugelio veiksnių. Juos lemia ne tik žmogaus būdas, bet ir išoriniai veiksniai. Charakterizuoti juos vienu rodikliu labai sunku, tačiau nesuklysimė pasakę, kad tinklo vartotojų įpročius stipriai įtakoja ir teikiamų paslaugų kokybė. Skirtingų studijų rezultatai rodo, kad vartotojo srauto modelis priklauso ne tik nuo tinklo pajėgumo, tačiau yra susijęs su konkrečiomis paslaugomis. Vartotojo srauto modeliui nustatyti pasitelkiamos Markovo grandinės, analizuojamas vartotojų elgesys skirtinguose paslaugų naudojimo scenarijuose (Yang *et al.* 2015, Jin *et al.* 2013, Tsompanidis *et al.* 2014).

Analizė rodo, kad skirtingų operatorių vartotojai elgiasi panašiai tomis pačiomis aplinkybėmis, jų skambučių trukmė susijusi su esama vieta (2.12–2.13 pav.).



2.12 pav. Kumuliacinės vartotojų grupių skambučių trukmių pasiskirstymo funkcijos pirmojo operatoriaus tinkle

Fig. 2.12. Cumulative distribution functions of call durations for user groups 1st operator



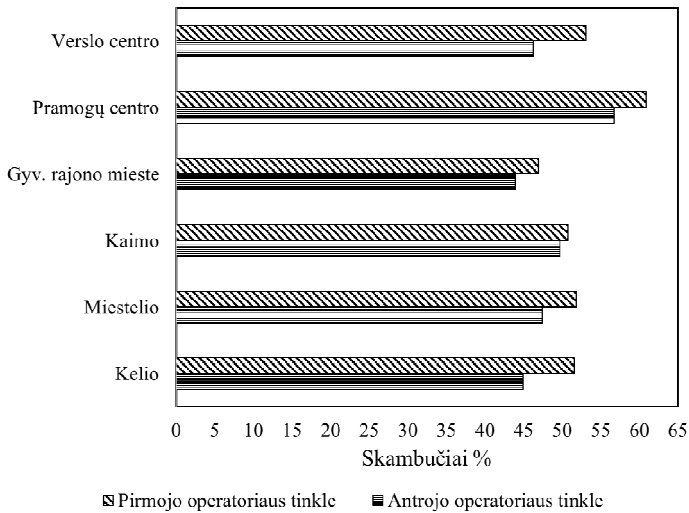
**2.13 pav.** Kumuliacinės vartotojų grupių skambučių trukmių pasiskirstymo funkcijos antrojo operatoriaus tinkle

**Fig. 2.13.** Cumulative distribution functions of call durations for user groups of 2nd operator

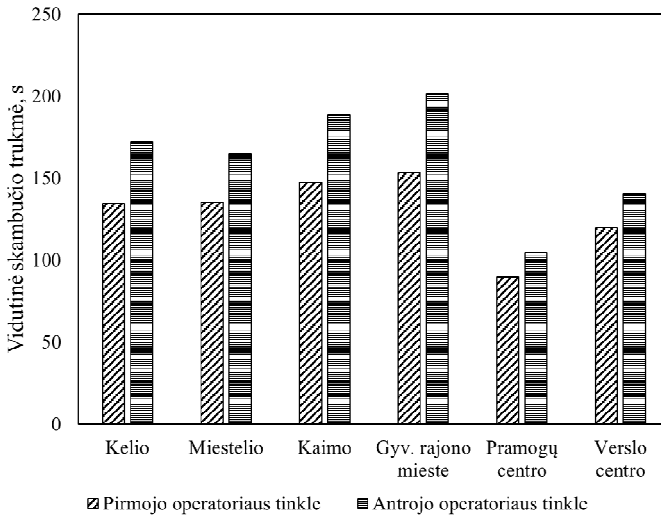
Gauti skambučių trukmių skirstiniai rodo, kad išskirtinai kitokios vartotojų grupės yra susikoncentravusios pramogų ir verslo centruose. Juos skiriantis bruožas yra dominuojantys trumpi balso skambučiai lyginant su kitomis grupėmis. Pirmojo operatoriaus atveju vartotojų esančių verslo ir pramogų centruose balso paslaugų naudojimo įpročiai praktiškai nesiskiria. Kumuliacinės pasiskirstymo funkcijos šioms vartotojų grupėms beveik sutampa. Antrojo operatoriaus tinkle pramogų ir verslo centrų vartotojų elgsena tokia pati, šios dvi grupės priklauso trumpiausiai kalbančioms. Antrojo operatoriaus atveju verslo centruose esantys vartotojai skiria daugiau laiko pokalbiui nei pramogų centre.

Bendrai 95 % balso skambučių trukmė pramogų ir verslo centro grupėse yra ne ilgesnė nei 10 min., o daugiau nei pusę visų skambučių nesiekia 1 min. trukmės. Pirmojo operatoriaus tinkle aptariamose grupėse 95 % skambučių vyko trumpiau nei 7 min., o antrajame operatoriuje šiek tiek ilgiau (Žvinys, 2016). Skambučio trukmės atžvilgiu šios grupės pasižymi dar ir tuo, kad jų vidutinė skambučio trukmė yra iki 30–40 % trumpesnė nei kitų grupių.

Žemiau 2.14 ir 2.15 paveiksluose pateikti grafikai rodo trumpų skambučių procentinę pasiskirstymą tarp vartotojų grupių skirtingose vietose ir grupių vidutinės skambučio trukmės.



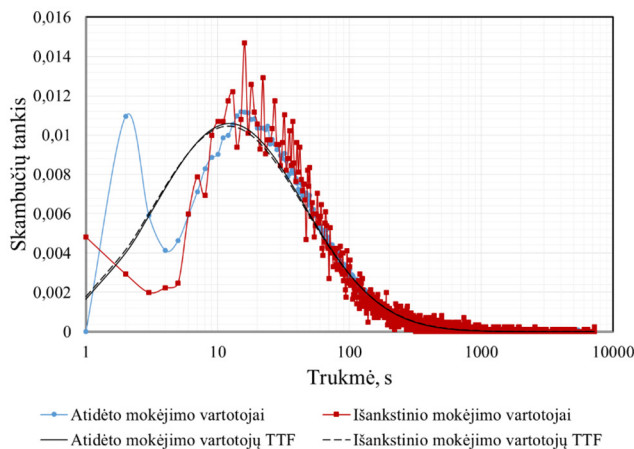
**2.14 pav.** Trumpų balso skambučių (iki 1 min.) pasiskirstymas vartotojų grupėse  
**Fig. 2.14.** Distribution of short calls (up to 1 min.) of user groups



**2.15 pav.** Vidutinių balso skambučių trukmių pasiskirstymas vartotojų grupėse  
**Fig. 2.15.** Distribution of average voice call duration for user groups

Daug trumpų skambučių verslo ir pramogų centruose yra susiję su pačia mažiausia vidutine skambučio trukme šiose vietose. Tai leidžia teigti, kad vartotojai būdami savo darbo ir pramogų vietose nėra linkę užtešti pokalbių. Bendrai visų vartotojų grupių atveju trumpų skambučių tikimybė yra didesnė nei 40 % abiejų operatorių tinkluose. Vadinasi, tinkluose pasireiškia gana stipri signalizacinių pranešimų apkrova pradedant ir baigiant skambutį, tačiau trumpi skambučiai leidžia turėti didelę tinklo talpą bei užtikrinti žemą blokavimosi tikimybę. Priemiesčių vartotojų grupėse, ryškesnio išskirtinumo nepastebima. Vidutinė skambučio trukmė ir bendras balso pokalbių trukmių pasiskirstymas tarpusavyje yra panašūs. Šiek tiek ilgesni skambučiai pasitaiko kaimiško tipo vietovėse ir tai būdinga abiem operatoriams. Gyvenamojo mikro rajono mieste grupė pasižymi ilgiausiais balso skambučiais. Šios grupės vartotojai skambučius atlieka iš miegamųjų miestų rajonų. Grupės vartotojai yra linkę atlikti ilgus skambučius, kurių vidutinė trukmė siekia iki 3,5 min. Lyginant su pramogų centru vartotojais tai du kartus ilgiau. Pastebėjimas leidžia paprieštarauti sutinkamam teiginiui, kad mobiliojo ryšio vartotojų elgsena yra nepriklausoma nuo jų buvimo vietos. Teigiama, kad vartotojai balso paslaugomis namuose naudojami vienodai kaip ir darbo vietose (Dong *et al.* 2013). Gauti rezultatai rodo, kad būdami namuose vartotojai daugiau laiko skiria bendravimui telefonu.

Korinio ryšio tinklo vartotojus galima analizuoti ir pagal jų tipą, taikant skirtingas paslaugų apmokėjimo strategijas. Pastarosios dažniausiai būna dvi: išankstinio ir atidėto apmokėjimo už paslaugas. Balso paslaugų skambučių trukmes suskirsčius į šias kategorijas gaunami rezultatai, pateikti 2.16 paveiksle.



**2.16 pav.** Atidėto ir išankstinio apmokėjimo už paslaugas vartotojų skambučių trukmių skirstiniai ir jų tikimybės tankio funkcijos

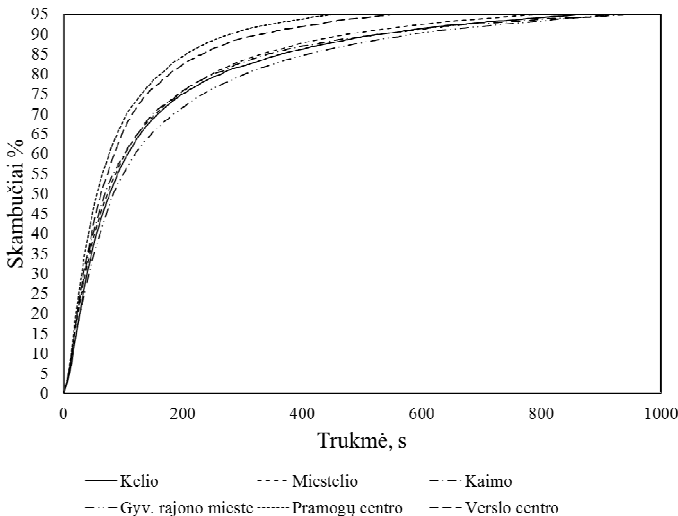
**Fig. 2.16.** Distributions of voice call duration and their probability density functions for postpaid and prepaid user groups

Atidėto ir išankstinio apmokėjimo už paslaugas vartotojai pagal skambučių trukmes koriniame ryšio tinkle nesiskiria. Tai reiškia, kad nesvarbu ar klientas pirmiau papildė savo sąskaitą ir ją naudoja paslaugoms, ar apmokėjimą atlieka tik pasinaudojęs paslaugomis. Šių vartotojų skirstiniams pritaikius aproksimaciją log-normaliąja funkcija matyti, kad skirstinių  $m$  ir  $v$  parametrai vienodi, todėl skirstiniai sutampa. Didesnė trumpų skambučių dalis atidėto mokėjimo už paslaugas vartotojams pasireiškia dėl daug didesnio tokių vartotojų skambučių skaičiaus, nes tokių vartotojų tinkluose yra kur kas daugiau.

### 2.1.3. Balsų skambučių trukmės pasiskirstymas pagal naudojamą technologiją

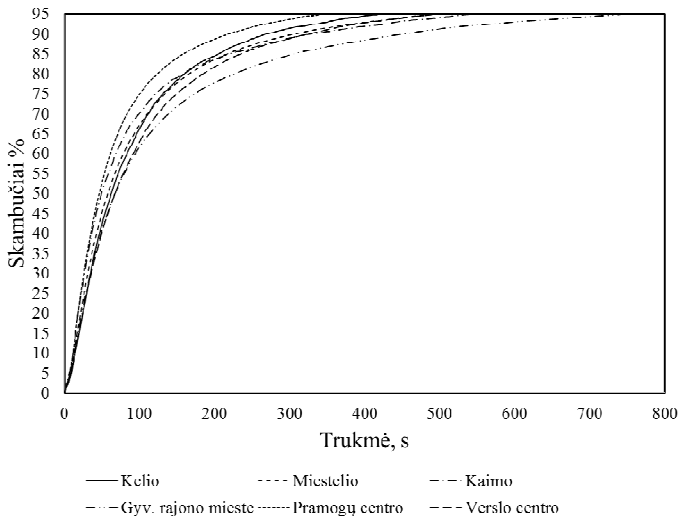
Vartotojų pasiskirstymą tarp skirtingų ryšio technologijų įtakoja daugiafunkcinė vartotojų įranga ir ryšio sąlygos. Priklausomai nuo radijo sąlygų vartotojai budėjimo režime ar aktyvios sesijos metu yra perjungiami ne tik tarp skirtingų tinklo ląstelių, tačiau ir tarp skirtingų technologijų tinklų.

Tyrimo balsas perduotas tik *GSM* arba *UMTS* ryšio tinklais. Skambučiai iš *LTE* tinklo nukreipiami į *GSM* ar *UMTS* tinklą suveikus *CSFB*. Stebėta balsinių skambučių trukmių priklausomybė nagrinėjamoje vartotojų grupėje priklausomai nuo ryšio technologijos naudotos balsų skambučiui perduoti (2.17–2.18 pav.).



2.17 pav. Balsų skambučių trukmių pasiskirstymas *GSM* technologijoje  
 Fig. 2.17. Distributions of voice call duration for GSM technology





**2.18 pav.** Balsų skambučių trukmių pasiskirstymas UMTS technologijoje  
**Fig. 2.18.** Distributions of voice call duration for UMTS technology

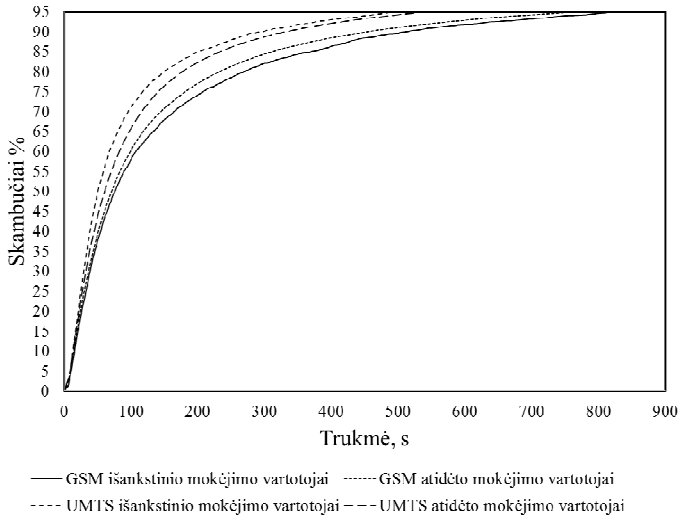
Gauti duomenys rodo, kad skambutis 2G tinkle trunka ilgiau. Tai lemia ne vartotojų įpročiai, o vietos radijo aplinka. Ilgesni skambučiai 2G tinkle pasitaiko vartotojų grupėse, priklausančiose kelio, miestelio, kaimo ar gyvenamojo rajono mieste grupei. Pramonų ir verslo centro atveju skirtumų tarp skambučio trukmės naudojant 2G ar 3G technologiją nepastebima. Priežastis yra vidinės tinklo ląstelės, kurios įrengiamos verslo ir pramonų centrų patalpose signalui užtikrinti. Tyrime analizuoti centrai tokias ląstelės turėjo. Vartotojai šiuose centruose pirmiausiai jungiasi prie šių 2G/3G ryšio ląstelių, o vartotojus iš aplinkinių pastatų ir lauke aptarnauja makro stotys.

Ilgą skambučio laiką 2G tinkle lėmė ir operatoriaus skambučių perjungimo tarp ryšio technologijų strategija. Nagrinėjamų tinklo stočių atveju perjungimai sujungimo fazėje vykdomi tik viena kryptimi iš 3G į 2G. Atgal į 3G tinklą vartotojos sugrįžta tik budėjimo režime. Ilgai trunkantys skambučiai GSM tinkle rodo, kad didelė dalis skambučių vyksta patalpų viduje, kur 3G signalas yra silpnas. Dėl signalo slopinimo patalpose skambutis yra perjungiamas į žemesnio dažnio ląsteles. Tyrimuose naudotos tinklo ląstelės veikė 2100 MHz dažnių ruože 3G tinkle bei 900 MHz ruože 2G tinklo atveju.

Atsižvelgus į pastebėjimus, galima sakyti, kad ryšio technologija neturi įtakos balsų skambučio trukmei. Jei vartotojas yra patikimo ryšio zonoje skambučio trukmė priklausys tik nuo jo įpročių.

Balsų skambučių trukmių rezultatai, pagal skambučio metu naudotą ryšio technologiją ir vartotojus skirstant į atskiras kategorijas pagal paslaugų

apmokėjimo rūšį, patvirtina anksčiau išdėstytas mintis. Skambučių trukmių pasiskirstymas tarp atidėto ir išankstinio apmokėjimo vartotojų pateiktas 2.19 paveiksle.



**2.19 pav.** Atidėto ir išankstinio mokėjimo planų vartotojų skambučių trukmių skirstiniai pagal naudotą technologiją

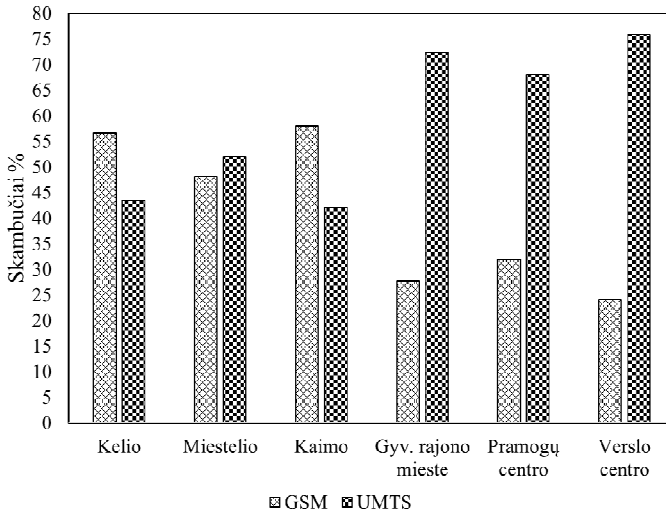
**Fig. 2.19.** Distributions of voice call duration for postpaid and prepaid user groups based on used technology

Iš pateikto grafiko matyti, kad *GSM* technologijos atveju abiejų tipų vartotojų skambučio trukmė yra artima. Tas pats pasakytina ir apie *UMTS* skambučio trukmes. Vartotojų, skirtingai mokančių už balso paslaugas, skambučių trukmės pagal naudojamą ryšio technologiją yra labai panašios. 2.19 paveiksle pateikti duomenys apima visų nagrinėjamų vietovių vartotojų balso skambučius.

Įdomu tai, kad nors gyvenamųjų rajonų miestuose vartotojų grupė praktiškai nesiskiria nuo kelio, kaimo ir miestelio grupių pagal *GSM* skambučio trukmių pasiskirstymus, bet joje pasitaikančių *GSM* skambučių skaičius yra beveik mažiausias. Bendras skambučių skaičius pagal skambučiu naudotą technologiją grupėse pateiktas 2.20 paveiksle.

Pasiskirstymas rodo, kad didelė dalis skambučių *GSM* tinklu atliekama priemiesčių grupėse. Kelio ir kaimo vartotojų grupės yra lyderiaujančios šiuo aspektu. Tam įtakos turi prasčiau išvystyta *UMTS* tinklo infrastruktūra šiose vietose (Judriojo ryšio tinklų tikėtinos aprėpties zonos, 2016). Verslo ir pramogų

centruose didžioji dalis skambučių atliekama *UMTS* tinkle, per vidines tinklo ląsteles.



**2.20 pav.** Bendras visų skambučių pasiskirstymas grupėse pagal naudotą technologiją  
**Fig. 2.20.** Total voice call distribution based on used technology

Išskirtine grupe galime laikyti gyvenamųjų miesto mikro rajonų vartotojų grupę. Santykinai didelis 3G balso skambučių pasiskirstymas rodo, kad šiose vietose vartotojų galinė įranga yra technologiškai pažangi. Šie balso skambučių pasiskirstymo duomenys rodo, kad priemiesčių ir miesto tinklo ląstelių balso apkrova yra skirtinga ryšio technologijų požiūriu. Tinklų operatoriams būtina į tai atkreipti dėmesį planuojant būsimą tinklo apkrovą.

## 2.2. Balso srauto pasiskirstymas taikant skambučių balansavimą

Gauti balso skambučių trukmių pasiskirstymo rezultatai priklausomai nuo vartotojų buvimo vietos rodo, kad balso srautas tinkle pasiskirsto nevienodai. Priemiesčiuose *GSM* ir *UMTS* skambučių santykis yra panašiai vienodas, tačiau miestų zonose vyrauja du ar tris kartus didesnis balso skambučių pradėtų 3G tinkle skaičius. Tokia balso skambučių srauto pasiskirstymo tendencija yra tinkama balso srauto balansavimui. Balso skambučių balansavimas iš *UMTS* ryšio technologijos

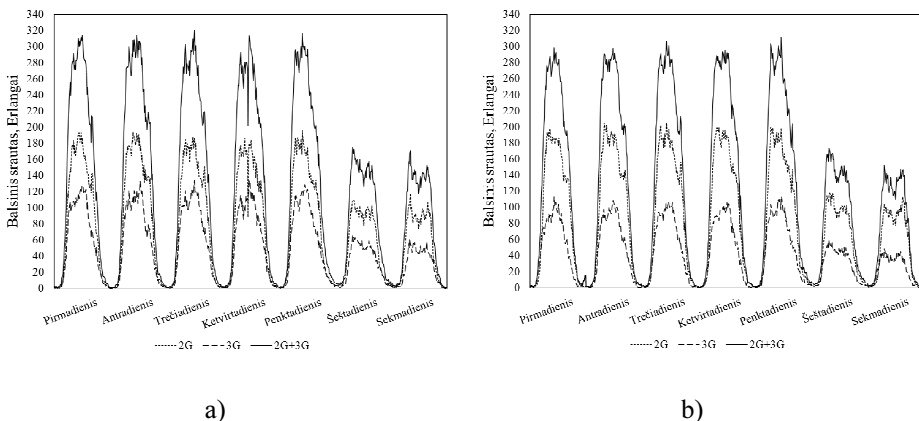
perkeliant į *GSM* ryšio ląsteles leidžia užtikrinti 3G išteklių prieinamumą duomenų perdavimo paslaugoms.

Tyrimo tikslais viename iš Lietuvos mobilioji ryšio operatorių tinklų buvo įgyvendinti balso skambučių srauto balansavimo metodai aptarti pirmajame darbo skyriuje. Keturiuose didžiuosiuose Lietuvos miestuose buvo pasirinktos šešios tinklo bazinės stotys, kurių balso srauto apkrova *UMTS* tinklo ląstelėse yra didelė. Pasirinktų tinklo stočių konfigūracija atitinka tipines korinio ryšio tinklų bazines stotis. Ląstelių kryptys tarpusavyje skiriasi 120 laipsnių. *GSM* ir *UMTS* ląstelių azimutas yra vienodas. Analizės tikslas įvertinti srauto valdymo metodų efektyvumą paskirstant vartotojų balso srautą heterogeninėje tinklo topologijoje. Šiuo tikslu vertinama srauto balansavimo įtaka tinklo vartotojams ir tinklui.

Parinktose tinklo bazinėse stotyse skambučių perkėlimui iš 3G ryšio sistemų į 2G technologiją nagrinėti trys skirtingi balso skambučių vartotojų perkėlimo scenarijai:

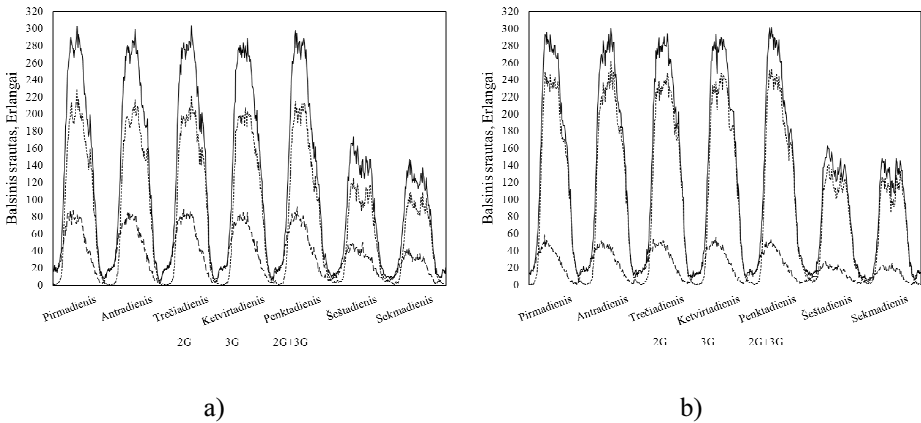
1. Konfigūracija leidžia perkelti ketvirtadalį balso skambučių vykstančių *UMTS* tinkle, kai ląstelės nešlio slenkstinė galia viršijama 50 %.
2. Konfigūracija leidžia perkelti absoliučiai visus balso skambučius viršijus tą pačią slenkstinę galios ribą.
3. Konfigūracija veikė taikant pačią agresyviausią taktiką, kai nepriklausomai nuo nešlio galios perkeliama visi vartotojai naudojantys tik balso pernašos *RAB*.

Suminio visų ląstelių balso srauto pasiskirstymo rezultatai esant skirtingoms srauto balansavimo taisyklėms pateikti 2.21–2.22 paveiksluose.



**2.21 pav.** Balso skambučių srauto pasiskirstymas: a) netaikant srauto balansavimo; b) srauto pasiskirstymas perkeliant 25 % vartotojų viršijus 50 % nešlio galios

**Fig. 2.21.** Distribution of voice traffic: a) when load balancing is not used; b) distribution of voice traffic, when 25% of users are transferred, when bearer power exceeds 50%

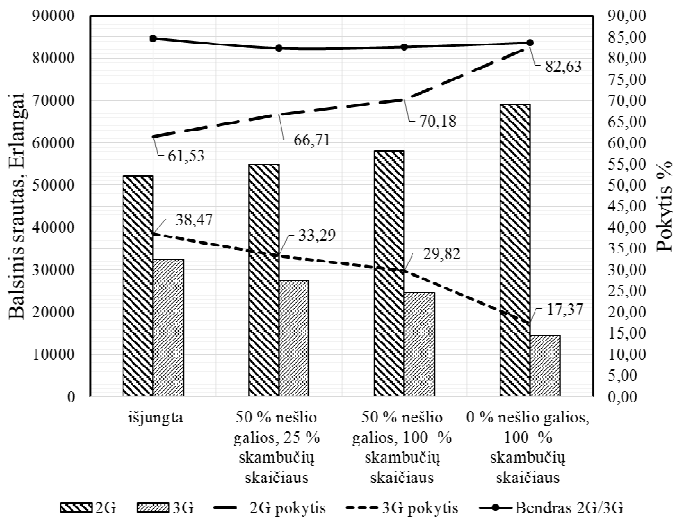


**2.22 pav.** Balsų skambučių srauto pasiskirstymas: a) srauto pasiskirstymas perkeltiant visus vartotojus viršijus 50 % nešlio galios; b) srauto pasiskirstymas perkeltiant visus vartotojus nepaisant viršytos nešlio galios

**Fig. 2.22.** Distribution of voice traffic: a) distribution of voice traffic, when all users are transferred, when bearer power exceeds 50%; b) distribution of voice traffic, when all of users are transferred despite the exceeded bearer power

Grafikuose pateiktas vartotojų balsų skambučių srauto pasiskirstymas esant skirtingoms skambučių valdymo taisyklėms. Balsų skambučių pasiskirstymas laiko ašyje yra determinuotas, priklausomas nuo vartotojų aktyvumo. Dėl to matomas balsų skambučių srauto suintensyvėjimas dienos metu, o naktimis srautas stipriai sumažėja. Bendrai, tiriamose tinklo ląstelėse 60 % balsų srauto yra perduodama GSM tinklu, o 40 % UMTS tinklo ląstelėmis. Toks pasiskirstymas gautas kai balsų skambučių srauto valdymas netaikomas (2.21 pav. (a)). Remiantis balsų skambučių trukmių tyrimo rezultatais, tikėtina, kad 3G balsų skambučių apkrova turėtų dar labiau augti. Augimas ypač tikėtinas priemiesčiuose. Didesnė 3G balsų skambučių dalis nei 2G ryšio sistemose sutinkama vakarų pasaulio valstybių korinio ryšio tinkluose.

Pritaikius balsų srauto balansavimą balsų skambučių apkrova GSM tinkle yra padidinama. Taikant ketvirtadaliu vartotojų perkėlimo strategiją balsų skambučių srautas 2G tinkle išauga 5 %. Agresyvesnės taktikos atveju (2.22 (a)), pavyksta perkelti apie 8 % balsų srauto. Trečiuoju atveju, kai naudojama pati agresyviausia balsų skambučių balansavimo strategija GSM balsų srautas padidėja daugiau nei 20 %. Tai reiškia, kad toks kiekis balsų skambučių inicijuotų UMTS tinkle su tik CS RAB užklausa buvo nukreipti į GSM ląsteles suveikus srauto balansavimui (Stirbys *et al.* 2014). Suminio balsų srauto erlangų kiekis išliko toks pats, tačiau srautas buvo perskirstytas. Perduoto balsų srauto pasiskirstymo rezultatai 2.23 paveiksle.



**2.23 pav.** Balso srauto pokytis esant skirtingoms srauto balansavimo taisyklėms

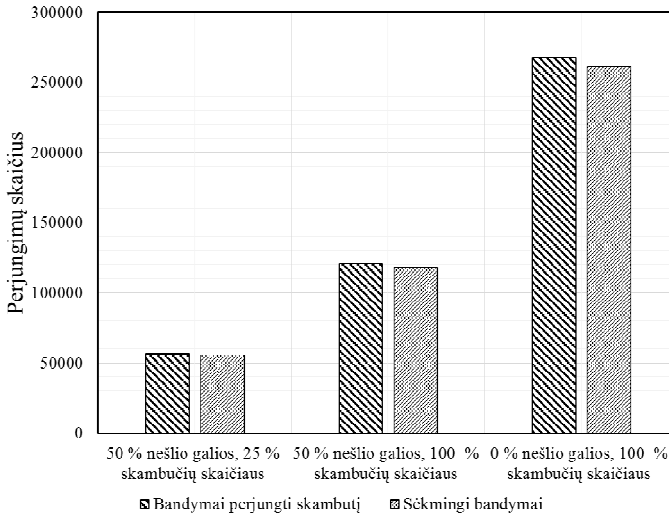
**Fig. 2.23.** The change of voice traffic based on different balancing rules

Balso skambučių srauto valdymo taisyklės tyrimo metu analizuojamose ląstelėse buvo keičiamos kas savaitę. Visų balso skambučių perkelti nepavyko, nes dalis vartotojų naudojo *multiRAB* paslaugas arba *GSM* ląstelės buvo visiškai užpildytos. Perkelta balso srauto dalis leido sumažinti 3G ląstelių apkrovą iki 20 %. Šie ištekliai gali būti panaudoti duomenų pernašos paslaugoms. Balso skambučius nukreipus į 2G ląsteles jų panaudojimas pagerėjo, laisvi iki tol nenaudoti ištekliai buvo priskirti tinklo vartotojams.

### 2.2.1. Balso skambučių sėkmingų perjungimų priklausomybė taikant balso srauto balansavimą

Perjungimai korinio ryšio tinklo ląstelėse naudojami užtikrinti sklandžiam vartotojų judėjimui tinklo ląstelėse ir paslaugų tęstinumui. Vartotojų mobilumo rodikliai yra vieni svarbiausių vertinant vartotojų patiriamą paslaugų kokybę. Prastas perjungimų santykis rodo, kad vartotojas nėra sėkmingai perkeliamas į geresnės kokybės tinklo ląsteles arba paslauga nutraukiama. Balso skambučių atveju prastas perjungimų santykis gali stipriai padidinti nutrūkusių skambučių tikimybę. Tyrimo metu, esant aktyviam srauto balansavimui balso skambučių perjungimų iš 3G į 2G sistemą skaičius išaugo gana stipriai. Lyginant nuosaikiausią srauto ba-

lansavimą su agresyviausia strategija fiksuotas bandymų perjungti skambučių pokytis skiriasi penkis kartus. Skambučių perjungimo rezultatai pateikti 2.24 paveiksle.



**2.24 pav.** Balso skambučių perjungimų iš 3G į 2G pokytis esant skirtingoms srauto balansavimo taisyklėms

**Fig. 2.24.** Attempts of voice call handover from 3G to 2G based on different balancing rules

Didinant perjungiamų balso skambučių skaičių, sėkmingų perjungimų sumažėjo 0,56 %, o bendras *U2G* (angl. *UMTS To GSM*) perjungimų sėkmės rodiklis nuo 98,04 % sumažėjo iki 97,48 %. Atsižvelgiant į išaugusį perjungimų kiekį galima teigti, kad srauto balansavimas neigiamos įtakos korinio ryšio tinklo vartotojų patirčiai naudojantis paslaugomis neturi. Prieš bandant perjungti vartotoją į kitą tinklo ląstelę tikrinamos perjungimo galimybės. Jei perjungimas neleidžiamas dėl ląstelės kandidatės išteklių trūkumo, bandomas perjungti skambutis sugrąžinamas į tą pačią tinklo ląstelę. Tinklo vartotojai vykdomų perjungimų nepajunta visiškai.

Kalbant apie nutrūkusius skambučių pokytį dėl srauto balansavimo įtakos pastebėta, kad didžiausias numestų skambučių kiekis atsiranda taikant agresyviausią skambučių perkėlimo metodą. Numestų skambučių kiekis padidėja apie 20 %, tačiau ir perkeltos balso srauto dalis padidėja tiek pat. Todėl santykinai srauto balansavimo taikymas nutrūkusius skambučių skaičiaus nepadidina. Bendras procentinis numestų skambučių skaičius nesikeičia.

### 2.2.2. 3G tinklo išteklių perskirstymas taikant balso srauto balansavimą

Pakankamas tinklo ląstelės išteklių užtikrinimas yra būtinas siekiant teikti kokybiškas telekomunikacines ryšio paslaugas. Susidūrus su išteklių trūkumu ląstelėse paslaugų kokybė stipriai prastėja, o nauji vartotojai nepriimami. *UMTS* technologijoje ląstelės talpą gali riboti keletas pagrindinių veiksnių: kanalų elementų kiekis ląstelėje, žemynkryptės galios išteklių ir aukštynkryptės interferencijos lygis ląstelėje (Romero *et al.* 2005). Kitaip tariant 3G ląstelės talpą riboja techninė įranga ir aplinkos radijo sąlygos. Dėl šios priežasties *UMTS* ląstelės vadinamos „kvėpuojančiomis“, kurių aprėpties zona kinta priklausomai nuo radijo sąlygų ir apkrovos.

Žemynkryptė ląstelės apkrova priklauso nuo bazinės stoties siųstuvo išspinduliuojamos galios ir vartotojų skaičiaus ląstelėje. Prisijungus vartotojui prie 3G ląstelės dalis ląstelės galios atitenka vartotojui. Kuo daugiau vartotojų ląstelėje, tuo didesnis galios sunaudojimas ir mažesnė ląstelės talpa. Vartotojui tenkantis galia ląstelėje tiesiogiai proporcinga paslaugos tipui. Balso skambučio metu vartotojas sunaudoja mažiau ląstelės galios nei duomenų perdavimo sesijos metu. Kuo toliau nuo bazinės stoties yra vartotojas, tuo daugiau ląstelės galios jam reikia. Jei ląstelėje arti bazinės stoties susikaupia daug vartotojų, galios toliau esantiems vartotojams nepakanka, jiems paslaugos nutrūksta. Didelis vartotojų skaičius tinklo ląstelėje sukelia didelį aukštynkrypties kanalo triukšmo lygį, todėl duomenų perdavimui reikalingos žemesnės *MCS* (angl. *Mobile Coding Schemes*). Sumažinus vartotojų skaičių tinklo ląstelėje sumažinamas triukšmo lygis, atlaisvinami ištekliai. Ląstelė tampa pajėgi priimti naujus vartotojus.

Aktyvavus balso srauto balansavimą pasirinktose *UMTS* technologijos tinklo ląstelėse stebėta tinklo ląstelės išteklių persiskirstymo rezultatai. Gauti duomenys rodo, kad didelės apkrovos tinklo ląstelėse stipriai sumažinamas balso skambučių užklausų skaičius. Tai atveria galimybes priimti naujus duomenų perdavimo paslaugų reikalaujančius tinklo vartotojus.

Tinklo ląstelių *RRC* ir *RAB* užklausų kiekio pokytis balso ir duomenų paslaugoms gauti skirtingų balansavimo taisyklių atvejais pateiktas 2.2 lentelėje. *RRC* užklausos tinklo ląstelėje rodo valdymo sesijų sistemoje talpą. Jei galimų *RRC* užklausų kiekis didėja, vadinasi nauji sujungimai tarp vartotojų ir tinklo ląstelių gali būti sudaryti. Tik sukūrus *RRC* sesiją oro sąsajoje tarp mobilaus įrenginio ir ląstelės, galimas paslaugos nešlio sudarymas. *RAB* paslaugos nešlys vartotojui priskiriamas vartotojo duomenis perduoti per tinklo ląstelę. Kuo daugiau *RAB* sesijų galima sudaryti tinklo ląstelėje, tuo didesnė vartotojų dalis gali būti aptarnauta.



**2.2 lentelė.** Balsų ir duomenų sesijų *RRC* ir *RAB* užklausų pokytis esant skirtingoms srauto balansavimo taisyklėms

**Table 2.2.** The change of *RRC* and *RAB* attempts for voice and data services based on different balancing rules

Sesijos tipas	Pokytis %, kai srauto valdymas vykdomas: 50 % nešlio galios, 25 % skambučių skaičiaus	Pokytis %, kai srauto valdymas vykdomas: 50 % nešlio galios, 100 % skambučių skaičiaus	Pokytis %, kai srauto valdymas vykdomas: 0 % nešlio galios, 100 % skambučių skaičiaus
Balsų sesijų <i>RRC</i> užklausos	-2,31	-3,76	-2,95
Duomenų sesijų <i>RRC</i> užklausos	1,44	8,51	6,54
Balsų sesijų <i>RAB</i> užklausos	-14,26	-30,89	-64,75
Žemynkrypčių duomenų sesijų <i>RAB</i> užklausos	1,76	4,05	5,92
Aukštynkrypčių duomenų sesijų <i>RAB</i> užklausos	1,61	6,18	8,59

Augant perkeliamų balsų skambučių skaičiui iš 3G ryšio sistemos į 2G bendras *RRC* protokolu siunčiamų sesijų užklausų skaičius didėja. Padidėjimas siekia 6 % lyginant tuomet, kai srauto balansavimas netaikomas. Priežastys lėmusios *RRC* sujungimų padidėjimą yra duomenų sesijų *RRC* protokolu užklausų išaugimas ir perjungimų padidėjimas. Tai rodo, kad atlaisvinti radijo kanalo išteklių, kurie buvo naudoti balsų paslaugoms teikti, dabar yra naudojami duomenų sesijoms oro sąsajoje valdyti. Didžiausias duomenų sesijų sujungimų skaičius pasiekiamas perkeliant daugelį balsų vartotojų, kai nešlio galia viršijama 50 % ir bandoma perkelti visus balsų paslaugų vartotojus. Šiuo atveju gaunama, kad *RRC* balsų sesijų sujungimo sukūrimui naudojamų signalizacijos išteklių kiekis yra minimalus. Dar agresyvesnės skambučių srauto balansavimo strategijos atveju visų skambučių perkelti į *GSM* sistemą nepavyksta, nes ląstelė yra perpildoma ir nebėgi priimti naujų vartotojų. Dalis balsų skambučių grįžta į 3G tinklo ląstelę ir kartoja *RRC* sesijų sujungimo užklausą. Be to multiRAB vartotojai taip pat riboja perkeltų skambučių kiekį. Naudoti pačią agresyviausią balansavimo taktiką nėra prasminga ir dėl to, kad tinkle suprastėja sėkmingų sesijų užmezgimo rodiklis.

Paslaugos nešlų pasiskirstymo atveju, kai *UE* naudoja tik balso pernašos *RAB*, agresyviausio scenarijaus metu balso sesijų *RAB* užklausų sumažėjimas siekia daugiau nei 60 %. Balso srauto *RAB* užklausų sumažėjimas tiesiogiai atspindi balso srauto sumažėjimą 3G tinkle, pavaizduotą 2.23 paveiksle. Dėl balso skambučių srauto balansavimo 3G tinklo *RAB* išteklių perleidžiami duomenų vartotojams. Lentelėje pateikti duomenys rodo, kad duomenų sesijų vartotojų skaičius tinklo ląstelėse išauga į abi puses. Pagerinami tinklo veiklos rodikliai susiję su duomenų sesijų vartotojų prieigos ir išteklių blokavimu. Vartotojų tinklo ląstelės išteklių blokavimo bei žemynkrypčio ir aukštynkrypčio kanalų prieigos blokavimo rezultatai taikant ir netaikant balso skambučių srauto balansavimą pateikti toliau.

**2.3 lentelė.** Tinklo ląstelės prieigos ir duomenų perdavimo kanalo blokavimo rezultatai netaikant bei taikant skambučių srauto balansavimą

**Table 2.3.** The results of cell access and data transfer channel blocking, when load balancing is applied and not applied

Rodiklis	Vartotojo prieigos blokavimo rodiklis, %	Dalinamo žemynkrypčio kanalo pralaidumo ribojimo rodiklis, %	Aukštynkrypčio kanalo prieigos blokavimo rodiklis, %
BS1 be balansavimo	12,50	15,75	21,63
BS1 su balansavimu	7,57	4,97	3,92
BS2 be balansavimo	5	8,28	9,15
BS2 su balansavimu	0,30	0,66	0,44

Tyrimo metu iš analizuojamo bazinių stočių klasterio parinktos dvi bazinės stotys, kuriose netaikant balso srauto balansavimo, ląstelės prieigos ir kanalo blokavimo rodikliai buvo aukšti. Gauti rezultatai rodo, kad bazinėse stotyse taikant balso skambučių srauto balansavimą, blokuojamų vartotojų skaičių pavyksta sumažinti 5 %. BS1 atveju gauta, kad per savaitę buvo perkelti 3025 vartotojai, tuo tarpu iš BS2 į *GSM* perkelti 496 vartotojai. Mažesnis blokuojamų prieigų skaičius leidžia išvengti signalizacijos pranešimų „audrų“ kylančių dėl didelio vartotojų srauto, bandant pakartotinai pasiekti tinklo ląstelę.

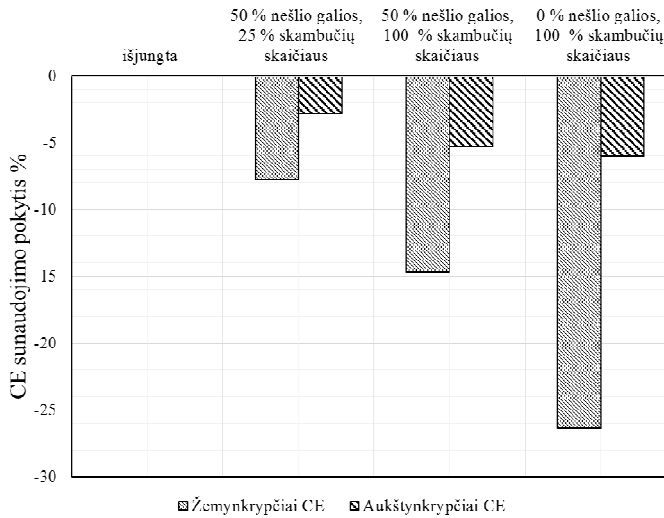
Kitas svarbus dalykas, kad stotyse veikiant srauto balansavimui sumažinami aukštynkrypčio *E-DCH* (angl. *Enhanced Dedicated Channel*) ir žemynkrypčio *HS-DSCH* (angl. *High Speed Dedicated Shared Channel*) kanalo pralaidumo blokavimosi rodikliai. Tai reiškia, kad bazinės stoties išteklių planuotojas *TTI* laiko

intervalą duomenims siųsti išskiria dažniau ir leidžia jį naudoti ilgiau. Dėl to pagerinama vartotojų paslaugų kokybė, nes duomenų perdavimo sparta padidėja. Stotyje BS1 žemynkrypčio kanalo pralaidos blokavimas sumažėjo tris kartus, tačiau dėl didelio duomenų poreikio daliai vartotojų duomenų parsisiuntimas išliko ribojamas. Šiuo atveju tik bazinės stoties išteklių plėtimas padėtų išspręsti talpos problemą. BS2 stotyje vartotojų dalinamo kanalo pralaidumo ribojimas sumažėjo iki minimumo. Aukštynkrypčio duomenų perdavimu metu *E-DCH* kanalo spartos ribojimas taip pat sumažėjo. Didesnė duomenų perdavimo sparta bazinės stoties kryptimi užtikrina, kad *UE* eteryje maksimalia galia spinduliuoja trumpiau, o tai stipriai sumažina aukštynkryptės interferencijos lygį tinklo ląstelėje ir pailgina *UE* baterijos gyvavimo laiką. Be balso srauto balansavimo BS1 stotyje duomenų išsiuntimo pralaidumo blokavimas buvo gana didelis. Pagrindė tai susiję su bazinės stoties kanalų elementų *CE* (angl. *Channel Elements*) stygiu, o tai riboja ląstelės talpą.

### 2.2.3. Kanalo elementų pasiskirstymas taikant balso srauto balansavimą

*UMTS* tinklo kanalo elementas yra pagrindinis vienetas, kuris apibrėžia bazinės stoties kanalo demoduliacijos galimybes. Kanalų elementų ištekliai yra priskiriami techninės įrangos išteklių grupei ir skirstomi į naudojamus aukštynkrypčiame ir žemynkrypčiame duomenų perdavime (Laiho *et al.* 2001). Kanalo elementai terminalui išskiriami suteikiant dalinamą *HS-DSCH* ar *E-DCH* kanalą, o išskirtų kanalų elementų skaičius tiesiogiai priklauso nuo naudojamos paslaugos tipo. Perduoti *AMR-NB* balso skambučių pakanka po vieną kanalo elementą abiem kryptimis, tačiau duomenų sesijos metu reikalingas didesnis kanalo elementų skaičius, nes nuo to priklauso perdavimo sparta. Pakankamas kanalo elementų išteklių skaičius bazinėje stotyje pagerina vartotojų patirtį naudojantis telekomunikacijų pernašos paslaugomis.

Taikant balso skambučių srauto balansavimą visame klasteryje žemynkrypčių *CE* sunaudojimo kiekį daugiausiai pavyksta sumažinti 26 %. Tai pasiekta, kai balso skambučiai perkeliama srauto balansavimui taikant pačią agresyviausią taktiką. Aukštynkrypčių kanalo elementų sutaupymas yra mažesnis. Taip yra, nes kanalo elementų sunaudojimas aukštynkrypčiame kanale, kai duomenys išsiunčiami bazinės stoties kryptimi yra žymiai didesnis. Didesnei duomenų perdavimo spartai pasiekti ryšio kanale reikalingas didesnis kanalo elementų skaičius, kuris tarpusavyje yra susijęs su išsiplėtimo faktoriaus verte. Bendras kanalo elementų pasiskirstymas esant skirtingoms skambučių srauto balansavimo konfigūracijoms pateiktas 2.25 paveiksle.



**2.25 pav.** Aukštynkrypčių ir žemynkrypčių kanalo elementų pasiskirstymas taikant skirtingas srauto balansavimo taisykles

**Fig. 2.25.** Distribution of uplink and downlink channel elements based on different balancing rules

Gauti duomenys rodo, kad net ir minimalus balso vartotojų skaičiaus perkėlimas iš *UMTS* technologijos į *GSM* ląsteles skambučiui atlikti, padeda padidinti tinklo talpą be papildomų investicijų. Tinklų operatoriai taikydami balso srauto balansavimo metodus gali išvengti išlaidų susijusių su įrangos plėtimu, dirbančios su skaitmeninių signalų apdorojimu.

#### 2.2.4. 2G skambučių blokavimas taikant balso srauto balansavimą

Balso srauto balansavimo nauda matoma tuomet, kai perkeliamas skambutis nėra akimirksniu sugražinamas į tą pačią tinklo ląstelę. Kad skambutis būtų perkeltas sėkmingai, ląstelės kandidatės talpa turi būti numatyta iš anksto arba vertinama realiuoju laiku. Ląstelės talpą įvertinti realiuoju laiku galima, jei naudojami *RIM* (angl. *RAN Information Management*) mechanizmai. Tuomet tinklo ląstelės tarpusavyje keičiasi savo apkrovos informacija. Analizės metu *RIM* funkcionalumas nebuvo prieinamas, todėl *GSM* ląstelių talpa vertinta iš anksto. *GSM* ląstelės talpą nusako siųstuvų skaičius. Jei *GSM* ląstelės transportinių *TCH* (angl. *Transport*

*Channel*) kanalų kiekis yra pakankamas, tada vartotojai blokuojami nebus. Tiriama bazinių stočių klasterio bazinės stotys pagal esamą transportinių kanalų apkrovą buvo suskirstytos į dvi grupes. Viena stočių grupė turi pakankamą *TCH* kanalų rezervą, o kitoje grupėje transportiniai laiko kanalai yra visiškai išnaudoti. Matavimų metu, suveikus balso srauto balansavimui, vartotojų blokuojamų skambučių pasiskirstymas ląstelėse kandidatėse pateiktas 2.4 lentelėje.

**2.4 lentelė.** Blokuotų balso skambučių 2G ryšio sistemoje pasiskirstymas taikant skirtingas srauto balansavimo taisykles

**Table 2.4.** Distribution of blocked voice calls in 2G system based on different balancing rules

Bazinė stotis		Blokuojami balsiniai skambučiai, kai srauto balansavimas neveikia	Blokuojami balsiniai skambučiai, kai srauto balansavimas vykdomas: 50 % nešlio galios, 25 % skambučių skaičiaus	Blokuojami balsiniai skambučiai, kai srauto balansavimas vykdomas: 50 % nešlio galios, 100 % skambučių skaičiaus	Blokuojami balsiniai skambučiai, kai srauto balansavimas vykdomas: 0 % nešlio galios, 100 % skambučių skaičiaus
Transportinių kanalų išteklių stotyse išnaudoti maksimaliai	BS1	1912	3244	2467	20984
	BS2	3173	5094	11802	12829
	BS3	1210	2863	28941	30291
Stotyse yra transportinių kanalų išteklių rezervas	BS4	0	3	0	178
	BS5	171	185	144	1310
	BS6	54	20	127	89

Akivaizdu, kad bazinėse *GSM* tinklo stotyse, kuriose laisvų *TCH* kanalų skaičius yra ribotas, bandant į jas perkelti naujus vartotojus, skambučių blokavimas stipriai padidėja. Skambučiai ląstelėse kandidatėse blokuojami ne iš karto. Pasiekus 70 % apkrovą balso vartotojai pradeda perjungti į žemesnės spartos balso

kodeką. Tik visiškai užpildžius transportinius kanalus nauji skambučiai blokuojami. Iš gautų duomenų matyti, kad GSM tinklo ląstelės kurių apkrova yra arti maksimalios neturėtų būti įtraukiamos į ląstelių kandidačių sąrašus srauto balansavimui. Tokias ląstelės naudojant srauto balansavimui prastėja balso kokybė (Kajackas *et al.* 2011), auga sujungimų signalizacijos srautai, didėja vartotojų nepasitenkinimas paslaugomis.

### 2.3. Antrojo skyriaus išvados

1. Pagal balso skambučio vietą, balso skambučių vartotojai sugrupuoti į šešias grupes, tai leido įvertinti balso srauto pasiskirstymą ir vartotojų elgsenos ypatumus skirtingose heterogeninio korinio ryšio tinklo vietose.
2. Nustatyta, kad trumpi (2–3 s.) balso skambučiai sudaro iki 15 % visų balso skambučių. Šie skambučiai turi įtakos vartotojų balso srauto modeliui, todėl turi būti įtraukti į skambučių trukmių skirstinius. Trumpiausiais balso skambučiais pasižymi verslo ir pramogų centrų vartotojų grupės.
3. Miestų vartotojų grupių iki 75 % balso skambučių pradedami UMTS ryšio tinkle, o tai lemia netolygią viso tinklo ląstelių apkrovą.
4. Pasiūlyti tarpt technologinio balso srauto balansavimo metodai pagerino heterogeninio korinio ryšio tinklo išteklių panaudojimą ir užtikrino aukštesnės kokybės paslaugas vartotojams.
5. Agresyvi balso srauto balansavimo taktika leidžia paskirstyti iki 20 % balso srauto, tačiau ji neužtikrina aukščiausios paslaugų kokybės ir efektyviausio tinklo išteklių panaudojimo. Geriau yra remtis nuosaikiu balso srauto balansavimu.

# 3

---

## Duomenų srauto balansavimas

Šis skyrius yra skirtas heterogeninio ryšio tinklo vartotojų duomenų srauto balansavimo tyrimams. Jame sprendžiami du disertacijoje keliami uždaviniai, kurie yra susiję su duomenų srauto balansavimu toje pat tinklo ląstelėje, kai vartotojai yra klasifikuojami pagal *QoS* prioritetus ir kai srauto balansavimas atliekamas tarp skirtingų tinklo sluoksnių, panaudojant mažas ląsteles. Skyriuje analizuojami tarp sluoksningi ir *QoS* valdymu grįsti srauto balansavimo metodai, kurie padeda išlaikyti aukštą paslaugų kokybę ir užtikrinti talpą ląstelėje. Vartotojų srauto balansavimui pasitelkiamos klasifikuotų paslaugų srauto valdymo priemonės, vartotojus skirstant į atskirus tipus. Skirtingai prioretizuotų vartotojų kuriamo srauto pasiskirstymas vertinamas dinamiškomis radijo aplinkos sąlygomis. Tarp sluoksningo srauto balansavimo tyrime nagrinėjama mažų ląstelių specifika. Siūlomas mažų ląstelių savybėmis paremtas integracijos modelis ir galimi tokių ląstelių plėtos scenarijai. Realus korinio ryšio tinklo aplinkoje vertinamos mažų ląstelių naudos taikant jas tinklo apkrovos valdymui.

Skyriaus tematika paskelbti keturi autoriaus straipsniai: Žvinys (2013), Sukarevičienė *et al.* (2014), Žvinys *et al.* (2015a), Žvinys *et al.* (2015b). Perskaityti keturi pranešimai užsienio ir respublikinėse konferencijose: „Mokslas – Lietuvos ateitis: Elektronika ir elektrotechnika“ (Vilnius, 2013), „Basoti“ (Ryga, 2014), „eStream“ (Vilnius, 2015), „PIERS“ (Praha, 2015).

### 3.1. Vartotojų suvokiamų paslaugų kokybės valdymas

Įvairiose paslaugų teikimo sferose vartotojų pasitenkinimas gaunamomis paslaugomis bei jų patirtis yra suvokiama skirtingai. Tarkime pardavimų srityje vartotojų patirtį su kompanija nusako jų tarpusavio santykis ir ryšiai sukurti ilgalaikio bendradarbiavimo metu. Korinio ryšio tinkluose vartotojų paslaugų patirtis vertinama kiek kitaip. Ji dažniausiai suvokiama kaip vartotojų gaunamų paslaugų kokybės lygis. Pastarasis gali būti nusakytas kaip geras, blogas ar patenkinamas balso kokybės ar vaizdo transliacijų atveju. Duomenų perdavimo atveju vartotojų patirtis gali būti įvardinta kaip spartus ar lėtas duomenų perdavimas. Visa tai leidžia suvokti kokios paslaugos pasiekia vartotoją ir kokia galimai yra jo patiriama paslaugų patirtis. Klasifikuojant paslaugas jų kokybė gali būti pagerinta, tuomet vartotojas ar jų grupė mėgaujasi aukštesnės kokybės balsu ar spartesniu duomenų perdavimu.

Vartotojų patiriamų paslaugų kokybė yra laikoma ir svarbiu indikatoriumi, kuris nusako korinio ryšio tinklo kokybę (Paulrajan *et al.* 2011). Skirtingų tipų paslaugoms mobiliojo ryšio tinkle, vartotojai kelia skirtingus priimamų paslaugų patirties reikalavimus. Pavyzdžiui, jie tikisi aiškios balso kokybės, sklendaus vaizdo ar greito interneto puslapių krovimo. Suprantama, kad įvairių paslaugų *QoS* reikalavimai taip pat yra skirtingi (Dekeris *et al.* 2006). Korinis tinklas, kurio pralaidumo juosta neviršija 64 kbit/s gali teikti kokybiškas balso perdavimo paslaugas, tačiau tokia pralaida nebus tinkama vaizdo transliacijų stebėjimui. Užtikrinti geresnę vartotojų patirtį tinkle siekiama, vykdant *QoS* klasifikavimą (Dikbiyik *et al.* 2015). *QoS* klasifikavimas gali būti taikomas konkrečioms paslaugoms, siekiant jas prioretizuoti arba atskirtiems tinklo vartotojams ir terminalų grupėms.

Tipiniu atveju, 3G tinklas duomenų perdavimo sesijos metu teikiamos paslaugos tipo neidentifikuoja. Tokiame tinkle visos paslaugos ir vartotojai vertinami vienodai, todėl jų *QoS* yra vienodas. Radijo ryšio tinklas veikiantis tokiu principu literatūroje vadinamas „aklu vamzdžiu“ (angl. *Blind Pipe*). Siekiant spręsti problemą, į korines ryšio sistemas buvo įtrauktas klasifikuotų paslaugų atpažinimas ir vartotojų išskyrimas pagal profilius. *QoS* valdymas heterogeninėse korinio ryšio sistemose palengvina vartotojų paslaugų kokybės valdymą ir leidžia balansuoti vartotojų sukuriamą srautą *UMTS* tinkle. Toks tinklas, kuris yra pajėgus atskirti skirtingo *QoS* profilio paslaugas ir vartotojus – vadinamas „išmaniuoju vamzdžiu“ (angl. *Smart Pipe*). Tokiame tinkle vartotojui suteikus *QoS* prioritetu grįstą profilį pagerinamas vartotojo pasitenkinimas paslaugomis (Barraclough, 2011). Vartotojai, kurie neturi *QoS* profilio paslaugas gauna *BE* (angl. *Best Effort*) principu.



Toliau, teorinė skyriaus dalis nagrinėja vartotojo profilio sudarymo galimybes koriniame ryšio tinkle, *QoS* pagrindu. Sudaryti vartotojų profiliai priskiriami vartotojams ir vertinama profilio nauda paslaugų kokybės atžvilgiu. Praktiniai profilių taikymo rezultatai aptariami pradedant nuo 3.1.2 poskyrio.

### 3.1.1. Vartotojo profilio sudarymas

Pagal 1.6 pav. pateiktą *QoS* architektūros logiką *UMTS* tinkle, vartotojo *QoS* profilis nustatomas stuburiniame duomenų perdavimo tinkle. Vartotojo profilis sudaromas iš paskyrimo sulaikymo prioriteto *ARP* (angl. *Allocation/Retention Priority*) ir planavimo prioriteto indikatorius *SPI* (angl. *Scheduling Priority Indicator*) parametru kombinacijos.

*ARP* parametro paskirtis yra prioretizuoti paslaugos nešlį tarp kitų paslaugos nešlių. Paprastai *ARP* vertė nustato vartotojo prioritetą, kuris kinta nuo 1 iki 15. Kuo didesnė *ARP* vertė yra nurodyta vartotojo profilyje, tuo dažniau vartotojas gaus prieigą prie tinklo išteklių. Atitinkamai žemesnė *ARP* vertė rodo, kad vartotojo *RAB* bus užlaikomas išteklių išskyrimo eilėje didelės ląstelės apkrovos momentais.

*SPI* parametras yra skirtas prioretizuoti gautų išteklių panaudojimo dažnumą išteklių planavimo metu. Didesnė šio parametro vertė reiškia, kad planuojant *TTI* langų užpildymą duomenų perdavimu, vartotojui laiko tarpas perduoti duomenis bus suteiktas dažniau. Netgi, kai ląstelės išteklių yra pakankamai, didesnė *SPI* vertė leidžia esamais ištekliais pasinaudoti dažniau. Planavimo indikatorius yra pagrindinis parametras kai kalbama apie nuo duomenų perdavimo spartos priklausomas paslaugas. Jo svorio vertė atitinka tinklo išteklių paskirstymo santykį vartotojams, todėl dažnai naudojama prioretintinių vartotojų srauto balansavimui.

Dviejų vartotojų srauto prioretizavimui skirtų *QoS* valdymo parametru kombinacija užtikrina vartotojo išskirtinumą tinkle bei pagerina patiriamą paslaugų kokybę. Korinio ryšio tinkluose, kur vartotojų profiliavimas naudojamas itin plačiai vartotojų klasifikacija vykdoma dar griežčiau. Detalesnė vartotojų ir jų perduodamo duomenų srauto klasifikacija atliekama skaidant vartotojų profilius į smulkesnius. Šiuo tikslu naudojamas papildomas *QoS* valdymo parametras *THP* (angl. *Traffic Handling Priority*). Su *THP*, *SPI* svorio vertės sudalijamos į smulkesnius pogrupius. Vartotojui prisijungus duomenų perdavimo tinkle, stuburinis tinklas į *RNC* išsiunčia *QoS* vartotojo profilį. Pagal šį profilį tinklo valdiklis taiko *QoS* taisykles skirstydamas tinklo išteklius. Valdiklio posistemėje veikiančių tinklo bazinių stočių išteklių priskyrimo planuotojai aukštesnio prioriteto vartotojų srautą prioretizuoja.

Siekiant įvertinti *QoS* vartotojų duomenų srauto prioretizavimo efektyvumą bei *QoS* klasifikavimu grįstą srauto valdymą, atliktas tyrimas. Tyrimo tikslais, iš

*ARP* bei *SPI QoS* valdymo parametrų sudaryti trys skirtingi vartotojų profiliai. Prisilaikant *3GPP* naudojamų vartotojų profiliavimo taisyklių, sudaryti aukštinio, sidabrinio ir varinio vartotojų profiliai. Vartotojų profiliavimas vykdomas sekančia tvarka: aukštinis vartotojas turi dvigubai didesnę prioritetą nei sidabrinis, o sidabrinis yra dvigubai didesnio prioriteto nei varinis. Vartotojams leidžiama naudotis duomenų perdavimo paslaugomis realiame korinio ryšio tinkle, kartu su kitais tinklo vartotojais, kurie priklauso ne prioritetinių vartotojų kategorijai. Duomenų srautas šiems vartotojams prioretizuojamas *Iu* ir *Uu* sąsajomis, netaikant srauto prioretizavimo transmisiniame Iub sujungime. Toliau tyrime gauti rezultatai pristato *QoS* profiliavimo įtaką realiomis ryšio sąlygomis.

Visi trys vartotojai priverstinai prieregistruojami didelės apkrovos tinklo ląstelėje. Galinė vartotojų įranga sukonfigūruota teikti foninę duomenų perdavimo paslaugą *FTP* protokolu. Duomenų perdavimas korinio ryšio tinklu vykdomas aukštynkrypčiu *E-DCH* ir žemynkrypčiu *HS-DSCH* kanalais bei yra sinchronizuotas laike. *QoS* srauto prioretizavimo efektyvumas vertinamas pagal vartotojų duomenų perdavimo spartos pasiskirstymą. Pirmuoju atveju duomenų perdavimo pasiskirstymas analizuojamas vartotojams esant panašiose radijo sąlygose.

Antrasis scenarijus vertina pagal *QoS* klasifikuotų vartotojų perduodamo srauto pasiskirstymą kai ryšio sąlygos kinta. Taikomas prioritetinis vartotojų srauto balansavimas atspindi realią tinklo vartotojo patirtį tinkle bei suteikia žinių apie prioritetinio srauto pasiskirstymą.

### **3.1.2. Greitos paketų prieigos duomenų srauto prioritetinis balansavimas vienodomis ryšio sąlygomis**

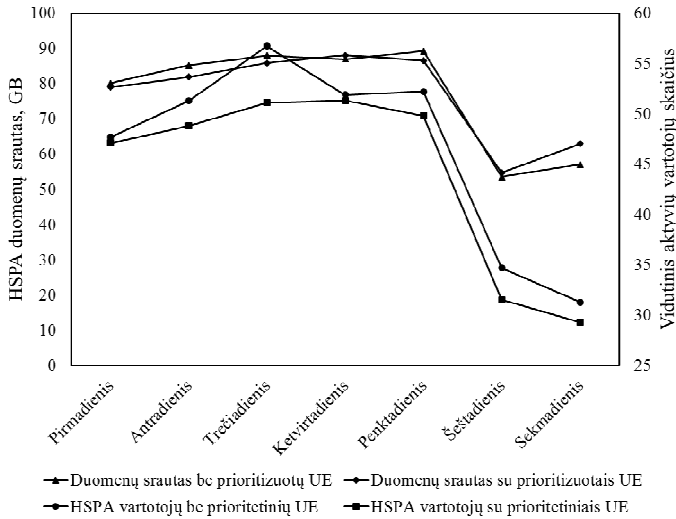
Galimos kelios *HSPA* srauto prioretizavimo priežastys. Viena jų, ryšio operatoriaus pajamų auginimas taikant skirtingas apmokestinimo strategijas. Atidėto mokėjimo už paslaugas klientai operatoriaus požiūriu yra priimtinesni, nei pasirenkantys išankstinį apmokėjimą už paslaugas. Pastariesiems vartotojams, praktikoje yra suteikiamas žemesnio *QoS* prioritetas.

Kita *HSPA* prioretizavimo paskirtis siejama su tinklo ląstelių perkrovomis, kuomet susiduriama su ląstelės talpos trūkumu. Tuomet intensyvaus duomenų srauto paslaugų vartotojams, kurie už ryšio paslaugas moka mažiau skiriamas žemesnis *QoS* prioritetas. Tokiu būdu sumažinama tinklo ląstelės apkrova bei atpiginama perduoto duomenų bito kaina tinklo operatoriui.

Duomenų perdavimas 3G tinklu yra priskiriamas paslaugoms, kurios yra jautrios duomenų perdavimo spartai. Joms keliami *QoS* reikalavimai siejami su didelės apimties duomenų blokų perdavimu, kuriems persiųsti reikalingas spartus duomenų perdavimas. Tinklo ląstelėse, kurių perduodamo srauto apkrova yra didelė,

vartotojams su aukštesniu prioritetu perduoto duomenų bito kaina yra padidinama, o ištekliai ląstelėje paskirstomi naudingai tinklo operatoriui.

*QoS* vartotojų srauto prioretizavimo tyrimų metu sudarytų profilių vartotojai duomenų perdavimo paslauga naudojami didelės apkrovos tinklo ląstelėse. Perduotų interneto duomenų pasiskirstymas *HSPA* kanalais vartotojui esant *DCH* (angl. *Dedicated Channel*) siuntimo būsenoje pateiktas 3.1 paveiksle.



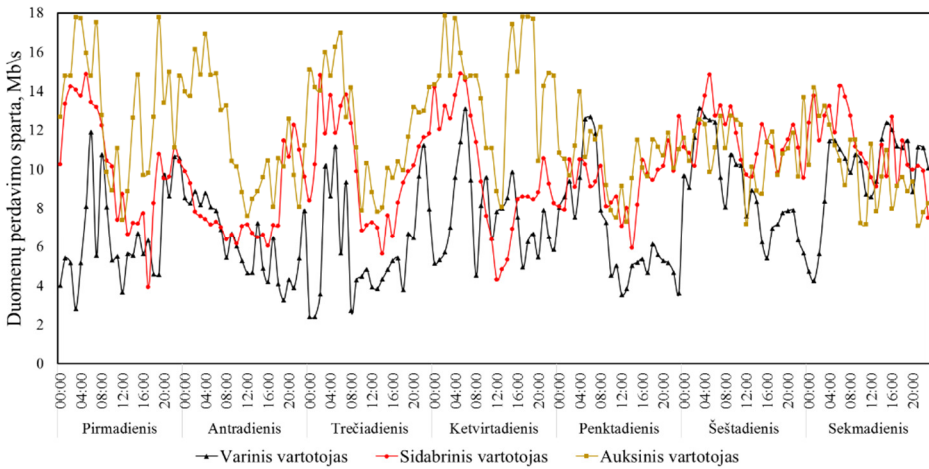
**3.1 pav.** *HSPA* duomenų srauto ir vidutinio aktyvių vartotojų skaičiaus pasiskirstymas  
**Fig. 3.1.** Distribution of *HSPA* data traffic and average number of active users

Grafike pateiktas suminis persiųstų duomenų aukštynkrypčių ir žemynkrypčių *HSPA* kanalais duomenų srauto pasiskirstymo palyginimas. Perduotų duomenų srauto rezultatai rodo, kad *QoS* grįstų profilių taikymas niekaip neveikia bendros tinklo ląstelės apkrovos. Taip pat, *QoS* srauto balansavimas neturi jokios įtakos tinklo ląstelės aktyvių vartotojų skaičiui. Toks srauto balansavimo būdas nesumažina tinklo ląstelės apkrovos ir nepadidina ląstelės talpos, tačiau perskirstant esamus išteklius vykdo atskirų vartotojų srauto balansavimą.

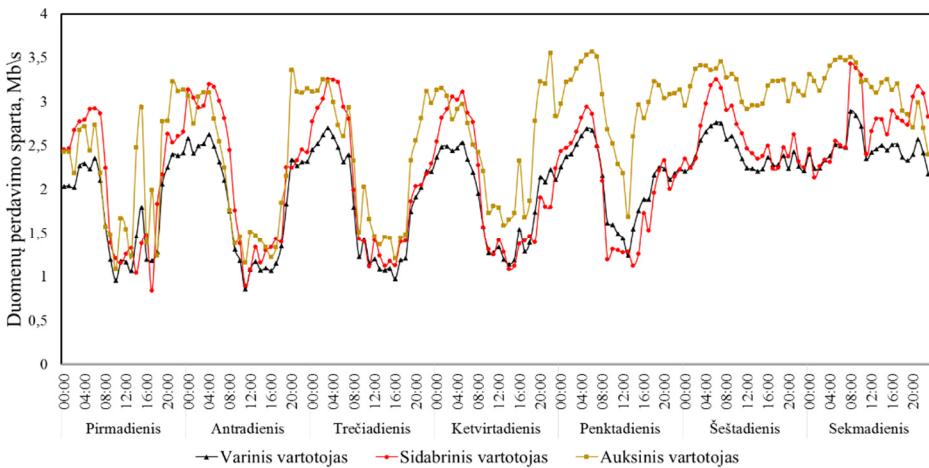
Vartotojų patirtį tinkle galima nuspėti analizuojant įvairius ryšio kanalo kokybės parametrus. Kanalo kokybės indikatorius, kodavimo schemas, moduliacija, signalo lygis gali nusakyti ryšio kanalo sąlygas, kuris yra sukurtas vartotojui. Visgi, geri ryšio kanalo kokybės rodikliai negarantuoja, kad vartotojo gaunamų paslaugų patirtis bus gera. Siekiant įvertinti vartotojo patiriamų paslaugų kokybę pageidautina koncentruotis į tiesiogiai vartotojo suvokiamų paslaugų matavimo rodiklius (Lin *et al.* 2006). Duomenų srauto perdavimo efektyvumui vertinti iš vartotojo perspektyvos, tinkamiausi yra duomenų perdavimo spartos matavimai.

Skirtingų prioritetų *HSPA* vartotojų perduodamų duomenų siuntimo sparta buvo nepertraukiamai matuojama savaitę laiko. Visiems vartotojams užtikrintos kuo panašesnės ryšio kanalo sąlygos, juos patalpinus toje pačioje vietoje.

Toliau, 3.2 paveiksle pateikiami agreguoti skirtingų profilių vartotojų duomenų perdavimo spartos pasiskirstymo rezultatai vartotojo lygmenyje, kai visų vartotojų galimybės pasinaudoti esamais ląstelės ištekliais yra vienodos (3.3 pav).



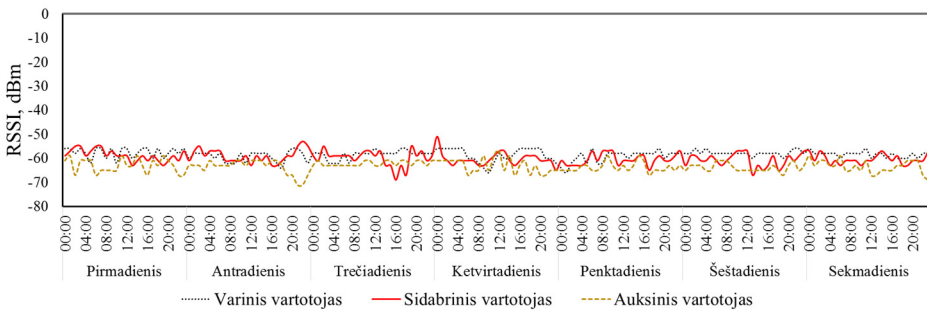
a)



b)

**3.2 pav.** Vartotojų duomenų perdavimo spartos pasiskirstymas: a) *HS-DSCH* kanale, b) *E-DCH* kanale

**Fig. 3.2.** Distribution of users data throughput: a) over *HS-DSCH*, b) over *E-DCH*



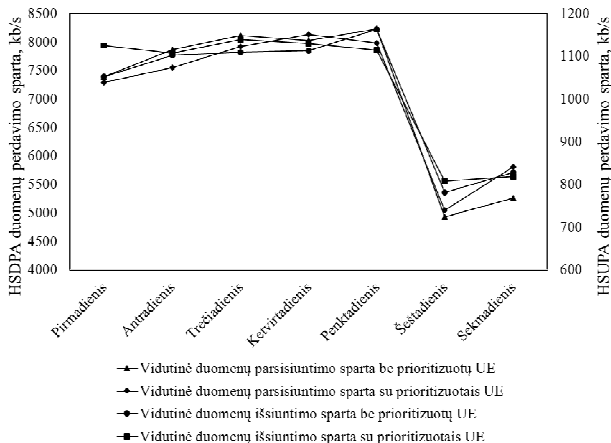
**3.3 pav.** Priimamo signalo stiprumas skirtingų profilių vartotojams  
**Fig. 3.3.** Strength of received signal for differently profiled users

Gauti duomenų perdavimo spartos rezultatai, duomenis siunčiant iš bazinės stoties į *UE* bei priešinga kryptimi, rodo *QoS* grįsto srauto balansavimo veikimą. Duomenų perdavimui naudota vartotojo įranga, kurios techninei duomenų perdavimo parametrai *HS-DSCH* ir *E-DCH* kanalais užtikrina teorinę 42,2/5,76 Mb/s spartą. *UE* priimamas signalo lygis svyruoja apie  $-60$  dBm, o tai leido visų profilių vartotojams žemynkryptės duomenų sesijos metu duomenis perduoti naudojant *64QAM* moduliaciją. 3.2 paveiksle (a) pateikti žemynkryptės duomenų kanalo spartos matavimų pasiskirstymo rezultatai rodo, kad vartotojas turintis aukščiausią *QoS* prioritetą gauna didžiausią duomenų perdavimo spartą *HS-DSCH* kanale. Tinklo ląstelėse esant pikiniams apkrovos momentams, darbo dienos metu auksinio vartotojo duomenų perdavimo sparta išlieka didžiausia, tačiau skirtumas lyginant su kitais vartotojais tampa minimalus. Tuo tarpu ne piko valandomis, duomenų perdavimo spartos skirtumai tampa ryškesni, dėl didesnio prieinamo išteklių skaičiaus. Ne piko valandomis ląstelės išteklių perskirstomi, todėl padidėja ir likusių vartotojų duomenų perdavimo sparta. Atsižvelgiant į *SPI* parametro vertę išteklių perskirstymas vykdomas taip, kad *UE* su aukščiausiu prioritetu tektų maksimalus galimas išnaudoti išteklių skaičius. Kai vartotojų skaičius tinklo ląstelėje sumažėja pastebimai, aukščiausio prioriteto vartotojai įsotina, galinė įranga nebesugeba panaudoti daugiau ląstelės išteklių duomenų perdavimui. Tokie scenarijai būdingi savaitgalio dienomis, tuomet bazinės stoties išteklių planuotojas pradeda stengtis maksimaliai patenkinti visų tinkle esančių vartotojų poreikius. Grafike stebimas skirtingų prioritetų vartotojų duomenų spartos suvienodėjimas. Vertinant visos savaitės duomenų perdavimo spartos rezultatus *HS-DSCH* kanalu gauta, kad vidutinė duomenų perdavimo sparta sidabrinio vartotojo buvo 29,8 % didesnė lyginant su variniu vartotoju. Auksinis vartotojas pasiekė 16,5 % didesnę duomenų pralaidą lyginant su sidabrinio vartotoju ir beveik dvigubai (45,7 %) didesnę spartą lyginant su variniu vartotoju (Žvinys *et al.* 2015). Didelis duomenų

perdavimo spartos skirtumas tarp aukščiausių ir žemiausių prioritetus turinčių vartotojų gautas todėl, kad galinė vartotojų įranga sugeba suteiktus tinklo išteklius žemynkrypčiame kanale išnaudoti daug efektyviau, nei *UL* kanalo atveju. Maksimaliai 15 kodų yra naudojama duomenims perduoti dalinamu kanalu kiekvieną *TTI* atkarpą. Vartotojai su žemesniu profiliu gauna mažiau kodų.

Priešingai yra duomenis siunčiant *E-DCH* kanalu aukštynkrypčio duomenų perdavimo atveju. Aukštynkrypčiu kanalu *UMTS* septintos laidos įranga gali maksimaliai naudoti tik keturis kodus, kai ortogonalųjų kodų medžio plitimo veiksnys lygus keturiems. Tokio tipo galinės įrangos paplitimas, šiuo metu yra plačiausias. *HSUPA* duomenų perdavimui būdingos tos pačios duomenų perdavimo spartos pasiskirstymo tendencijos laike, kaip ir *HSDPA* atveju. Tačiau duomenų perdavimo spartos efektyvumas tarp skirtingų *QoS* profilių vartotojų nėra toks ryškus. Žemesnį aukštynkrypčio kanalo išteklių įsisavinimą lemia galinės įrangos techninės galimybės, spinduliuojama galia. Vienodų ryšio sąlygų atveju pasiekta, kad vidutinė perduodamų duomenų sparta aukštynkrypčiame kanale sidabrinio vartotojo buvo 9,15 % didesnė, lyginant su variniu vartotoju. Atitinkamai auksinis vartotojas gavo 17,33 % didesnę duomenų spartą nei sidabrinis ir 26,39 % nei varinis. Su sąlyga, kad tokių *QoS* profilių vartotojai yra panašiose radijo sąlygose.

Vartotojų prioretizacija heterogeniniuose korinio ryšio tinkluose yra alternatyvi srauto balansavimo priemonė. Taikant *QoS* grįstą srauto balansavimą vienu vartotojų patirtis tinkle naudojantis paslaugomis yra pagerinama, kitų pabloginama. Bendra tinklo ląstelės vartotojų pasitenkinimą duomenų perdavimo paslaugomis atspindinti duomenų perdavimo sparta nekinta (3.4 pav.).



3.4 pav. Vidutinės duomenų perdavimo spartos pasiskirstymas bazinėje stotyje su prioritetiniais vartotojais ir be jų

Fig. 3.4. Distribution of average data throughput per base station with and without prioritized users

Matyti, kad *QoS* balansavimas neleidžia sukurti papildomos ląstelės talpos. Taip pat neleidžiama vienam vartotojui užimti aukštykrypčio ir žemynkrypčio duomenų perdavimo kanalo nuolatos. Grafike pavaizduota vidutinė bendra visų bazinės stoties vartotojų duomenų perdavimo sparta: kai duomenų pernašos paslauga naudojasi prioretizuoti vartotojai su paprastais vartotojais ir tik paprasti tinklo vartotojai. Vidutinė visų vartotojų duomenų perdavimo sparta aukštykrypčiu ir žemynkrypčiu kanalais, analizuojamoje 3G bazinėje stotyje nekinta.

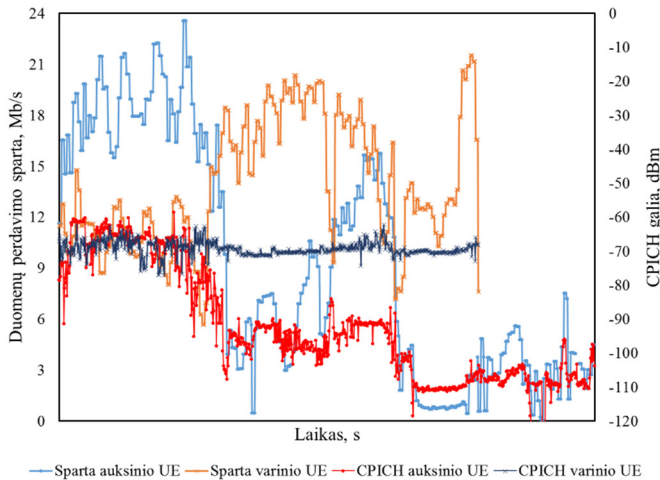
### 3.1.3. Greitos paketų prieigos duomenų srauto prioritetinis balansavimas skirtingomis ryšio sąlygomis

Įprastai užtikrinti pastovias ryšio sąlygas korinio ryšio tinklo vartotojams yra sudėtinga. Vartotojai nuolatos juda heterogeniniame ryšio tinkle, todėl priimamo signalo stiprumas taip pat keičiasi. Vartotojų mobilumas ir juos supantys objektai lemia tai, kad vartotojai atsiduria dinamiškoje radijo aplinkoje. Priimamo radijo signalo pokyčiai artimai susiję su įvairiais ryšio kanalo parametrais. Vartotojui atsidūrus prasto ryšio zonosose ima blogėti duomenų perdavimo kanalo kokybė. Pastaroji yra tiesiogiai susijusi su duomenų perdavimui naudojamų kodavimo schemų, moduliacijos parinkimu sesijos metu. Prasta kanalo kokybė pasižymi išaugusiais sisteminiais trukdžiais, dėl ko sumažėjus signalas/triukšmas santykiui sudėtingėja signalo išskyrimas, padidėja klaidingai perduotų blokų santykis. Išvardyti veiksniai neigiamai veikia duomenų perdavimo spartą ir vartotojų patirtį naudojantis paslaugomis. Ne prioritetiniams korinio ryšio tinklo vartotojams žemas priimamo *RSCP* (angl. *Received Signal Code Power*) lygis ir prastas signalo kokybės indikatorius *Ec/No* (angl. *Energy per Chip to Noise*) reiškia, kad gautų paslaugų kokybė prastėja. Ne prioritetinių vartotojų profilio skirtumai, lyginant su pagal *QoS* prioretizuotus vartotojus, išskiria juos tinklo ląstelėje. Todėl vienareikšmiškai spręsti kaip priimamo signalo lygis ir kokybė keičia tokių vartotojų patirtį tinkle negalime. Tyrimų siejamų su prioretizuotų vartotojų patiriama duomenų perdavimo paslaugų kokybe dinamiškose radijo sąlygose beveik nėra.

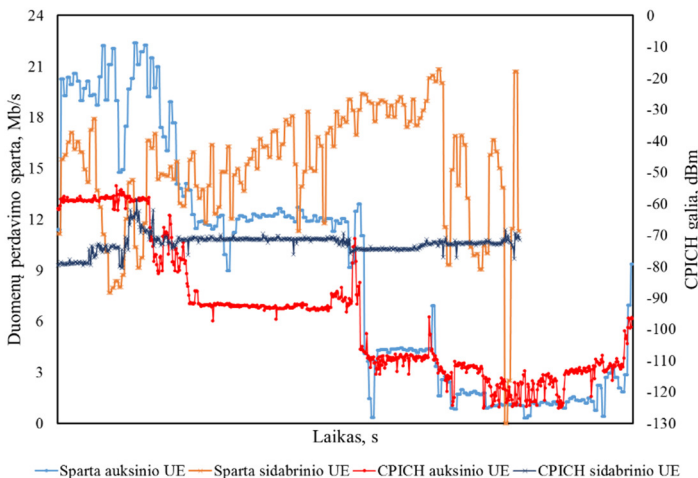
Remiantis anksčiau sudarytų vartotojų profiliais, buvo organizuotas ir atliktas tyrimas, siekiant nustatyti vartotojų patirtį realiose korinėse ryšio sistemose, kai vartotojai duomenų perdavimo paslaugomis naudojasi stipriai apkrautose korinio ryšio tinklo ląstelėse su kitais tinklo vartotojais. Tarpusavyje lyginama duomenų perdavimo spartos priklausomybė skirtingų profilių vartotojams, kai radijo ryšio sąlygos yra palaipsniui bloginamos aukštesnio prioriteto poros vartotojui. Palyginamajai analizei naudojami pilotinio kanalo signalo stiprumo matavimai, duomenų perdavimo spartos pasiskirstymas, kuris siejamas su ryšio kanalo kokybės indikatoriumi *CQI* (angl. *Channel Quality Indicator*). Šiuo atveju *CQI* vertė tie-

siogiai nusako kiek transportinių duomenų blokų gali būti suteikta duomenų perdavimui. Pagal *CQI* vertę parenkamas ne tik *TBS* (angl. *Transport Block Size*), bet priskiriama moduliacijos tipas bei galimas naudoti kodų kiekis. *CQI* verčių sąryšiai yra nustatyti *3GPP* (*3GPP* TS 25.214 Physical Layer Procedures, 2012).

Žemynkrypčio *HSPA* duomenų perdavimo atveju skirtingų prioritetų porų spartų rezultatai, dinamiškoje radijo aplinkoje pateikti 3.5–3.7 paveiksluose.

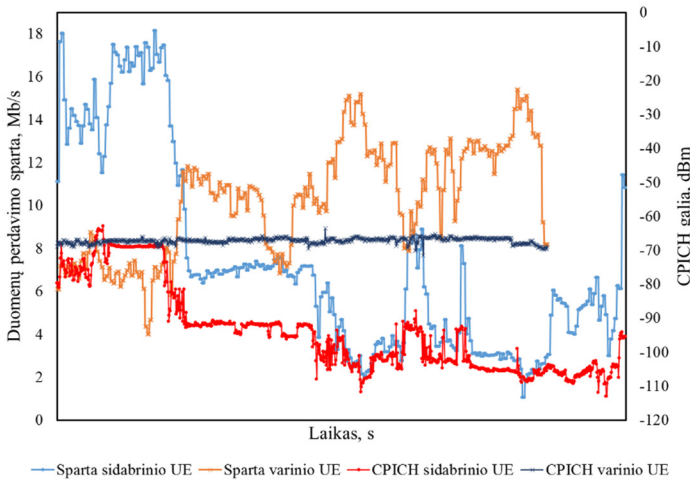


**3.5 pav.** *HS-DSCH* duomenų sparta auksinio ir varinio vartotojų poroje  
**Fig. 3.5.** Data throughput over *HS-DSCH* for gold and copper users



**3.6 pav.** *HS-DSCH* duomenų sparta auksinio ir sidabrinio vartotojų poroje  
**Fig. 3.6.** Data throughput over *HS-DSCH* for gold and silver users



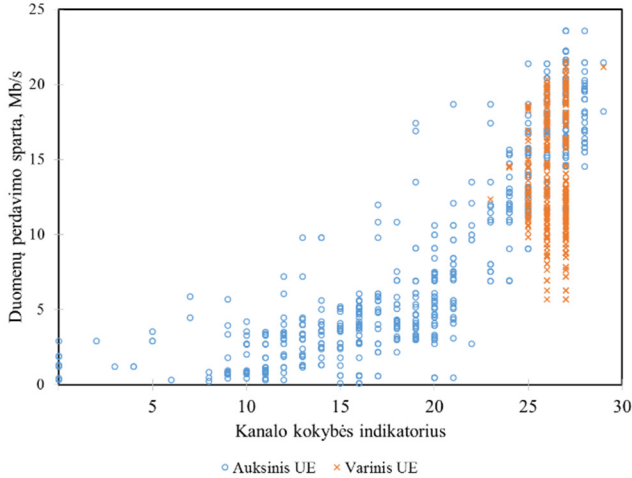


**3.7 pav.** *HS-DSCH* duomenų sparta sidabrinio ir varinio vartotojų poroje  
**Fig. 3.7.** Data throughput over *HS-DSCH* for silver and copper users

Grafikuose pavaizduoti skirtingų *QoS* profilių vartotojų duomenų perdavimo spartos pasiskirstymo porose rezultatai, kai vieno iš vartotojų radijo sąlygos laipsniškai blogėja. Tarpusavio auksinio ir varinio vartotojų duomenų perdavimo spartos palyginimas rodo, kad artimomis radijo sąlygomis auksinis vartotojas turi suteiktą pranašumą. Žemynkrypčiame dalinamame kanale auksinio vartotojo pasiekama sparta dvigubai viršija varinio vartotojo spartą.

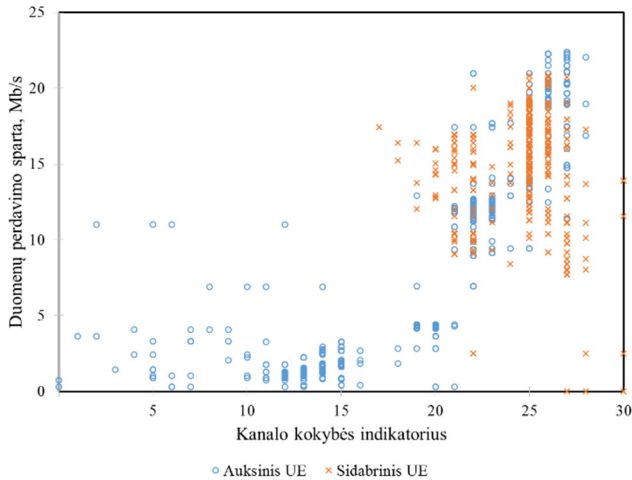
Ryšio sąlygoms prastėjant, vartotojo su aukštesniu prioritetu kanalo kokybė blogėja, todėl prastėja priimamo signalo dekodavimas, mažinamos duomenų perdavimo moduliacija bei kodavimo schemas. Pilotinio signalo stiprumui pasiekus  $-80$  dBm lygį, bazinės stoties išteklių planuotojas perskirsto artimiausio *TTI* lango išteklius vartotojams. Stebimas žemesnio prioriteto vartotojo patiriamų paslaugų kokybės šuolis. Duomenų sparta variniam vartotojui padidėja dvigubai. Slopstant signalui aukštesnio prioriteto poros vartotojui stebimas tolimesnis duomenų spartos mažėjimas. Poros vartotojas su žemesniu prioritetu, kurio radijo sąlygos išliko stabilios, peržengus antrąjį *CPICH* galios slenkstį ties  $-90$  dBm riba patiria trumpalaikį pikinių duomenų perdavimo spartos padidėjimą. Duomenų spartos pikinės aplikacijos lygmens vertės padidėja 10–12 %. Daugiau išteklių *UE* negali įsisavinti dėl techninės įrangos ribotumo. *CQI* visapusiškai nusako ryšio kanalo sukurto vartotojui duomenims perduoti kokybę. Žemos *CQI* vertės lemia mažą *TBS*, tai lemia mažą kodų kiekį *HS-DSCH* kanale, o galutinai ir žemą spartą. Suteiktas *QoS* prioritetas negali garantuoti išskirtinės duomenų perdavimo spartos *HS-DSCH* kanalu bet kokiomis radijo sąlygomis. Prioritetinis *QoS* duomenų

srauto balansavimas yra efektyvus ir prognozuojamas tik geromis ryšio kanalo sąlygomis. Žemynkrypčio kanalo *CQI* rezultatai porose 3.8–3.10 paveiksluose.



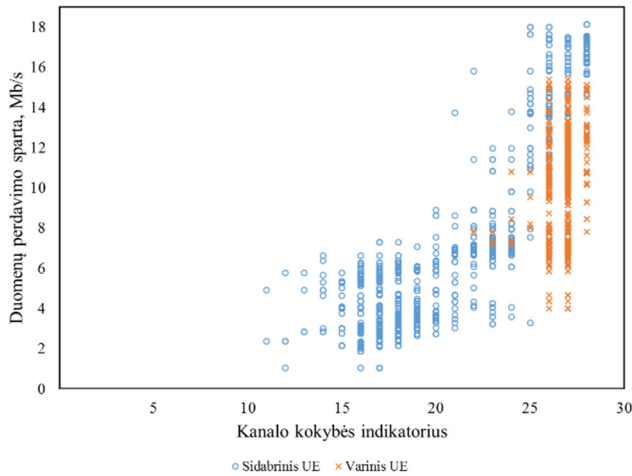
**3.8 pav.** *HS-DSCH* duomenų sparta auksinio ir varinio vartotojų porose priklausomai nuo kanalo kokybės indikatorius

**Fig. 3.8.** Data throughput over *HS-DSCH* for gold and copper users based on channel quality indicator



**3.9 pav.** *HS-DSCH* duomenų sparta auksinio ir sidabrinio vartotojų porose priklausomai nuo kanalo kokybės indikatorius

**Fig. 3.9.** Data throughput over *HS-DSCH* for gold and silver users based on channel quality indicator



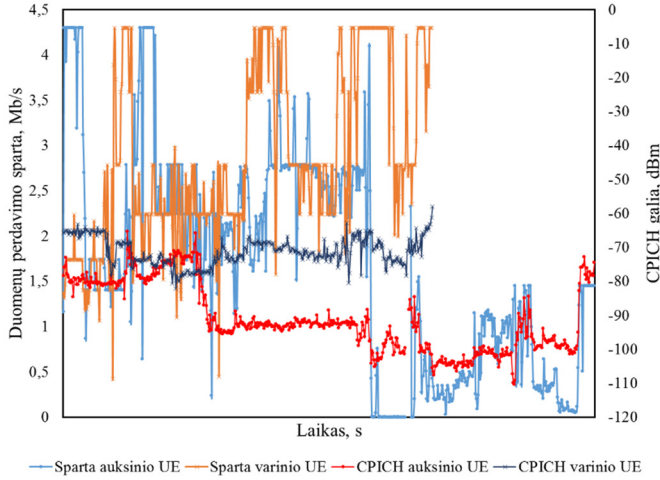
**3.10 pav.** *HS-DSCH* duomenų sparta sidabrinio ir varinio vartotojų porose priklausomai nuo kanalo kokybės indikatorius

**Fig. 3.10.** Data throughput over *HS-DSCH* for silver and copper users based on channel quality indicator

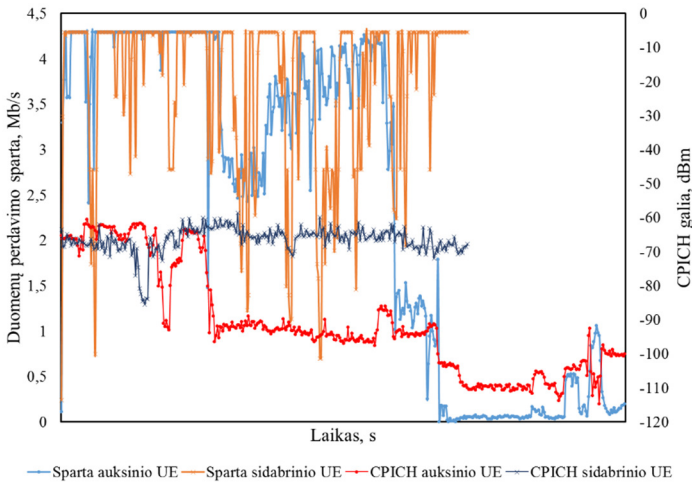
Gauti duomenų spartos sklaidos rezultatai *HS-DSCH* kanale priklausomai nuo *CQI* teigia, kad *QoS* prioritetas nesuteikia pranašumo prastos kokybės kanale. Tokia situacija būdinga visų analizuojamų porų atvejais. Žemesnio prioriteto poros vartotojui baigus siųsti duomenis, vartotojo su aukštesniu prioritetu duomenų perdavimo sparta nekinta. Tai reiškia, kad *UE* susiduria su duomenų blokų dekodavimo efektyvumo sumažėjimu, todėl priimti didesnio TBS, kuris būtų konvertuotas į didelę duomenų perdavimo spartą, nepavyksta (Žvinys *et al.* 2015). Bazinės stoties išteklių planuotojai pagal raportuotas *CQI* vertes sumažina lango duomenims perduoti gavimo tikimybę, kad ištekliai nebūtų eikvojami.

Duomenų perdavimui aukštyr iš *UE* į bazinę stotį naudojami *HSUPA* duomenų perdavimo kanalai. Priešingai nei *HSDPA* duomenų perdavimo atveju, kurio metu naudojamas dalinamas duomenų kanalas, *HSUPA* duomenų perdavimas vyksta dedikuotu ryšio kanalu. Dedikuotas sujungimas leidžia tinklo bazinei stotčiai užtikrinti greitą išteklių planavimą ir sumažinti bendrą perdavimo delsą. Kaip pagrindinis bendras išteklius *HSUPA* perdavime naudojama bendra bazinės stoties siųstuvo galia. Greito *HSUPA* išteklių planavimo metu vykdant tiesioginį *UE* perduodamos galios valdymą nustatomas didžiausias energijos kiekis, kurį *UE* gali naudoti aukštyrnykryčiame kanale. Spinduliuojamos galios griežtas valdymas neleidžia daugeliui *UE* sukelti aukšto interferencijos lygio, kuomet bet koks duomenų perdavimas taptų neįmanomas. *UE* galios apribojimai yra priežastis, kodėl

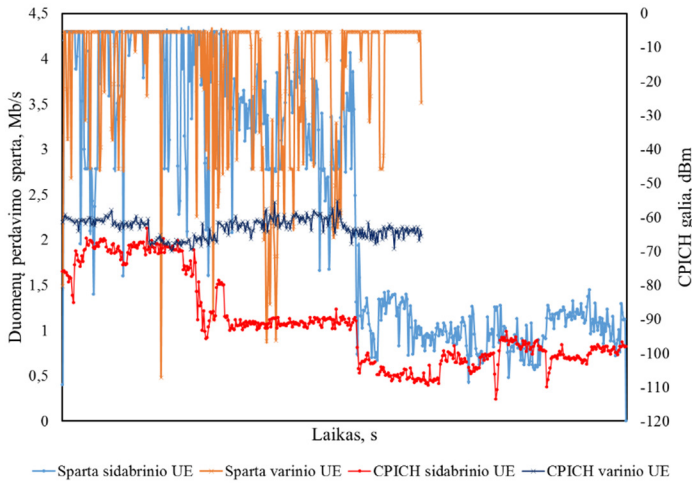
aukštynkrypčio duomenų kanalo išteklių įsisavinimo efektyvumas menkai pastebimas tarp skirtingų prioritetų tinklo vartotojų. Komerciniame korinio ryšio tinkle prioretizuotų pagal  $QoS$  tinklo vartotojų duomenų perdavimo aukštyn rezultatai, kai radijo sąlygos yra dinamiškos, pateikti 3.11–3.13 paveiksluose.



**3.11 pav.**  $E$ - $DCH$  duomenų sparta aukstinio ir varinio vartotojų poroje  
**Fig. 3.11.** Data throughput over  $E$ - $DCH$  for gold and copper users



**3.12 pav.**  $E$ - $DCH$  duomenų sparta aukstinio ir sidabrinio vartotojų poroje  
**Fig. 3.12.** Data throughput over  $E$ - $DCH$  for gold and silver users

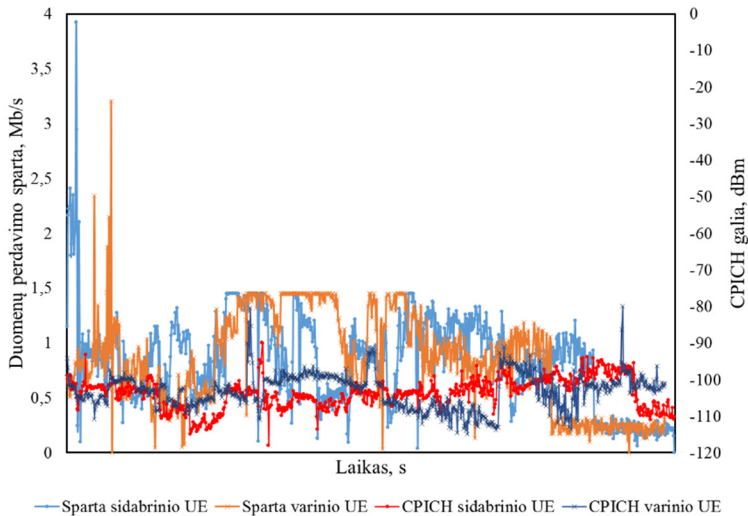


**3.13 pav.** *E-DCH* duomenų sparta sidabrinio ir varinio vartotojų poroje  
**Fig. 3.13.** Data throughput over *E-DCH* for silver and copper users

Aukštynkrypčio duomenų perdavimo spartos matavimų rezultatai rodo, kad tinklo ląstelės vartotojui artėjant link ląstelės aprėpties zonos krašto ir priimamam signalo stiprumui gerokai nukritus, *HSUPA* duomenų perdavimo sparta yra gerokai paveikiama. Duomenų perdavimo sesijos pradžios duomenys rodo lygiavertį skirtingų *QoS* prioritetų vartotojų tarpusavio duomenų išsiuntimo spartos bazinės stoties kryptimi pasiskirstymą. Aukštesnio *QoS* profilio vartotojui tolstant nuo tinklo ląstelės aprėpties zonos centro, duomenų perdavimo sparta greitai prastėja, tačiau žemesnio prioriteto poros vartotojas atlaisvintų tinklo išteklių panaudoti negali, nes *E-DCH* kanalas *UL* kryptimi yra visiškai apkrautas. Vartotojų *HSUPA* srauto balansavimas, taikant *QoS* klasifikavimą aukštynkrypčiame kanale dinamiškais radijo ryšio sąlygomis beveik neužtikrina vartotojo išskirtinumo. Šį teiginį patvirtina ir bandymų rezultatai, kai du skirtingų prioritetų vartotojai duomenis aukštyni siunčia būdami ant aptarnaujančios tinklo ląstelės krašto. Tokio scenarijaus rezultatai pateikti 3.14 paveiksle.

Greito išteklių paskirstymo *HSUPA* kanale algoritmai nesuteikia jokio išskirtinumo abiejų profilių tinklo vartotojams sudarant būsimų *TTI* siuntimo langų eilę. Žema priimto pilotinio signalo vertė rodo, kad *UE* yra nutolęs nuo aptarnaujančios ląstelės, todėl iš *UE* priimtas signalas yra silpnas *DPCCH* (angl. *Dedicated Physical Control Channel*) kanale. Dėl to *E-DCH* kanalu perduodamo duomenų bloko dydis nuo 11 478 bitų mažinamas iki 18 bitų, o vartotojo sparta pastebimai krenta. Tai vyksta, nes bazinė *UMTS* tinklo stotis balansuoja visų prisijungusių *UE* siunčiamą galią *DPCCH* kanalu, kad ji būtų panaši. Spartus duomenų perdavimas 3G

ląstelėje pasiekiamas, kai *UE* leidžiama daugiau galios perduoti *DPDCH* (angl. *Dedicated Physical Data Channel*) kanalu, nei *DPCCH*. To pasiekti nepavyksta, kai daug galios išteklių yra sunaudojama valdymo informacijai perduoti, blogomis ryšio kanalo sąlygoms.



**3.14 pav.** *E-DCH* duomenų perdavimo spartos matavimai skirtingų *QoS* prioritetų vartotojams, esant ląstelės pakraštyje

**Fig. 3.14.** Data throughput over *E-DCH* for differently prioritized users on cell edge

Abu vartotojai esantys tinklo ląstelės pakraštyje pasiekia panašią duomenų perdavimo spartą aukštykrypčiame duomenų kanale. Šiuo atveju gauti papildomų resursų aukštesnis prioritetas nepadeda.

## 3.2. Mažos ląstelės heterogeninėje tinklo struktūroje

Kol reikalavimai 5G ryšio standartui dar tik sudarinėjami ir paaiškės tik dešimtmečiui baigiantis aišku viena, kad keliamų reikalavimų sąrašė bus įvardyti tinklo talpos bei aprėpties reikalavimai (Chen *et al.* 2014, Jiang *et al.* 2017). Ketvirtos kartos ryšio standartas visiškai atsisakė komutuojamų grandinių principu sudaromų sujungimų, o balso ir duomenų perdavimui naudoja *IP* paketus. Nemažiau svarbu, kad dabartiniai korinio ryšio tinklų vartotojai vis labiau pripranta prie nuolatinio duomenų srauto vartojimo ir nebėra linkę savęs riboti. Daugelis galiniuose įrenginiuose įdiegtų vartotojo taikomųjų programų su radijo tinklu palaiko beveik

nuolatinį susijungimą ir duomenų perdavimą. Tai reiškia nenutrūkstamą energijos srauto spinduliavimą į eterį. Siekiant kuo labiau sumažinti beprasmišką *UE* energijos vartojimą ir pagerinti tinklo talpą bei aprėptį didelio vartotojų tankio zonose pasirenkami mažų tinklo ląstelių sprendimai. Mažos ląstelės, kartu su išorinėmis makro tinklo stotimis sudaro *HetNet* tinklo struktūrą. Skirtingo dydžio patalpose mažų ląstelių sprendimai, perima biurų, namų zonose generuojamą vartotojų paketinių duomenų srautą. Toks vartotojų duomenų srauto nukreipimas priskiriamas vykdomam tarp skirtingų tinklo sluoksnių.

Sėkmingas vartotojų generuojamo srauto balansavimas ir perdavimas *HetNet* struktūroje yra sudėtingas uždavinys (Batkauskas *et al.* 2015). Jo metu susiduriama su daugybe klausimų tiesiogiai priklausančių nuo mažų ląstelių savybių. Žinant galimus privalumus ir trūkumus galima užtikrinti abipusę korinio ryšio sistemų paslaugų tiekėjų ir vartotojų patiriamą naudą.

Šiame poskyryje, teorinėje tyrimų dalyje, analizuojama mažų ląstelių problematika. Atsižvelgiant į tokių ląstelių būdingąsias savybes sudaromas jas charakterizuojantis integracijos modelis, kuris leidžia apibūdinti tokių ląstelių integracijos procesą. Teoriškai modeliuojamos mažų ląstelių galimų verslo modelių konfigūracijos, skirtos mažų ląstelių įtraukimui į rinką. Praktinė tyrimų dalis, realiomis korinio tinklo sąlygomis vertina mažų ląstelių efektyvumą pasidalinant vartotojų generuojamą srautą ryšio sistemoje.

### 3.2.1. Mažų ląstelių savybės ir problematika

Vienu esminių iššūkių mažų ląstelių integracijos procese yra laikoma decentralizuota jų plėtra. Femto ląstelės, kurios yra įvardijamos kaip pagrindas *HetNet* zonų evoliucijai, priskiriamos savaiminės konfigūracijos tinklo įrenginių grupei. *SON* savybės atlieka svarbią funkciją pradiniam ląstelės integracijos etape. Savaiminis optimizacijos procesas susideda iš planavimo, konfigūracijos, valdymo bei optimizavimo stadijų, kurios leidžia įrenginiui adaptyviai reaguoti į esamą radijo aplinką. *SON* užduotis yra dažninių ląstelės išteklių paieška ir parinkimas, tarpląstelinų ryšių sudarymas bei momentinė reakcija parenkant naujus ląstelės parametrus, randantis naujoms femto zonoms aplink. Dėl šios priežasties femto ląstelių savaiminės konfigūracijos mechanizmui skiriamas didelis dėmesys, o vystomų tyrimų tematika apima nuo radijo išteklių valdymo, iki tarp sisteminės sąveikos su makro tinklu. *SON* paskirtis yra užkirsti kelią galimoms ląstelių parametrų kolizijoms tinkle, o joms įvykus, kuo greičiau eliminuoti klaidas. Svarbiu *SON* privalumu laikoma, tinklo ląstelių konfigūracijos ir veikimo kontrolė be tinklo inžinieriaus priežiūros.

Pradinė femto zonos konfigūracija vykdoma *SON* savybių pagrindu. Ląstelė prijungta prie interneto linijos ir maitinimo, pradinio *ARFCN* (angl. *Absolute Radio Frequency Channel Number*) kanalo parinkimą vykdo remiantis jutimo (angl. *Sensing*) ir nustatymo (angl. *Tuning*) fazėmis. Jutimo fazėje femto ląstelė renka matavimų informaciją. Iš surinktų duomenų nustatymo fazėje priimamas sprendimas kokį kanalą naudoti. Kanalo parinkimas vykdomas vienu iš keleto būdų. Pirmuoju būdu visos femto ląstelės siuntinėja transliacines žinutes su informacija apie naudojamą *ARFCN* ir ląstelės parametrus. Taip įvertinama naudojamo kanalo blogumo vertė. Kanalas su pačia mažiausia verte priskiriamas nustatymo etape. Antrasis, galimas kanalo parinkimo būdas grįstas *UE* surinktais matavimais. *UE* prisijungus prie *HNB* priskiriamas atsitiktinis kanalas, o vėliau iš surinktos informacijos apie signalų lygius *HNB* generuoja triukšmų matricą. Remiantis šia matrica minimizuojami triukšmai ląstelėje, priderinant ląstelę prie esamos sistemos.

Kiti kanalo priskyrimo būdai siūlo naudoti pirmą laisvą, atsitiktinį ar ląstelės parinktą kanalą klausantis eterio. Tyrimai rodo, kad patikimiausia rentis matavimais iš *UE*. Transliacinės žinutės yra geriau nei eterio klausymas, o labiausiai paslaugų kokybė nukenčia priskiriant pirmą laisvą kanalą (López-Pérez *et al.* 2009). Rasti kanalą su mažiausiais triukšmais yra pakankamai sunku, nebent pasirinkimo galimybė yra plati. Skirti konkretų dažnį femto ląstelei yra ne efektyvu ir brangu operatoriaus požiūriu. Statinis dažnių padalijimas tarp femto ir makro lygmenų nėra įmanomas sistemoje naudojant tik vieną nešlį. Paprasčiausia dažninius išteklius padalinti tarp tinklo lygmenų, tačiau tai ne visada prasminga dėl skirtingos femto ir makro zonų apkrovos. Dinaminis kanalo išteklių paskirstymas reikalauja pastovaus informacijos keitimosi tarp tinklo ląstelių. Šį paskirstymą apsunkina tranzitinio tinklo realaus laiko išteklių valdymo ribotumas.

Tranzitinis *IP* tinklas yra pagrindinė kliūtis užtikrinant paslaugų kokybę ir femto zonos pasiekiamumą vartotojams. Femto ląstelės tranzitinis tinklas naudoja viešas interneto prieigos linijas, o *QoS* garantavimas jose yra sunkiai įgyvendinamas. Tokiose linijose sunku kontroliuoti vėlinimą, paketų praradimus. Dažnai susiduriama su riboto pralaidumo linijomis, ypač kai ta pačia linija teikiama *WiFi* prieiga. Interneto paslaugų tiekėjų taikomas *P2P* srauto formavimas stipriai pablogina paslaugas *HNB* aprėpties zonoje. Dėl to mažėja duomenų perdavimo sparta, prarandami balso srauto fragmentai (Chandrasekhar *et al.* 2008). Kartais, tranzitinio *IP* tinklo *QoS* užtikrinimas sudarant sutartis tarp femto zonų operatorių ir interneto paslaugų tiekėjų.

Išskirtinis femto zonų privalumas yra skirtingos prieigos kontrolės galimybės. Femto zonų prieigos taškai gali veikti kaip atvira, uždara arba hibridinė prieiga. Atviros prieigos atveju prie femto ląstelės gali jungtis vartotojas iš bet kurio *PLMN* (angl. *Public Land Mobile Network*), jei yra sudarytos tarptinklinio sujungimo sutartys. Hibridinės prieigos atveju *HNB* paslaugomis gali naudotis



*CSG* (angl. *Closed Subscribers Group*) ir kitų *PLMN* vartotojai, pagal tarptinklines sutartis, kurie nepriklauso *CSG*. Ne *CSG* vartotojų veikla ląstelėje gali būti ribojama, siekiant užtikrinti *CSG* vartotojų paslaugų kokybę. Esant uždarai prieigai *HNB* paslaugos prieinamos tik sukurtai *CSG* grupei. Uždara femto zona suteikia saugumą, didesnę spartą grupės nariams, tačiau ne grupės nariams tai silpno ryšio zonos ir trukdžių šaltiniai. *UE* gavęs autentifikavimo atmetimą iš uždaros *HNB*, gali kuriam laikui prarasti ryšį su tinklu (De La Roche *et al.* 2010).

Neplanuotas naujų femto zonų su uždara prieiga atsiradimas lemia interferencinių trukdžių padidėjimą aplinkinėms tinklo ląstelėms ir vartotojams. Mažų ląstelių trukdžių įtaka jaučiama tarp femto – makro, makro – femto, femto – femto lygmenų (Juang *et al.* 2010). Aukštynkrypčiame kanale *HNB* vartotojo sukeliami trukdžiai mažinami sumažinant siųstuvo galią. Žemynkrypčio *HNB* kanalo sukeliami trukdžiai mažinami ribojant *HNB CPICH* galią ir visus nesėkmingai bandančius prisijungti vartotojus nukreipiant į kitas ląsteles, taip išvengiama pakartotinio bandymo prisijungti. Sprendimas dėl galios mažinimo priimamas remiantis iš *UE* surinktais matavimais, kurie kartu naudojami femto ląstelės ryšio kanalo, galios ir kitų parametrų optimizacijai. Radijo aplinkos matavimų rinkimas iš *UE*, tai *SON* dalis, kuri leidžia tinklo elementus konfigūruoti pagal realias radijo aplinkos sąlygas (Patel *et al.* 2010, Andrews *et al.* 2012). Paminėtų automatinės konfigūracijos strategijų dėka, *HNB* gali būti perkelta į kitą vietą ir pati savaime prisiderins prie naujos aplinkos.

Eterio klausymas sudaro sąlygas femto ląsteles naudoti įvairiapusiškesnėmis aplinkos sąlygomis. Augant duomenų srautui heterogeniniuose korinio ryšio tinkluose talpos poreikis didėja, o spektro išteklių yra fiksuoti. Todėl ieškoma naujų femto ląstelėms skirtų dažninių kanalų. Kaip galimi spektro šaltiniai femto zonomis minimi trys kandidatai. Tai, operatoriaus spektro baltosios dėmės, spektro išteklių dalinami tarp keletos operatorių ir spektras iš kitų paslaugų. Pirmuoju atveju femto zonos ląstelės nustatymo fazėje pasirenka namų operatoriaus kanalą, kuris yra nenaudojamas tinkle. Antrasis metodas leidžia pasirinkti kanalą priklausantį bet kuriam ryšio operatoriui tame regione. Kai kuriose pasaulio dalyse yra įprasta praktika leisti naudoti visus mobiliojo ryšio dažninius išteklius su sąlyga, kad kanalas naudojamas mažos galios įrenginiuose (Damjanovic *et al.* 2011). Lietuvoje tokia praktika nėra įprasta ir dažnai nepriimtina dėl konkurencijos tarp operatorių. Paskutiniuoju atveju naudojami kanalai skirti saugumo institucijų, televizijos reikmėms, kurie šiuo metu taip pat yra laisvi. Tokia galimybė atsirado išjungus analoginę televiziją. Pasitelkiant *TVWS* (angl. *Television White Spaces*) spektro išteklius ir kognityvinio radijo savybes, interferenciniai trukdžiai tarp *DVB-T* ir korinio ryšio tinklo įrangos sumažinami, o nauji išteklių skiriami femto ląstelėms (Nekovec, 2010).

Bendrai femto zonos padidina operatoriaus tinklo talpą. Tinklo plėtra tampa spartesnė, o išlaidos sumažinamos, nes apsieinama be makro stočių. Ląsteles

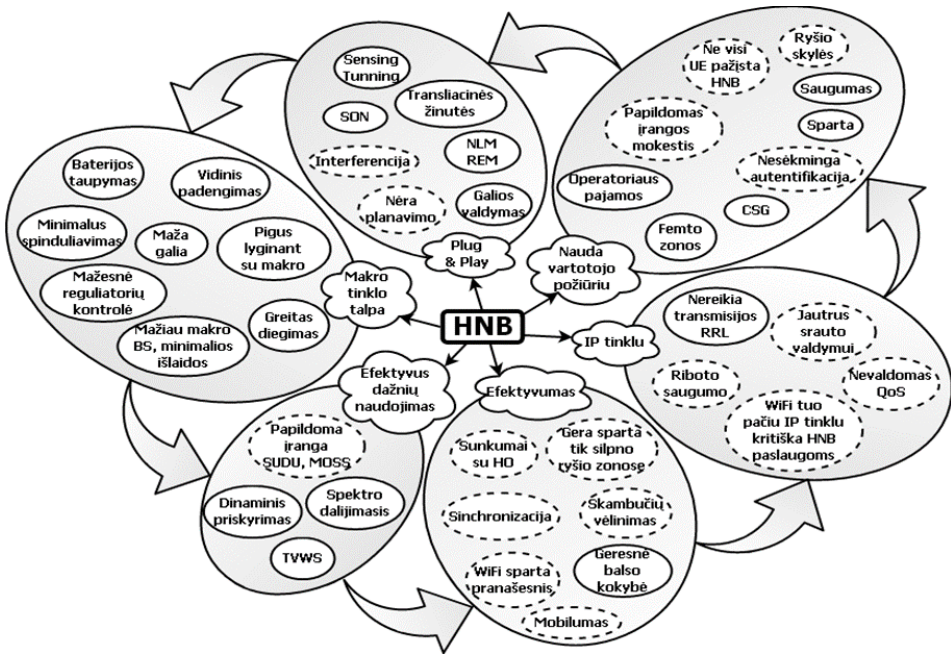
priartinus arčiau vartotojų užtikrinama didesnė duomenų perdavimo sparta, balso kokybė. Galinės vartotojų įrangos spinduliavimo galia sumažėja, todėl *UE* budėjimo laikas pailgėja. Vartotojų duomenų srautas subalansuojamas *HNB* zonose, todėl sumažėja makro tinklo apkrova ir pagerėja paslaugų kokybė ne femto tinklo vartotojams. Modeliavimo rezultatai teigia, kad femto zonų vartotojų gaunama duomenų perdavimo sparta gali būti iki penkių kartų didesnė nei makro tinkle, o balso kokybės *MOS* (angl. *Mean Opinion Score*) įvertis pagerėja 0,17 balo (Weitzen *et al.* 2010). Dėl išorinio tranzitinio tinklo femto zonų paketų vėlinimo laikas gali būti didesnis iki 40 %.

Vartotojo požiūriu individuali *HNB* zona yra finansiškai brangus sprendimas, nes tenka mokėti mėnesinį mokestį už įrangą. Rinkose, kur *HNB* plėtra aktyvesnė, taikomi neapmokestinami skambučiai, nemokamas duomenų srautas *HNB* ribose. Prognozių duomenimis, per ateinančius 3 – 4 metus *HNB* zonų skaičius pas ūkio subjektus padidės apie 20 % (Small cells, 2014). Pagrindiniais *HNB* zonų vartotojais taps verslo ir pramogų centrų, masinių susibūrimo vietų vartotojai.

### 3.2.2. Femto ląstelės integracijos modelis

Femto zonos, keičia nusistovėjusį tradicinį požiūrį į korinio ryšio sistemų plėtrą. Mažos ląstelės, kartu su makro tinklo ląstelėmis suteikia vartotojams galimybę ne tik išlikti nuolat ir visur prisijungus, tačiau kartu skatina didesnius paslaugų kokybės lūkesčius. Savaimė tai didina konkurencijos lygį tarp ryšio operatorių tinklų ir verčia vystyti turimą *HetNet* struktūrą. Femto ląstelių skverbtis, įgalina paslaugų tiekėjus plėsti esamus ryšio paslaugų verslo modelius ir telekomunikacijų paslaugas struktūrizuoti, pritaikant konkrečios *HNB* zonos vartotojams. Tokiu būdu įgaunamas didesnis vartotojų pasitikėjimas ryšio operatoriumi ir auginamas vartotojų lojalumas, o operatorius išlaiko esamus bei užsitikrina naujus pajamų šaltinius. 3.15 paveiksle parodytas *HNB* ląstelės integravimo modelis įvertina femto zonoms būdingas savybes ir duodamas naudas bei turimus trūkumus. Segmentuoto modelio tikslas atspindėti femto zonos paslaugų vartotojo ir ryšio operatoriaus padėtį *HNB* kontekste.

Pateiktas ląstelės integravimo modelis charakterizuoja šešias pagrindines su *HNB* koncepcija susijusias šakas. Šios šakos apima esmines femto ląstelių savybes ir nusako jų įtaką tinklo plėtros ir vartotojų patirties atžvilgiais. Detaliau poveikis yra skirstomas į susijusį su femto zonos diegimo procesu, tranzito tinklo, sąveikos su makro tinklu, išteklių paskirstymo, kokybės užtikrinimo bei vartotojo patiriamos naudos grupes. Grupėje, ištisine ir punktyrine linijomis paryškunami *HNB* zonos suteikiami privalumai arba sukeliama sunkumai. Ištisine linija žymimos teigiamos savybės, punktyrine – neigiamos (Žvynis, 2013).



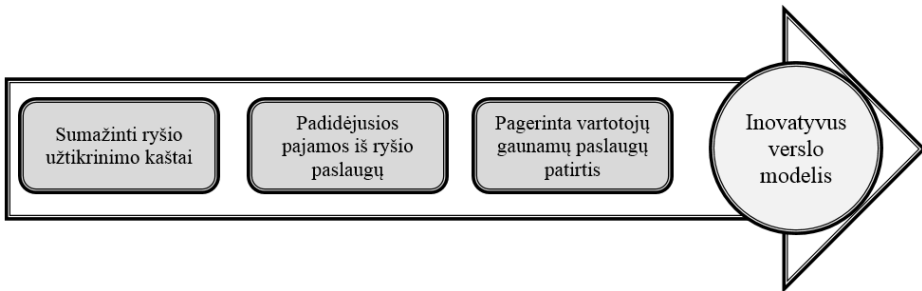
3.15 pav. Mažos ląstelės integravimo modelis  
Fig. 3.15. Integration model of small cell

Remiantis pateiktu modeliu, makro tinklo talpos savybių grupė pasižymi didžiausia teigiamų savybių dalimi. Tai pasiekti leidžia sąlyginai pigi ir greitai femto zonų plėtra, ryšio aprėpties padidėjimas, dėl kurios sumažinama *UE* spinduliavimo galia ir stipriai padidinama tinklo talpa. Todėl femto zonos dažnai minimos, kai *HetNet* korinėse ryšio sistemose susiduriama su vartotojų duomenų srauto balansavimu. *HNB* priklauso mažos galios įrenginių grupei, dėl to reikalavimai registruojant ląsteles pas ryšio reguliatorių paprastėja, o tinklo plėtra spartėja. Operatorius išvengia detalių tinklo planų rengimo ir pateikimo reguliatoriui, nes femto zonos laikomos panašiomis į *WiFi* taškus, kurių registracija nereikalinga. Rimtu iššūkiu, sunkiai prognozuojamos femto zonų plėtros etape laikomas vartotojų prieigos užtikrinimas. Įprastai problemai spręsti pasitelkiamos srauto valdymo ir apkrovos balansavimo priemonės. Vartotojų prieiga užtikrinama prioretizuojant vartotojus ir paprastinant *HNB* prieigos kontrolę. Ilgainiui turėtų nelikti *UE* neatpažįsta mažų ląstelių. Didžiausiu iššūkiu mažų ląstelių srityje laikoma tranzitino *IP* tinklo *QoS* užtikrinimo problema. Nepatikimas tranzitinis tinklas yra priežastis prastos vartotojų patirties naudojantis femto zonos paslaugomis. Šiuo metu problema sprendžiama sudarant sutartis su tranzitinio *IP* tinklo paslaugų tiekėjais.

Didelė dalis, kitų modelyje įvardytų mažų ląstelių savybių yra priklausomos nuo savaiminės optimizacijos metodų realizavimo. Pradedant mažomis ląstelėmis *SON* savybės tampa neatsiejama šiandieninių *HetNet* sistemų dalimi. Pateikta modelio struktūra, sudaryta remiantis mažų femto ląstelių pagrindu visapusiškai apibūdina mažų ląstelių charakteringąsias savybes. Integracijos modelis yra informatyvi priemonė, leidžianti paprasčiau analizuoti *HetNet* sistemas ir planuoti jų plėtrą. Modelis yra savitas tuo, kad pristato mažas ląsteles korinio ryšio sistemoje pagal daugelį aspektų ir apima daugeliui pasaulio regionų, kuriuose naudojamos mažos ląstelės, aktualias savybes.

### 3.2.3. Femto ląstelių plėtros galimybės telekomunikacijų versle

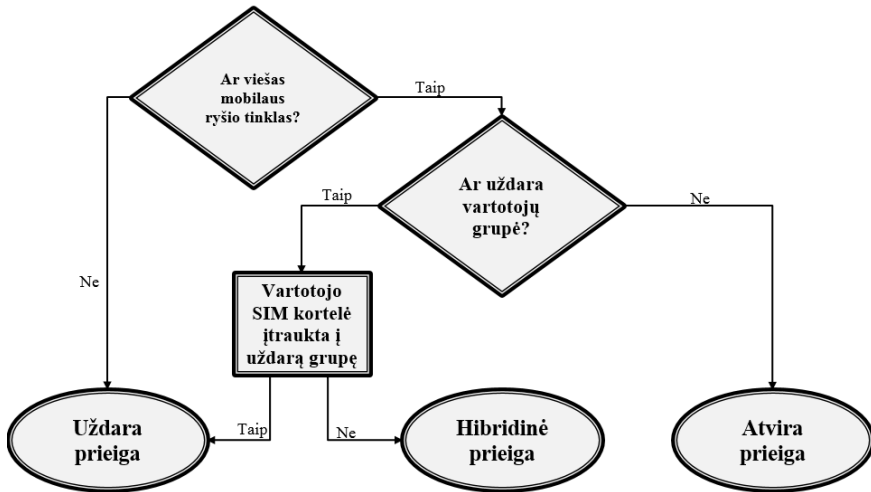
Pagal sudarytą mažos *HNB* ląstelės modelį, tolimesnė tyrimo dalis plėtojama ieškant tokių ląstelių integracijos galimybių į korines ryšio sistemas, sudarant galimus verslo modelius. Remiantis modelyje apibrėžtomis femto ląstelių charakteringosiomis savybėmis, pirminė femto zonų, skirtų verslui ir namų ūkiams vystymo strategija gali būti apibrėžta taip. Femto zonos inovatyvus verslo modelis yra toks, kuris leidžia pagerinti ryšio paslaugų vartotojų patirtį, o ryšio tiekėjui sumažinti tinklo plėtros ir operacinius kaštus, įsisavinant naujus pajamų šaltinius. Grafiškai femto zonų vystymo galimybė gali būti atvaizduota 3.16 paveiksle.



3.16 pav. Femto zonų plėtros strategija  
Fig. 3.16. Expansion strategy of femto zone

Pateiktai strategijai plėtoti palankias sąlygas sukuria femto zonos vartotojų klasifikavimo galimybė, pagal vartotojų prieigos prie femto zonos tipus. Prieigos tipas vartotojus leidžia suklasifikuoti į dvi kategorijas. Vartotojai, kurie priklauso femto zonos vartotojų grupei ir vartotojai, kurių prisijungimai prie femto zonų yra ribojami. Nuo vartotojo kategorijos ir arčiausiai jo esančios femto ląstelės prieigos

tipo priklausys vartotojo gaunamų paslaugų kokybė. *HNB* plėtros scenarijus, pagal prieigos tipą prie femto zonos, pateiktas 3.17 paveiksle.



3.17 pav. Femto ląstelės plėtros scenarijus pagal vartotojų prieigą

Fig. 3.17. Expansion scenario of femto cell based on user access

Uždara prieiga reiškia, kad vartotojai prisiregistravę makro tinkle patekti į uždara *HNB* vartotojų grupę tiesiogiai negali. Zona yra pasiekama tik vartotojams, kurių profilyje yra įtraukta prieiga prie konkrečios uždaros *CSG*. Taip vartotojų skaičius uždaroje *HNB* zonoje yra stipriai apribojamas. Atviros ir hibridinės prieigos atvejais ląstelę gali pasiekti didesnė vartotojų dalis. Atvira prieiga yra prieinama visiems heterogeninio tinklo vartotojams, todėl tokiose ląstelėse vartotojų profiliai yra nelygiaverčiai ir skirtingi. Tokios prieigos ląstelėje vartotojo prioritetą yra apibrėžiamas pagal *QoS* parametrus. Hibridinės prieigos požymis yra tai, kad vartotojai turintys atviros grupės prieigos žymę ir esantys hibridinėje *HNB* ląstelėje gali būti iš jos pašalinti. Taip užtikrinama *CSG* vartotojų paslaugų kokybė.

Aptartų prieigų scenarijai yra priklausomi nuo santykių tarp suinteresuotų šalių ir gali būti apibrėžti informacinių ir komunikacinių technologijų (angl. *ICT - Information and Communication Technologies*) verslo modeliuose naudojamais parametrais (Ballon, 2007). *ICT* paslaugų, produktų, sistemų modeliavimui bei analizei naudojama *ICT* parametrų matrica, kurios pagrindą sudaro dvi grupės parametrų: kontrolės ir vertės parametrai. Derinant šių parametrų smulkesnių grupių parametrus, kuriami nauji verslo modeliai, bet kuriai *ICT* sistemai. *ICT* parametrų matrica pateikta toliau.

**3.1 lentelė.** Informacijos ir komunikacijos technologijų verslo modeliavimo parametrai  
**Table 3.1.** Matrix of information and communication technologies modelling parameters

<b>Kontrolės parametrai</b>			
Vertė tinklui		Funkcinė architektūra	
Koncentruotas	Pasiskirstęs	Modulinė	Integruota
Integracijos lygis		Intelektualumo pasiskirstymas	
Integruota	Išskaidyta	Centralizuotas	Pasiskirstęs
Vartotojų valdymas		Suderinamumas	
Tiesioginis	Per tarpininkus	Yra	Nėra
<b>Vertės parametrai</b>			
Finansinio modelio parametrai		Vertės konfigūracijos parametrai	
Kainos modelis		Požicionavimas	
Koncentruotas	Pasiskirstęs	Papildantis	Pakaitinis
<i>Pajamų modelis</i>		<i>Vartotojo įtraukimas</i>	
<i>Tiesioginis</i>	<i>Netiesioginis</i>	<i>Aukštas</i>	<i>Žemas</i>
Pajamų pasidalijimo modelis		Vertės siekimas	
Yra	Nėra	Kaina/Kokybė	Fiksuota

*ICT* verslo modeliavimo matricos parametrai sudaryti taip, kad grupuojant atskirus parametrus galimas praktiškai bet kokios *ICT* struktūros modeliavimas. Modeliavimas, pagal tam tikrus parametrus leidžia įvertinti ką kuriama *ICT* sistema galės pasiūlyti vartotojams bei kokios vertės bus gaunamos. Įprastai naudojami keturių lygių parametrai: vertės tinklui, funkcinės architektūros, finansinio modelio bei vertės konfigūracijos parametrai. Vertės tinklui parametų grupė leidžia modeliuoti ir numatyti analizuojamos *ICT* architektūros vaidmenį ateities rinkose. Funkcinė architektūra apibrėžia funkcinį mazgų prisitaikymo galimybes technologinėje plotmėje, žvelgiant į ateities perspektyvas. Finansinio modelio parametrai vertina finansinių srautų, susietų su būsimo verslo modeliu pasiskirstymą ir šaltinius. Likę vertės konfigūracijos parametrai skirti modeliuoti *ICT* sistemos bendruosius bruožus, susijusius su produktais ir paslaugomis.

Atsižvelgus į sudarytą *HNB* ląstelės modelį bei matricos parametrus, galima sakyti, kad kontrolės parametų reikšmė nėra pagrindinė. Tinklo vertė pasireiškia stipriai išaugusia bendra korinės ryšio sistemos talpa. Tuo tarpu, mažų ląstelių funkcinė architektūra yra iš dalies autonomiška, nes mažos ląstelės korinėje ryšio sistemoje sudaro atskirą tinklo ląstelių sluoksnį. Tarpusavio sąveika tarp mažų

ląstelių ir makro tinklo organizuojama tais pačiais principais kaip ir makro tinkle, o stuburinis tinklas yra bendras. Analizuoti galimų scenarijų kontrolės parametru atžvilgiu nėra, tačiau yra vertės parametru atžvilgiu. Galimai didžiausia verslo modelio sėkmė priklausys nuo pajamų modelio ir vartotojų įtraukimo parametru. Įprastinis tinklų operatorių pajamų modelis veikia teikiant vartotojams ryšio paslaugas statiniais duomenų perdavimo kanalais, priskirtais ryšių regulatoriaus. Turimi spektriniai ištekliai tiesiogiai įtakoja ryšio operatorių pajamas. Paslaugų tiekėjai, kurie neturi pakankamai spektrinių išteklių yra priversti veikti kaip virtualūs operatoriai arba nuomotis tinklą. Mažų ląstelių savybės operatoriams paprasčiau leidžia žiūrėti į spektrinius išteklius, nes duomenų perdavimo kanalai gali būti dinamiški. Dinamiškai priskiriami kanalai leidžia operatoriams su ribotais spektro ištekliais įsisavinti pajamas gaunamas iš *HNB* zonų. Operatorių, su platesne duomenų kanalo pasirinkimo galimybe, pajamų augimas taip pat tikėtinas, nes dinamiinių kanalų įtraukimas leidžia teikti kokybiškesnes paslaugas. Duomenų kanalo juostos plotis yra tiesiogiai susijęs su duomenų sparta. Dinaminio spektro panaudojimas telekomunikacijų paslaugoms teikti formuoja naują požiūrį į pajamų modelį. Kita svarbi *HNB* integracijos verslo modelio dalis yra vartotojai. Vartotojus galimoje verslo modelio aplinkoje charakterizuoja vartotojų įtraukimo parametrai, kurie remiantis *HNB* savybėmis nėra visiškai palankūs. Femto zonos mokestis ribotų vartotojų didesnę susidomėjimą *HNB* zonomis, todėl siūloma taikyti lanksčią atsiskaitymo politiką, sumažinant paslaugų apmokestinimą femto zonoje.

Remiantis parametrais ir *HNB* charakteristikomis, galimos sudaryti keturios femto zonų verslo modelių plėtros grupės. Kiekviena grupė yra veikiamą skirtingos pasirinktų parametru vertės. 3.18 paveiksle grupės susietos su vertės parametrais.

		Pajamų modelis	
		Tiesioginis	Netiesioginis
Vartotojų įtraukimas	Žemas	Vartotojas neprideda prie HNB mokesčio	Vartotojas neprideda prie HNB mokesčio
	Aukštas	Vartotojas prisideda prie HNB mokesčio	Vartotojas prisideda prie HNB mokesčio

Statinis dažniųjų resursų priskyrimas

Dinaminis dažniųjų resursų priskyrimas

Statinis dažniųjų resursų priskyrimas

Dinaminis dažniųjų resursų priskyrimas

3.18 pav. Verslo modelių grupės  
Fig. 3.18. Groups of business models

Pateikti keturi femto zonų plėtros scenarijai, kurie yra priklausomi nuo ryšio operatoriaus spektro išteklių priskyrimo strategijos bei vartotojų įtraukimo. Tai tik keletas iš viso galimų *HNB* verslo modelių variantų. Kaip tiesioginė pajamų modelio vertė laikomas operatoriaus statinis duomenų kanalo priskyrimas femto zonai. Tuomet, netiesioginė pajamų modelio vertė atspindėtų dinamiškai valdomą kanalą. Šiuo atveju vartotojų įtraukimo požiūriu pagrindinį vaidmenį vaidina vartotojų lojalumas ir noras prisidėti prie *HNB* eksploatacijos kaštų. Jei vartotojų suinteresuotumas yra menkas, tada vartotojų įtraukimas yra laikomas žemu. Ir atvirkščiai, laikomas aukštu, kai vartotojai sutinka padengti dalį išlaidų mainais į aukštesnės kokybės paslaugas ir palankesnius tarifus. Analizuojant bandomus rinkai pasiūlyti femto zonų sprendimus aptinkama, kad panašiu į aptartą kelią bando rinktis tokie ryšio tiekėjai, kaip *Verizon*.

*ICT* verslo modeliavimo metodais sudarytiems *HNB* verslo scenarijams galima apibrėžti tikėtinas femto zonų konfigūracijas. Pastarosios turi būti suprantamos kaip verslo modelių papildymas. Jų tikslas – nurodyti subjektą vaidinantį pagrindinį vaidmenį atitinkamame verslo modelyje. Galimos konfigūracijos:

1. Į operatorių orientuota konfigūracija: pagrindinį vaidmenį valdant femto zoną turi korinio ryšio tiekėjas.
2. Į trečiasias šalis orientuota konfigūracija: pagrindinis vaidmuo tenka trečiajai šaliai, kuri parduoda paslaugas ryšio operatoriui. Operatorius plėtoja ir eksploatuoja *HNB* tinklą.
3. Į vartotoją orientuota konfigūracija: vartotojas yra pagrindinis femto zonos valdytojas. Užtikrinama aukšta paslaugų kokybė ir aprėptis individualiam vartotojui.
4. Tarpininkavimu paremta konfigūracija: pagrindinį vaidmenį atlieka tarpininkas, kuris užtikrina visavertį vartotojo įsitraukimą.

**3.2 lentelė.** Femto ląstelės verslo modelių konfigūracijos pagal valdantį subjektą  
**Table 3.2.** Configurations of femto cell business models based on managing entity

		Pajamų modelis	
		Tiesioginis	Netiesioginis
Vartotojų įtraukimas	Žemas	Į operatorių orientuota konfigūracija	Į trečiasias šalis orientuota konfigūracija
	Aukštas	Į vartotoją orientuota konfigūracija	Tarpininkavimu paremta konfigūracija



Išvardytas konfigūracijas priskiriant gautoms verslo modelių grupėms, verslo modelių matrica gali būti aprašyta, kaip pateikta 3.2 lentelėje.

Verta atkreipti dėmesį, kad per pastaruosius keletą metų realiai atsirandantys femto zonų sprendimai verslo ir privatiems vartotojams dažniausiai renkami pirmą ir trečią konfigūracijas. Operatorius, kaip pagrindinis *HNB* valdytojas įprastai figūruoja verslo centrų, stadionų ir kitų masiškai lankomų vietų atveju. Kitu atveju, *HNB* zona veikia kaip *CPE* (angl. *Customer Premises Equipment*) ir yra skirta konkretaus vartotojo paslaugoms pagerinti.

Svarbu pabrėžti, kad ne kiekvieną verslo modelio konfigūraciją galima naudoti su 3.17 paveiksle pateiktais scenarijais. Uždaros vartotojų grupės prieigos atveju tik į operatorių ir į vartotoją orientuotos konfigūracijos yra leidžiamos. Nuo trečiųjų šalių ir tarpininkavimo priklausanti konfigūracijos pagrinde galėtų būti taikomos atviros femto zonos prieigos atveju (Sukarevičienė *et al.* 2014). Hibridinės prieigos scenarijui būdingi visi pateikti konfigūracijų variantai. *HNB* vystymo scenarijai pateikti 3.3 lentelėje.

**3.3 lentelė.** Femto ląstelės vystymo scenarijai pagal valdantį subjektą ir prieigos tipą  
**Table 3.3.** Scenarios of femto cell development based on managing entity and access

Prieigos scenarijus	Uždara	Atvira	Hibridinė
<b>Į operatorių orientuota konfigūracija</b>	•		•
Į trečiasias šalis orientuota konfigūracija		•	•
<b>Į vartotoją orientuota konfigūracija</b>	•		•
Tarpininkavimu paremta konfigūracija		•	•

Sudarytos ir aptartos galimos verslo modelių konfigūracijos yra tik pagrindas femto zonų verslo modeliui sudaryti. Pasirinkti du vertės parametrai ir turimi trys femto zonų, pagal prieigos galimybę vystymo scenarijai leidžia sukurti 12 skirtingų verslo modelių. Patys verslo modeliai šiame darbe nėra sudarinėjami. Kokį modelį femto zonų plėtrai pasirinkti priklauso nuo ryšio operatoriaus veiklos politikos. Modelio kryptčiai įtakos taip pat turi vartotojų finansinis pajėgumas bei paslaugų kokybės samprata ir lūkesčiai. Esami šiandieniniai femto zonų plėtros variantai rodo, kad dažniausiai pasirenkamos į operatorių ir į vartotoją orientuotos konfigūracijos. Dažnu atveju tas pats ryšio operatorius eina abiem kryptimis iš karto. Pirmu atveju, didelių susibūrimų vietose ar verslo klientams taikoma į operatorių orientuota konfigūracija. Tada operatorius pats įrengia femto zoną ir ją prižiūri. Kitu atveju vartotojams parduodama femto zona, kurią valdo jie patys.

Didele dalimi mažų ląstelių potencialas yra orientuotas į *SON* funkcionalumo vystymą ir 5G ryšį. Žadama, kad femto ląstelės taps virtualių korinių tinklų dalimi, į atskiras grupes išskaidant fizines ir virtualias sudedamąsias dalis. Virtualių

tinklo elementų privalumai pasireiškia galimybe reikiamus išteklius alokuoti pagal konkretų poreikį. Toks žingsnis, gerokai padidintų galimų verslo modelių, kurie remtųsi į trečiąsias šalis ir tarpininkavimu grįsta konfigūracija, atsiradimo galimybes. Dabar tokie modeliai nėra palankūs arba neįgyvendinami dėl per didelės kainos. Kad femto zonų plėtros galimybių paieška ir verslo modelių kūrimas yra aktualus, rodo femto ląstelių poreikio duomenys. 2016-ųjų metų duomenims, femto ląstelių diegimas išaugo iki 4 milijonų per metus. Po trijų metų tikimasi 10 milijonų naujų femto zonų kasmė.

### 3.2.4. Femto ląstelės Lietuvoje

Ryšių reguliavimo tarnybos surinkti duomenys, apie Lietuvos korinio ryšio tinklų aprėpties zonas, skelbia, kad mobilaus 2G/3G ryšio signalas yra pasiekiamas daugiau nei 99 % šalies teritorijos. 4G ryšio signalas, vieno iš operatorių tinkle yra prieinamas 98 % šalies teritorijos. Tokie matavimų rezultatai gauti, ryšio sąlygas vertinant atvirose vietovėse. Šie duomenys rodo, kad Lietuvos korinio ryšio tinklų infrastruktūra yra išvystyta itin gerai, o prisijungimas prie mobilaus ryšio tinklo įmanomas praktiškai iš be kur.

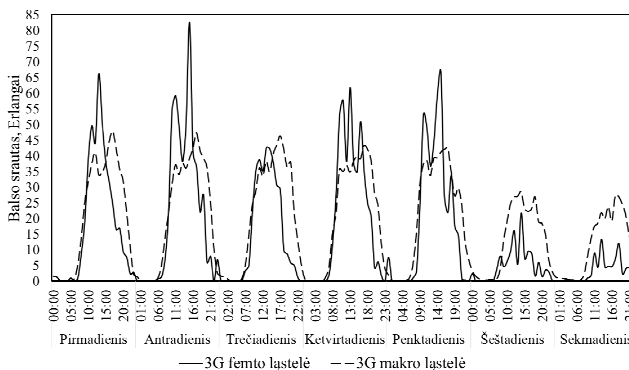
Talpa tinkle plečiama pridėdant papildomus kanalus makro tinklo bazinėse stotyse, didinamas techninės ir programinės įrangos išteklių limitas. Papildomi žemo dažnio nešliai tik iš dalies padeda pagerinti ryšio signalą tinklo stoties aprėpties zonoje, tačiau išaugusi aprėptis ir pagerėjęs signalo lygis pritraukia vartotojų srautą. Dėl to tinklų operatoriams nelieka nieko kita, kaip tik tankinti tinklo ląstelių kiekį, siekiant geriau paskirstyti tinklo apkrovą. Ląstelių tankinimas padeda spręsti tinklo talpos klausimą, o taip pat ląsteles priartina arčiau vartotojų, taip užtikrinamas aukštesnis priimamo signalo lygis ir kokybė. Labiausiai priartinti tinklo ląstelę prie vartotojų leidžia mažos galios ląstelės. Toks būdas laikomas ir paprasčiausiu, nes ląstelės įrengimo kaštai yra minimalūs.

Mažos galios ląstelių pritaikymas korinio ryšio tinkluose nėra visiškai naujas reiškinys. Pradžią tam davė GSM technologijoje veikiančios piko ląstelės. Piko ląstelių sluoksnis pradėjo formuotis *HetNet* struktūrą ir jos buvo diegiamos balso ryšio paslaugoms pagerinti. Lietuvos korinio ryšio operatoriai taip pat plėtoja šių ląstelių sluoksnį. Dažniausiai jos pasitelkiamos silpno signalo zonose, todėl iš esmės naudojamos aprėpčiai užtikrinti ir tik retais atvejais srautui paskirstyti. Tuo tarpu femto ląstelių skverbtis Lietuvoje, bent kol kas išlieka minimali. Nors femto zonomis domisi visų tinklų operatoriai, tačiau spartaus jų vystymo dar nesiimama. Kaip pagrindinės to priežastys įvardijamos ne visiškai išnaudota esama tinklo talpa, mažesnis nei kitų Europos šalių vartotojų paslaugų naudojimas. Didėjant persiunčiamų paketinių duomenų srautui netruks, kai Lietuvos mobilaus ryšio tinkluose ims sparčiai didėti femto zonų. Jau šiandien tinkluose egzistuoja vietų,

kur makro tinklo stotys yra itin stipriai apkraunamos piko momentais. Nors lietuvių mobiliųjų duomenų sunaudojimas per mėnesį yra vienas mažiausių visoje Europoje [Mobile Data Usage Report, 2016]. Statistiškai pagal sunaudotus duomenis Lietuva lenkia tik Portugaliją ir Prancūziją, kuriose sąlyginė perduoto megabaito kaina yra kur kas aukštesnė. Remiantis tuo pačiu tyrimu, didelis duomenų sunaudojimas yra stipriai susijęs su vartotojo galinės įrangos modeliu. Kuo vartotojo įranga yra naujesnė ir ekrano įstrižainė didesnė, tuo duomenų sunaudojimas per *SIM* kortelę yra didesnis. Lietuvos vartotojų galinės įrangos paplitimas kol kas neprilygsta vartotojų įrangai Švedijoje ar Suomijoje, kur duomenų sunaudojimas yra vienas didžiausių. Šiose šalyse dažnas vartotojas naudoja naujausius, populiarių gamintojų mobiliuosius telefonus. Šie veiksniai lemia, kad šiose šalyse femto zonų paklausa yra daug didesnė. Vartotojams atsinaujinus savo įrangą ir pradėjus dažniau naudotis duomenų perdavimu Lietuvos korinio ryšio tinkluose, tikimasi didesnės femto zonų paklausos.

Femto zonų tyrimo metu, bendradarbiaujant su Lietuvos korinio ryšio operatoriumi atlikta ryšio paslaugų vertinamoji analizė, kai vartotojų duomenų srautas perduodamas per mažos galios ląstelę. Tyrime analizuotas vartotojų perduodamos informacijos srauto pasiskirstymas tarp femto ir makro ląstelių. Kartu siekta įvertinti tinklo vartotojų patiriamą naudą paslaugas gaunant per mažas ląstelę. Femto ląstelės buvo integruotos skirtingų vartotojų patalpose, o jų aprėpties zonos patenka į to paties operatoriaus makro tinklo ląstelių aprėptį. Tokiu būdu siekiama nustatyti vartotojų srauto balansavimo efektyvumą, kai balso ir duomenų srautui perduoti naudojamas balansavimas tarp skirtingų tinklo sluoksnių. Mažos ląstelės turi aukštesnį prioritetą nei makro tinklo ląstelės, todėl *UE* prioritetine tvarka pirmiau renkasi tokią ląstelę.

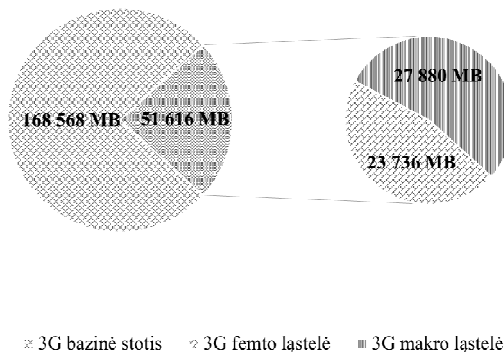
3.19 paveiksle yra pateikti matavimų rezultatai su balso ir duomenų srauto pasiskirstymu tarp femto – makro tinklo ląstelių.



3.19 pav. Balso srauto pasiskirstymas tarp femto ir makro tinklo ląstelės 3G tinkle  
**Fig. 3.19.** Distribution of voice traffic in femto and macro cells for 3G

Isteigus femto zoną operatoriaus kliento patalpose gauta, kad 3G makro tinklo ląstelės balso srauto apkrova sumažėjo perpus. Iki femto zonos atsiradimo makro tinklo ląstelės balso srauto apkrova piko valandomis siekė apie 100 Erlangų apkrovą. Pagal unikalinius aparatinės įrangos numerius nustatyta, kad femto zonoje prisiregistravo didžioji dalis nuolatinių makro ląstelės vartotojų. Tuo tarpu makro ląstelės naudotojais išliko dalis pastovių vartotojų iš aplinkinių pastatų bei pro šalį keliaujantys vartotojai. Femto zona šiuo atveju leido balso srauto apkrovą aprėpties zonoje padalinti tolygiai. Priklausomai nuo vartotojų skaičiaus femto zonoje, apkrovos pasidalinimas gali skirtis. Savaitgalio dienomis femto zonos perduodamas srautas sumažėja bet kelis kartus, dėl stipriai sumažėjusio vartotojų skaičiaus.

Panaši situacija gaunama ir stebint duomenų srauto pasiskirstymą tarp femto ir makro tinklo ląstelės. Savaitinis duomenų srauto pasiskirstymas 3.20 paveiksle.

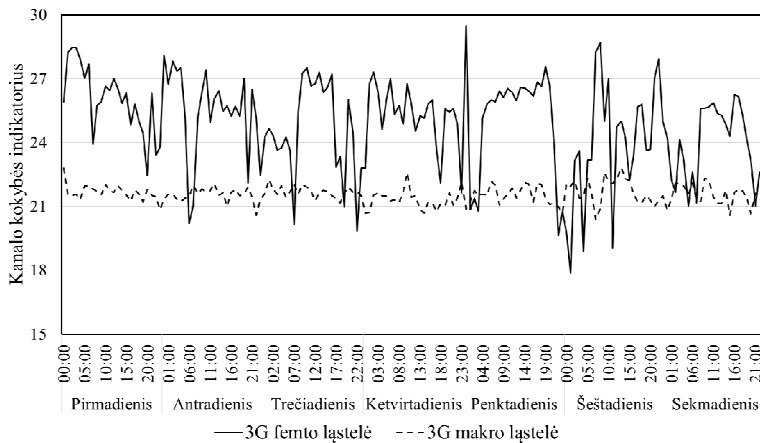


**3.20 pav.** Duomenų srauto pasiskirstymas tarp femto ir makro tinklo ląstelių 3G tinkle  
**Fig. 3.20.** Distribution of data traffic in femto and macro cells for 3G

3G makro tinklo ląstelė žymi tik vieną iš bazinės stoties sektorių atšakų, kurios yra bazinėje stotyje. Tipiškai bazinę stotį sudaro trys sektoriai. 3G bazinės stoties duomenų apkrova žymi visų trijų bazinės stoties sektorių suminę duomenų srauto apkrovą. Vidutiniškai makro tinklo ląstelėje aukštynkrypčiu ir žemynkrypčiu kanalais perduodamas duomenų srautas siekė 50 gigabaitų. Pradėjus vartotojams duomenis siųsti per femto zoną ląstelės apkrova sumažėjo dvigubai, o perduodamas srautas pasiskirstė tolygiai. Visos bazinės stoties lygiu femto ląstelė perduodamų duomenų srautą leido sumažinti 14 %. Tai reiškia, kad bazinės *UMTS* tinklo stoties ištekliai skirti skaitmeninių signalų apdorojimui yra atlaisvinami. Šiais ištekliais bendrai naudojasi visos bazinės stoties ląstelės. Papildomos femto zonos šios bazinės stoties aprėpties zonoje leistų dar labiau sumažinti jos apkrovą.

Apkrovos sumažėjimas priklausytų nuo vartotojų skaičiaus ir jų duomenų srauto tose zonose.

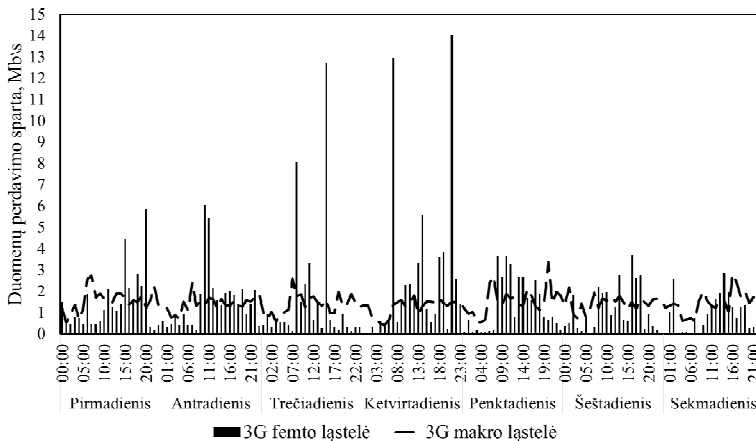
Femto zonų steigimas priartina tinklo ląsteles arčiau vartotojų. Tai ne tik leidžia sumažinti *UE* spinduliavimo galią, tačiau pagerinama priimamo signalo kokybė, užtikrinami geresni kiti radijo kanalo kokybės parametrai. Femto zonos vartotojų kanalo kokybės indikatorius pasiskirstymas lyginant su makro ląstelės vartotojų *CQI* vertėmis pateiktas 3.21 paveiksle. Matavimų duomenys nepertraukiamai rinkti visą savaitę, nuo pirmadienio iki sekmadienio. Išmatuotos vertės atspindi daugelio, įvairiomis kryptimis judančių vartotojų kanalo kokybės sąlygas analizuojamose tinklo ląstelėse.



**3.21 pav.** Femto zonos ir makro ląstelės kanalo kokybės verčių pasiskirstymas  
**Fig. 3.21.** Distribution of channel quality for femto and macro cells

Vidutinė makro ląstelės vartotojo išmatuota *CQI* vertė siekia 21,56, o vartotojo esančio femto ląstelės aprėpties zonoje 24,9. Didesnė kanalo kokybė femto zonoje reiškia, kad klaidingų duomenų blokų santykis kanale yra žemesnis, o kanalo trukdžiai mažesni. Vartotojams su didesne *CQI* verte duomenų perdavimui skiriami didesni *TBS*, o duomenų perdavime naudojamos aukštesnės kodavimo schemas. Todėl vartotojai femto zonoje gauna didesnę duomenų perdavimo spartą sesijos metu ir kokybiškesnę balsą skambučio metu, negu prisiregistravę makro ląstelėje. Vartotojų patiriamos duomenų perdavimo spartos ir balso paslaugų kokybės matavimų rezultatai pateikti 3.22–3.23 paveiksluose. Jie pristato visų ląstelėje esančių vartotojų vidutinę duomenų perdavimo spartą ir balso kokybės įvertio pasiskirstymą, pagal *MOS* skalę. Duomenų perdavimo spartos duomenys surinkti iš visų tinklo ląstelėje buvusių vartotojų, kurie turėjo aktyvią duo-

menų sesiją *DCH* duomenų kanalo režime. Spartos matavimų rezultatai neskaidomi pagal paslaugos rūšį. Pateikiami matavimai rodo vidutinę duomenų sesijos spartą, kai duomenys naudojami foninei, interaktyviajai ar vaizdo perdavimo paslaugai. Balso kokybei įvertinti naudoti nuotoliniai balso kanalo kokybės vertinimo matavimai *VQI* (angl. *Voice Quality Indicator*). Šių matavimų privalumas, kad vienu metu vartotojo suprantama balso kokybė gali būti vertinama iš karto daugeliui vartotojų. *VQI* matavimų pagrindą sudaro *PESQ* (angl. *Perceptual Evaluation of Speech Quality*) standartu ir metodologija grįstas balso kokybės vertinimas, o gaunami rezultatai klasifikuojami pagal *MOS* skalę. Tyrimo metu, buvo įvertinta visų ląstelėse balso skambučius atlikusių vartotojų balso kokybė. *MOS* įverčių pasiskirstymas vertinamas bendrai, neskirstant koks kodekas (*NB-AMR*, *WB-AMR*) balso skambučiui buvo naudotas.

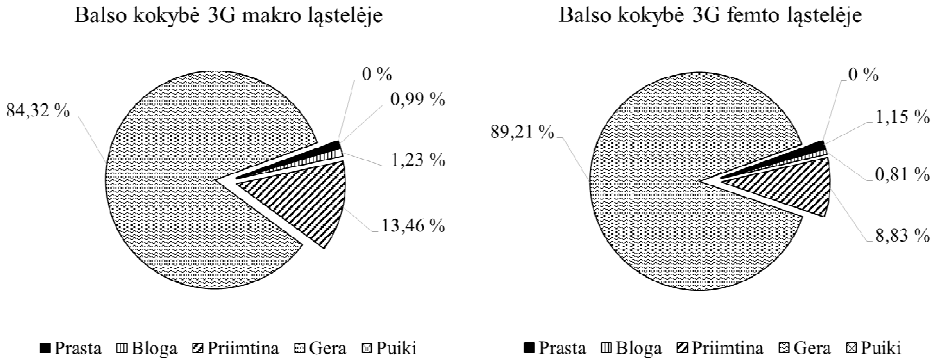


**3.22 pav.** Femto zonos ir 3G makro ląstelės vidutinės duomenų perdavimo spartos pasiskirstymas

**Fig. 3.22.** Distribution of average data throughput for 3G femto and macro cells

Duomenų perdavimo spartos matavimų rezultatai atspindi tipinio ląstelės vartotojo pasiekiamą žemynkryptę duomenų spartą savaitės bėgyje. Rezultatai gauti vertinant mišrias vartotojų duomenų perdavimo paslaugas. Tai atitinka realų daugelio vartotojų paslaugų naudojami pobūdį. Tokio scenarijaus atveju femto zonos vartotojų vidutinė duomenų perdavimo sparta yra 10 % didesnė nei makro ląstelės vartotojų. Svarbu tai, kad spartesnis duomenų perdavimas pasiekiamas dienos metu, kai ląstelės apkrova didžiausia. Nakties metu, vartotojų skaičius femto zonoje stipriai sumažėja, o duomenų perdavimas praktiškai nevykdomas. Vartotojų duomenų srauto nukrovimas nuo makro tinklo ląstelės leidžia makro tinklo ląste-

lėje išlaikyti panašiai tolygią duomenų perdavimo spartą visos dienos metu. Vartotojai esantys makro ląstelės aprėpties zonoje praktiškai nejaučia paslaugų kokybės svyravimo paros bėgyje.



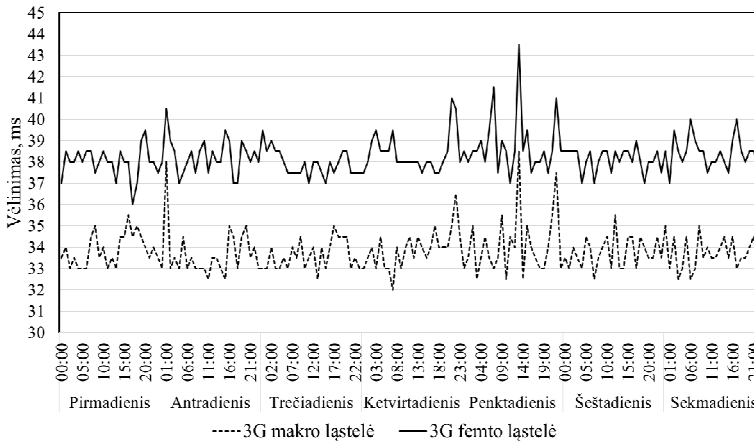
**3.23 pav.** Femto zonos ir 3G makro ląstelės balso kokybės įverčio pasiskirstymas  
**Fig. 3.23.** Distribution of voice quality for 3G femto and macro cells

Gauti balso kokybės rezultatai rodo, kad daugiau priimtinos ir žemesnės balso kokybės įverčių gaunama, kai balso skambutis vyksta makro ląstelėje. Vartotojų, kurie balso skambutį atlieka femto zonoje gerų balso kokybės įverčių pasiskirstymas yra 5 % didesnis lyginant su makro ląstele. Atsižvelgiant, kad balso srauto pasiskirstymas tarp femto ir makro ląstelių yra panašus, galima spręsti, jog viso pokalbio metu femto zonų vartotojai gauna aukštesnės kokybės balsą. Nors tyrimo metu balso skambučiai buvo perduoti naudojant 12,2 kb/s *WB-AMB* balso kodavimą, verčių su puikia balso kokybe abiejų tipų ląstelėse neužfiksuota.

Užtikrinti balso skambučių kokybę mažose ląstelėse netrukdo ir tai, kad siunčiamų paketų delsa femto ląstelėse yra didesnė nei makro tinklo ląstelės. Garantuoti femto ląstelės transmisijos tinklo *QoS* yra sunku todėl, kad femto zonos jungiamos per trečiųjų šalių interneto tinklą. Tyrimų rezultatai rodo, kad linijos vėlinimas tarp makro tinklo ląstelės ir femto ląstelės skiriasi apie 5 ms, o tai reikšmingos įtakos vartotojų paslaugų kokybei nesudaro. Ilgalaikių matavimų linijos delsos rezultatai pateikti 3.24 paveiksle.

Esamas papildomas linijos vėlinimas turi minimalią įtaką ne realaus laiko paslaugoms. Vartotojų duomenų sesijos pradžia užtrunka šiek tiek ilgiau. Realaus laiko paslaugos yra jautresnės linijos vėlinimams. Balso skambučio inicijavimas iš budėjimo režimo, femto ląstelėje trunka ilgiau nei makro ląstelėje. Analizė rodo, kad vidutinė skambučio užmezgimo trukmė, nuo *RRC* sujungimo užklauskos momento iki kvietimo signalo iš korinio ryšio tinklo pranešimo gavimo, femto

zonoje yra ilgesnė apie 0,5 s. Vidutinė skambučio inicijavimo trukmė makro ląstelėje yra 3,08 s, o femto ląstelėje 3,61 s.



**3.24 pav.** Vidutinis linijos vėlinimo laiko pasiskirstymas tarp femto ir makro ląstelių  
**Fig. 3.24.** Distribution of average line delay for femto and macro cells

Tyrimė gauti rezultatai atskleidžia mažų ląstelių sukuriamus privalumus. Plėtojant HetNet infrastruktūrą ir tankinant mažų ląstelių sluoksnį vartotojų gaunamų paslaugų kokybė pagerinama. Tarp sluoksninis vartotojų srauto balansavimas leidžia gerokai sumažinti makro tinklo ląstelių apkrovą, o operatoriams sutaupyti. Deja, Lietuvos ryšio vartotojų paslaugų naudojimo specifika ir esamas tinklų pajėgumas bei talpa riboja mažų ląstelių plėtrą. Šiai dienai dėl nedidelio vartotojų skaičiaus ir gerokai mažesnio duomenų srauto naudojimo esama makro tinklo infrastruktūra visiškai patenkina vartotojų poreikius. Kita situacija yra šiaurės ir vakarų Europos valstybėse, Amerikoje. Ten vartotojų skaičius ir persiunčiamų duomenų srautas yra žymiai didesnis, todėl femto zonų svarba įgauna vis didesnę reikšmingumą. Femto zonos pasitelkiamos verslo ir prekybos centruose, stadionuose. Tai daryti skatina ir sudėtingėjanti miestų infrastruktūra, dėl kurios radijo signalo sklidimas slopsta. Remiantis duomenų srautų prognozėmis, mažų ląstelių tankis turėtų augti neišvengiamai. To paties tikimasi ir Lietuvos telekomunikacijų versle. Nauja 5G ryšio karta didele dalimi bus paremta ant vartotojų informacijos perdavimo per mažų ląstelių tinklus. Svarbu ir tai, kad mažų ląstelių era iš dalies turėtų keisti požiūrį į vartotojų srautų balansavimą taip pat. Bus ieškoma būdų kaip *HetNet* tinklų vartotojų srautą balansuoti tarp atskirų mažų ląstelių. Šis uždavinys privers susidurti su naujais iššūkiais koordinuojant vartotojų srautą tinkle. Tuo labiau, kad vartotojų srautas bus paskirstomas tarp femto zonų su skirtingos



pieigos galimybėmis, veikiančiomis licencijuotame ir nelicencijuotame dažnių ruožuose.

### 3.3. Trečiojo skyriaus išvados

1. Esant vienodoms radijo ryšio sąlygoms, pagal *QoS* prioritetus klasifikuojamus korinio ryšio tinklo vartotojus, turinčius aukštesnį prioritetą, pasiekia geresnės kokybės paslaugas. Auksinio profilio vartotojo duomenų perdavimo sparta žemynkrypčiame dalinamame kanale yra didesnė iki 16 % nei sidabrinio vartotojo ir iki 45 % – nei varinio. Duomenis siunčiant aukštynkrypčiu dedikuotuoju kanalu auksinis vartotojas gauna iki 17 % didesnę duomenų perdavimo spartą nei sidabrinis ir iki 26 % – nei varinis.
2. Nuo –80 dBm ribos aukštesnis vartotojo profilio prioritetas negarantuoja išskirtinių paslaugų. Kanalo išteklių srautui perduoti skiriami pagal išmatuotą kanalo kokybę.
3. *QoS* prioritetais grįstas vartotojų duomenų srauto balansavimas yra efektyvus ir prognozuojamas tik geromis ryšio kanalo sąlygomis.
4. Siūlomas savitas femto zonos integracijos modelis palengvina mažų ląstelių integracijos į korinį tinklą procesą. Kombinuojant makro tinklo ląsteles su femto ląstelėmis pasiekiami optimali vartotojų sklaida tinkle.
5. Femto zonos integracijos modelis palengvina galimų femto zonų verslo modelių ir konfigūracijų paiešką bei sudarymą, remiantis *ICT* verslo modeliavimo matricos parametrais. Pagal vertės parametrų grupės, vartotojų įsitraukimo ir pajamų modelio parametrus, gautos keturios femto zonų vystymo konfigūracijos, tinkančios verslo modeliams sudarinėti.
6. Makro tinklo ląstelių apkrova *HetNet* struktūroje taikant femto ląsteles sumažinama vidutiniškai dvigubai, o vartotojų paslaugų kokybė ir ryšio sąlygos pagerinamos. Femto zonos vartotojų kanalo kokybė yra iki 15 %, duomenų perdavimo sparta iki 10 %, o balso kokybė pagal *MOS* skalę iki 5 % geresnė, lyginant su makro tinklo vartotojais.



---

## Bendrosios išvados

Darbe parodyta, kad heterogeniniame korinio ryšio tinkle taikant vartotojų sukurtamų balso ir duomenų srautų balansavimo metodus pasiekiamas efektyvesnis ryšio sistemos išteklių panaudojimas ir užtikrinama aukštesnė paslaugų kokybė vartotojams. Toliau pateikiami gauti elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo kryptiškai svarbūs rezultatai:

1. Įvertinta skirtingose heterogeninio ryšio tinklo vietose susikoncentravusių balso skambučių vartotojų grupių elgsenos ypatumai naudojant balso pernašos paslaugas.
  - 1.1. Nustatyta, kad trumpi (2–3 s.) balso skambučiai sudaro iki 15 % visų balso skambučių. Šie skambučiai turi įtakos vartotojų balso srauto modeliui, todėl turi būti įtraukti į skambučių trukmių skirstinius. Trumpiausiais skambučiais pasižymi verslo ir pramogų centrų vartotojų grupės.
  - 1.2. Miesto vartotojų grupių iki 75 % balso skambučių pradedami 3G ryšio tinkle, o tai įtakoja netolygią viso tinklo ląstelių apkrovą.
2. Įgyvendinti aklo perjungimo (tiesioginis) ir adaptyvaus (*LBHO*), matavimais grįsto, balso skambučių srauto balansavimo metodai.

- 2.1. Tarptehnologinio balso srauto balansavimo metodai pagerino korinio tinklo išteklių panaudojimą ir vartotojų patirtį, padidinant 3G ląstelės talpą iki 9 % bei užtikrinant iki 6 % sėkmingesnę prieigą.
- 2.2. Agresyviausia balso srauto balansavimo taktika leidžia paskirstyti iki 20 % balso srauto, tačiau ji neužtikrina paslaugų kokybės ir optimalaus tinklo išteklių panaudojimo. Geriau yra remtis nuosaikiu balso srauto balansavimu.
3. Gauti nauji, pagal *QoS* prioritetus klasifikuotų vartotojų gaunamų duomenų pernašos paslaugų duomenys, skirtingomis ryšio sąlygomis.
  - 3.1. Vienodomis ryšio sąlygomis, pagal *QoS* prioritetus klasifikuojamus korinio ryšio tinklo vartotojus, turinčius aukštesnį prioritetą, pasiekia geresnės kokybės paslaugas. Auksinio profilio vartotojo duomenų perdavimo sparta žemynkrypčiame kanale yra iki 16 % didesnė nei sidabrinio ir iki 45 % – nei varinio. Duomenis siunčiant aukštynkrypčiu kanalu auksinį vartotoją pasiekia iki 17 % didesnė sparta nei sidabrinį ir iki 26 % – nei varinį.
  - 3.2. Nuo  $-80$  dBm aukštesnis vartotojo profilis negarantuoja išskirtinių paslaugų. Kanalo ištekliai skiriami pagal išmatuotą *CQI*, todėl *QoS* prioritetais grįstas srauto balansavimas yra prognozuojamas tik geromis ryšio sąlygomis.
4. Sudarytas savitas mažų savaiminės konfigūracijos femto ląstelių integracijos modelis ir pirmą kartą ištirta tarpsluoksninio srauto balansavimo įtaka Lietuvos korinio ryšio tinkle, panaudojant mažas ląsteles.
  - 4.1. Femto zonos integracijos modelis palengvina mažų ląstelių integraciją į korines ryšio sistemas ir femto zonų verslo modelių bei konfigūracijų sudarymą, remiantis *ICT* verslo modeliavimo matrica. Sudarytos keturios femto zonų konfigūracijos, tinkančios verslo modeliams sudaryti, paremtos vertės parametrais.
  - 4.2. Kombinuojant makro ir femto ląsteles užtikrinama vartotojų sklaida tinkle, o makro ląstelės apkrova sumažinama vidutiniškai dvigubai. Femto zonos vartotojų kanalo kokybė yra iki 15 %, duomenų perdavimo sparta iki 10 %, o balso kokybė pagal MOS skalę iki 5 % geresnė, lyginant su makro ląstelės vartotojais.

---

## Rekomendacijos

1. Planuojant ir optimizuojant korinio ryšio tinklo talpą, kai balso skambučių vartotojai naudojami daugiastandarte galine įranga, rekomenduojama naudoti vartotojų balso skambučių metaduomenis, kuomet įvertinamas balso skambučių trukmių pasiskirstymas pagal vietą bei numatoma galima apkrova tinklo elementams.
2. Rekomenduojama iš keleto ryšio standartų sudarytuose korinio ryšio tinkluose įdiegti tarpsteminės srauto balansavimo priemonės, grįstas aklo arba matavimais paremto perjungimo principais. Jos užtikrina visavertį korinio ryšio sistemos talpos išnaudojimą. Siūloma remtis nuosaikiais srauto paskirstymo mechanizmais.
3. Siekiant korinėje ryšio sistemoje pagerinti prioritetinių vartotojų gautamų paslaugų kokybę didelės tinklo ląstelių apkrovos momentais, rekomenduojama taikyti QoS pagrindu veikiančią vartotojų klasifikavimą tinkle.
4. Vystant pažangias, heterogenines korinio ryšio sistemas, rekomenduojama plėsti iš mažų tinklo ląstelių sudarytus tinklo sluoksnius, vystyti tyrimus siejamus su tokių ląstelių efektyvumo didinimu ir taikymu.



---

## Literatūra ir šaltiniai

3GPP TS 22.220 Service requirements for Home Node B (HNB) and Home eNode B (HeNB) (Release 10). 2011. *Technical Specification*. European Telecommunications Standards Institute: 7–17.

3GPP TS 23.107 Universal Mobile Telecommunications System (UMTS). 2002. Quality of Service (QoS) concept and architecture. *Technical Specification*. European Telecommunications Standards Institute: 9–29.

3GPP TS 25.214 Physical Layer Procedures. 2012. *Technical Specification*. European Telecommunications Standards Institute: 51–52.

3GPP TS 25.331 Radio Resource Control (RRC) protocol specification. 2004. *Technical Specification*. European Telecommunications Standards Institute: 39–166.

3GPP TS 25.367 Mobility procedures for 3G Home Node B (HNB). 2011. *Technical Specification*. European Telecommunications Standards Institute: 7–14.

3GPP TS 32.521 Self-Organizing Networks (SON). 2011. Concepts and requirements (Release 11). *Technical Specification*. European Telecommunications Standards Institute: 9–14.

Acakpovi, A., Sewordor, H., Koumadi, K. M. 2013. Performance Analysis Of Femtocell in an Indoor Cellular Network. *IRACST-International Journal of Computer Networks and Wireless Communications (IJCNWC)*, 3(3).

Ackermann, H., Fischer, S., Hofer, M., Schöngens, M. 2011. Distributed algorithms for QoS load balancing. *Distributed Computing*, 23(5-6), Volume 23, Issue 5, 321–330. DOI: 10.1007/s00446-010-0125-1

- Aijaz, A., Aghvami, H., Amani, M. 2013. A survey on mobile data offloading: technical and business perspectives. *IEEE Wireless Communications*: Volume: 20, Issue: 2, 104–112. DOI: 10.1109/MWC.2013.6507401
- Aldabbagh, G., Bakhsh, S. T., Akkari, N., Tahir, S., Khan, S., Cioffi, J. 2015. Distributed dynamic load balancing in a heterogeneous network using LTE and TV white spaces. *Wireless Networks*, 21(7), 2413–2424.
- Alsenmyr, G., Bergström, J., Hagberg, M., Milén, A., Müller, W., Palm, H., Van der Velde, H., Wallentin, P., Wallgren, F. 2003. Handover between WCDMA and GSM. *Ericsson Review No. 1*. [žiūrėta 2012.01.22]. Prieiga per internetą: [https://www.ericsson.com/vc/res/thecompany/docs/publications/ericsson\\_review/2003/2003011.pdf](https://www.ericsson.com/vc/res/thecompany/docs/publications/ericsson_review/2003/2003011.pdf)
- Andrews, J. G., Claussen, H., Dohler, M., Rangan, S., Reed, M. C. 2012. Femtocells: Past, present, and future. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 30(3), 497–508.
- Ballon, P. 2007. Business Modelling Revisited: The Configuration of Control and Value. *The Journal of Policy, Regulation and Strategy for Telecommunications*, 9(5): 6–19.
- Barracrough, C. 2011. The value of 'Smart' Pipes to mobile network operators. *Strategy research*. [žiūrėta 2015.01.19]. Prieiga per internetą: <http://docshare01.docshare.tips/files/9777/97777592.pdf>
- Batkauskas, V., Kajackas, A. 2015. Quality of heterogeneous mobile data services: capabilities and end-user achievements. *Elektronika ir Elektrotechnika*, 101(5), 43–46.
- Becker, R., Cáceres, R., Hanson, K., Isaacman, S., Loh, J. M., Martonosi, M., Volinsky, C. 2013. Human mobility characterization from cellular network data. *Communications of the ACM*, 56(1), 74–82.
- Calin, D., Claussen, H., Uzunalioglu, H. 2010. On femto deployment architectures and macrocell offload benefits in joint macro-femto deployment. *IEEE Communications Magazine*, 48(1), 26–32.
- Call Setup. [žiūrėta 2015.09.28]. Prieiga per internetą: <http://www.umtsworld.com/technology/moc.htm>
- Center for strategic and international studies. 2012. A Study on Urban Mobility and Dynamic Population Estimation by Using Aggregate Mobile Phone Sources. *Discussion Paper No. 115*. [žiūrėta 2013.10.05]. Prieiga per internetą: <http://www.csis.u-tokyo.ac.jp/dp/115.pdf>.
- Chandrasekhar, V., Andrews, J. G., Gatherer, A. 2008. Femtocell networks: a survey. *IEEE Communications magazine*, 46(9), 59–67.
- Chardy, M., Yahia, M. B., Bao, Y. 2016. 3G/4G load-balancing optimization for mobile network planning. In *Telecommunications Network Strategy and Planning 17th Symposium* pp. 7–12.
- Chen, J., Rauber, P., Singh, D., Sundarraman, C., Tinnakornsriruphap, P., Yavuz, M. 2010. Femtocells—Architecture & Network Aspects. Qualcomm, Jan.
- Chen, S., Zhao, J. 2014. The requirements, challenges, and technologies for 5G of terrestrial mobile telecommunication. *IEEE Communications Magazine*, 52(5), 36–43
- Cheng, S. M., Lien, S. Y., Chu, F. S., Chen, K. C. 2011. On exploiting cognitive radio to mitigate interference in heterogeneous networks. *IEEE Wireless Communications*, 18(3), 40–47.
- Choi, J. M., Kim, D. J., Kim, H. S., Won, J. J., & Cha, H. J. 2013. U.S. *Patent Application No. 14/048,810*.



- Claussen, H., Calin, D. 2009. Macrocell offloading benefits in joint macro-and femtocell deployments. *In IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*: 350–354.
- Cooper, B. R., Heyman, P. D. 1998. Teletraffic Theory and Engineering. *Encyclopedia of Telecommunication*: Vol. 16, New York: 453–483.
- Costa-Pérez, X., Swetina, J., Guo, T., Mahindra, R., Rangarajan, S. 2013. Radio access network virtualization for future mobile carrier networks. *IEEE Communications Magazine*, 51(7), 27–35.
- Damnjanovic, A., Montojo, J., Wei, Y., Ji, T., Luo, T., Vajapeyam, M., Malladi, D. 2011. A survey on 3GPP heterogeneous networks. *IEEE Wireless Communications*, 18(3), 10–21.
- Das, S., Viswanathan, H., Rittenhouse, G. 2003. Dynamic load balancing through coordinated scheduling in packet data systems. *INFOCOM: Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications*. DOI: 10.1109/INFCOM.2003.1208728
- De La Roche, G., Valcarce, A., López-Pérez, D., Zhang, J. 2010. Access control mechanisms for femtocells. *IEEE Communications Magazine*, 48(1), 33–39.
- De Melo, P. O. V., Akoglu, L., Faloutsos, C., & Loureiro, A. A. 2010. Surprising patterns for the call duration distribution of mobile phone users. *In Joint European Conference on Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases*: 354–369. Springer Berlin Heidelberg.
- Dekeris, B., Narbutaite, L. 2006. Quality of Services (QoS) Routing of Differentiated Services. *Communication systems, networks and digital signal processing: proceedings of the 5th international symposium*, 19–21 July 2006, Patras University, Greece. ISBN 9608928206.
- Diaz, A., Merino, P., Rivas, F. J. 2010. QoS analysis of video streaming service in live cellular networks. *Journal of Computer Communications, Volume 33, Issue 3*, 322–335.
- Dikbiyik, F., Tornatore, M., Mukherjee, B. 2015. Exploiting excess capacity, part II: Differentiated services under traffic growth. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 23(5), 1599–1609.
- Dong, Y., Tang, J., Lou, T., Wu, B., & Chawla, N. V. 2013. How long will she call me? distribution, social theory and duration prediction. *In Joint European Conference on Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases*. Springer Berlin Heidelberg: 16–31.
- Dong, Y., Tang, J., Lou, T., Wu, B., Chawla, N. V. 2013. How long will she call me? distribution, social theory and duration prediction. *In Joint European Conference on Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases*: 16–31. Springer Berlin Heidelberg.
- Enderle, N., Lagrange, X. 2003. User satisfaction models and scheduling algorithms for packet-switched services in UMTS. *In Vehicular Technology Conference, the 57th IEEE Semiannual*: Vol. 3, 1704–1709.
- Ericsson Mobility Report. 2016. [žiūrėta 2016.09.07]. Prieiga per internetą: <https://www.ericsson.com/res/docs/2016/ericsson-mobility-report-2016.pdf>
- Furtenback, R., Hunte, T., Turina, D., Wahlberg, U. 2004. GSM and WCDMA—Common network approach. *Ericsson Review No. 2*. [žiūrėta 2012.02.14]. Prieiga per internetą: [https://www.ericsson.com/ericsson/corpinfo/publications/review/2004\\_02/files/2004124.pdf](https://www.ericsson.com/ericsson/corpinfo/publications/review/2004_02/files/2004124.pdf)
- Gao, S., Liu, Y., Wang, Y., & Ma, X. 2013. Discovering spatial interaction communities from mobile phone data. *Transactions in GIS*, 17(3), 463–481.

- Garcia-Lozano, M., Ruiz, S., Olmos, J. J. 2004. UMTS optimum cell load balancing for inhomogeneous traffic patterns. *Vehicular Technology Conference*. DOI: 10.1109/VETECF.2004.1400153
- Gelabert, X., Pérez-Romero, J., Sallent, O., Agustí, R. 2005. On the suitability of load balancing principles in heterogeneous wireless access networks. In *Wireless Personal Multimedia Communications Symposium*, Aalborg, Denmark.
- Giupponi, L., Agusti, R., Prez-Romero, J., Sallent, O. 2006. Towards balancing user satisfaction and operator revenue in beyond 3G cognitive networks. *Proc. 15th Mobile and Wireless Summit*: 4–8.
- Golaup, A., Holland, O., Aghvami, A. H. 2015. A packet scheduling algorithm supporting multimedia traffic over the HSDPA link based on early delay notification. In *MSAN*: 78–82.
- GSMA. 2016. The Mobile Economy. *Report*. [žiūrėta 2016.08.10]. Prieiga per internetą: <https://www.gsmaintelligence.com/research/?file=97928efe09cdba2864cdcf1ad1a2f58c&download>
- Haldar, L.K., Jun, J., Oliveira, T., Agrawal, P.D. 2010. Exploring load balancing in heterogeneous networks by rate distribution. *International Journal of Autonomous and Adaptive Communications Systems (IJAACS)*, Vol. 3, No. 3. DOI: <http://dx.doi.org/10.1504/IJAACS.2010.033384>
- Hasan, S. F., Siddique, N. H., Chakraborty, S. 2009. Femtocell versus WiFi-A survey and comparison of architecture and performance. In *Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology, 1st International Conference*: 916–920.
- Hoadley, J., Maveddat, P. 2012. Enabling small cell deployment with HetNet. *Wireless Communications IEEE*, 19(2), 4–5. DOI: 10.1109/MWC.2012.6189405
- Huang, L., Zhu, G., Du, X. 2013. Cognitive femtocell networks: an opportunistic spectrum access for future indoor wireless coverage. *IEEE wireless communications*, 20(2), 44–51.
- Hwang, I., Song, B., Soliman, S. S. 2013. A holistic view on hyper-dense heterogeneous and small cell networks. *IEEE Communications Magazine*, 51(6), 20–27.
- Yang, J., Qiao, Y., Zhang, X., He, H., Liu, F., Cheng, G. 2015. Characterizing user behavior in mobile internet. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, 3(1), 95–106.
- Yavuz, M., Meshkati, F., Nanda, S., Pokhariyal, A., Johnson, N., Raghothaman, B., Richardson, A. 2009. Interference management and performance analysis of UMTS femtocells. *IEEE Communications Magazine*, 47(9), 102–109.
- Ye, Q., Rong, B., Chen, Y., Al-Shalash, M., Caramanis, C., Andrews, G. J. 2013. User Association for Load Balancing in Heterogeneous Cellular Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*: Volume: 12, Issue: 6, 2706–2716. DOI: 10.1109/TWC.2013.040413.120676
- Ye, Q., Al-Shalashy, M., Caramanis, C., Andrews, J. G. 2013. On/off macrocells and load balancing in heterogeneous cellular networks. In *GLOBECOM*, IEEE pp. 3814–3819.
- Yuan, D., Teng, Y., Man, Y., Chen, M., Cheng, G., Wu, J. 2014. QoE-Oriented Resource Allocation for Femtocell Networks. In *International Conference on Human Centered Computing*: 182–192. Springer International Publishing.
- Jain, A., Tokekar, S. 2016. QoS Mapping Approach for UMTS-WLAN Integrated Network. In *Computational Intelligence & Communication Technology, 2nd International Conference*: 237–241

Jiang, D., Liu, G. 2017. An Overview of 5G Requirements. In *5G Mobile Communications*: 3–26. Springer International Publishing.

Jin, L., Chen, Y., Wang, T., Hui, P., Vasilakos, A. V. 2013. Understanding user behavior in online social networks: A survey. *IEEE Communications Magazine*, 51(9), 144–150.

Jin, S., Xuanli, W., Xuejun, S. 2011. Load balancing algorithm with multi-service in heterogeneous wireless networks. In *Communications and Networking in China, 6th International ICST Conference*: 703–707.

Juang, R. T., Ting, P., Lin, H. P., Lin, D. B. 2010. Interference management of femtocell in macrocellular networks. In *Proceedings of the 9th conference on Wireless telecommunications symposium*: 132–135.

Judriojo ryšio tinklų tikėtinos aprėpties zonos. 2016. *Ryšių reguliavimo tarnybos ataskaita*. [žiūrėta 2016.01.12]. Prieiga per internetą: <http://epaslaugos.rrt.lt/apreptis/>

Kajackas, A., Anskaitis, A., Gursnys, D. 2011. Method for Conversational Voice Quality Evaluation in Cellular Networks. *Elektronika ir Elektrotechnika*, 109(3), 105–108.

Kang, C., Liu, Y., Ma, X., Wu, L. 2012. Towards estimating urban population distributions from mobile call data. *Journal of Urban Technology*, 19(4), 3–21. <http://dx.doi.org/10.1080/10630732.2012.715479>

Keshavachar, B. 2003. U.S. Patent No. 6,631,274. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Kim, D. 2015. The Unbearable Lightness of Mobile Voice. [žiūrėta 2015.09.20]. Prieiga per internetą: <https://technconomyblog.com/tag/gsm/>

Kim, H. J., Lee, D. H., Lee, J. M., Lee, K. H., Lyu, W., Choi, S. G. 2008. The QoE evaluation method through the QoS-QoE correlation model. In *Networked Computing and Advanced Information Management, 4th International Conference*: Vol. 2, 719–725.

KIVI, A. 2007. Measuring Mobile User Behavior and Service Usage: Methods, Measurement Points, and Future Outlook. *Global Mobility Roundtable*. Helsinki University of Technology, Finland. [žiūrėta 2013.10.05]. Prieiga per internetą: <http://classic.marshall.usc.edu/assets/006/5570.pdf>.

Laiho, J., Wacker, A. 2001. Radio network planning process and methods for WCDMA. In *Annales des télécommunications*: Vol. 56, No. 5–6, 317–331. Springer-Verlag.

Laraspata, R., Striccoli, D., Camarda, P. 2010. A scheduling algorithm for interactive video streaming in umts networks. In *Computers and Communications, IEEE Symposium*: 997–1002.

Laxmi, T. D., Akila, R. B., Ravichandran, K. S., & Santhi, B. 2012. Study of user behavior pattern in mobile environment. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 4(23), 5021–5026.

Leem, H., Kim, J., Jung, B. H., Sung, D. K. 2014. Spectral-, energy-, & cost-efficient deployment of small cells in a HetNet topology. In *IEEE International Conference on Communications (ICC)*: 4042–4047.

Li, M., Zhao, Z., Zhou, Y., Chen, X., Zhang, H. 2016. On the Dependence Between Base Stations Deployment and Traffic Spatial Distribution in Cellular Networks. *Telecommunications (ICT), 23rd International Conference*. DOI: 10.1109/ICT.2016.7500457

- Lin, H. H., Wang, Y. S. 2006. An examination of the determinants of customer loyalty in mobile commerce contexts. *Information & management*, 43(3), 271–282.
- Lister, D., Dehghan, S., Owen, R., Jones, P. 2000. UMTS capacity and planning issues. *In 3G Mobile Communication Technologies 1st International Conference*: 218–223.
- Liu, F., Bala, E., Erkip, E., Beluri, M. C., Yang, R. 2015. Small-cell traffic balancing over licensed and unlicensed bands. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64(12), 5850–5865.
- Loibl, W., Peters-Andersen, J. 2012. Mobile Phone Data as Source to Discover Spatial Activity and Motion Patterns. *GI Forum, Geovizualisation, Society and Learning*. Berlin.
- López-Pérez, D., Ladanyi, A., Jüttner, A., Zhang, J. 2009. OFDMA femtocells: A self-organizing approach for frequency assignment. *In 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*: 2202–2207.
- Ma, B., Chen, H. 2015. Does Bigger Screen Lead to More Cellular Data Usage?. *Available at SSRN 2510263*.
- Mahajan, R., Som, S. 2016. Customer behavior patterns analysis in Indian mobile telecommunications industry. *In Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)*, 3rd International Conference on pp. 1165–1169.
- Meshkati, F., Jiang, Y., Grokop, L., Nagaraja, S., Yavuz, M., Nanda, S. 2009. Mobility and capacity offload for 3G UMTS femtocells. *In Global Telecommunications Conference, GLOBECOM*: 1–7.
- Mobile Data Usage. 2016. *Tefficient*. [žiūrėta 2016.10.12]. Prieiga per internetą: <http://tefficient.com/category/analysis/mobile-data-usage-analysis/>
- Mobile Marketing Statistics compilation. 2016. [žiūrėta 2016.09.05]. Prieiga per internetą: <http://www.smartinsights.com/mobile-marketing/mobile-marketing-analytics/>
- Morita, M., Matsunaga, Y., Hamabe, K. 2010. Adaptive power level setting of femtocell base stations for mitigating interference with macrocells. *In Vehicular Technology Conference Fall, IEEE 72nd*: 1–5.
- Munoz, P., Barco, R., Laselva, D., Mogensen, P. 2013. Mobility-based strategies for traffic steering in heterogeneous networks. *IEEE Communications Magazine*, 51(5), 54–62.
- Naboulsi, D., Fiore, M., Ribot, S., & Stanica, R. 2015. Large-scale mobile traffic analysis: a survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(1), 124–161.
- Nekovee, M. 2010. Cognitive radio access to TV white spaces: Spectrum opportunities, commercial applications and remaining technology challenges. *In New Frontiers in Dynamic Spectrum, IEEE Symposium*: 1–10.
- Oyman, O., Singh, S. 2012. Quality of experience for HTTP adaptive streaming services. *IEEE Communications Magazine*, 50(4), 20–27.
- Ouyang, Y., Fallah, M. H. 2010. A performance analysis for UMTS packet switched network based on multivariate KPIs. *In Wireless Telecommunications Symposium*: 1–10.
- Paolini, M., Fili, S. 2012. The economics of small cells and Wi-Fi offload. *Report, SenzaFili Consulting, Sammamish, WA, USA*: 5–13. [žiūrėta 2014.07.20]. Prieiga per internetą: [http://www.senzafiliconsulting.com/Portals/0/docs/Reports/SenzaFili\\_SmallCellWiFiTCO.pdf](http://www.senzafiliconsulting.com/Portals/0/docs/Reports/SenzaFili_SmallCellWiFiTCO.pdf)

Patel, C., Gropop, L., Chande, V., Khaitan, V., Yavuz, M., Nanda, S. 2010. Femtocell and Beacon Transmit Power Self-Calibration. [žiūrėta 2013.04.01]. Prieiga per internetą: <http://www.qualcomm.com/media/documents/files/qualcomm-research-femtocell-and-beacontransmit-power-self-calibration.pdf>.

Paul, U., Subramanian, A. P., Buddhikot, M. M., Das, S. R. 2011. Understanding traffic dynamics in cellular data networks. In *INFOCOM, Proceedings IEEE*: 882–890.

Paulrajan, R., Rajkumar, H. 2011. Service quality and customers preference of cellular mobile service providers. *Journal of technology management & innovation*, 6(1), 38–45.

Pischella, M. 2007. Blind handover technique. U.S. Patent No. 7,224,972. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Prasad, M. V. S. N., Dalela, P. K., Chaitanya, M. 2008. Experimental investigation of land mobile prediction methods and modeling of radio planning tool parameters along Indian rail road rural zones. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2008

Qutqut, M. H., Al-Turjman, F. M., Hassanein, H. S. 2013. MFW: Mobile femtocells utilizing WiFi: A data offloading framework for cellular networks using mobile femtocells. In *IEEE International Conference on Communications (ICC)*: 6427–6431.

Radicati. 2016. Mobile Growth Forecast, 2016–2020. *Research*. [žiūrėta 2016.10.01]. Prieiga per internetą: <http://www.radicati.com/wp/wp-content/uploads/2016/01/Mobile-Growth-Forecast-2016–2020–Executive-Summary.pdf>

Ranjan, G., Zang, H., Zhang, Z. L., Bolot, J. 2012. Are call detail records biased for sampling human mobility?. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 16(3), 33–44.

Romero, J. P., Sallent, O., Agusti, R., Diaz-Guerra, M. A. 2005. Radio resource management strategies in UMTS. United Kingdom, West Sussex. John Wiley & Sons. 178–271.

Salami, G., Tafazolli, R. 2010. Interoperator dynamic spectrum sharing (analysis, costs and implications). *International Journal of Computer Networks (IJCN)*, 2, 47–61.

Sankaran, C. B. 2012. Data offload techniques in 3GPP Rel10 networks: A tutorial. *IEEE Communications Magazine*, 50(6), 46–53.

Sarraf, C. M., Ousta, F., Yusoff, M. Z., & Kamel, N. 2013. Mapping quality of service classes between UMTS, WiMAX and DiffServ/MPLS networks. In *Computer and Information Technology (WCCIT), 2013 World Congress on (pp. 1–5)*.

Sauter, M. 2011. From GSM to LTE. *Electronic book of mobile networks and mobile broadband*, United Kingdom, West Sussex, John Wiley and Sons, Ltd.

Shinagawa, N., Miura, A., Kaneda, S., Akinaga, Y. 2009. Traffic Control by Influencing User Behavior. *NTT DoCoMo Technical Journal* Vol. 7 No.4. [žiūrėta 2014.03.15]. Prieiga per internetą: [https://www.nttdocomo.co.jp/english/binary/pdf/corporate/technology/rd/technical\\_journal/bn/vol7\\_4/vol7\\_4\\_034en.pdf](https://www.nttdocomo.co.jp/english/binary/pdf/corporate/technology/rd/technical_journal/bn/vol7_4/vol7_4_034en.pdf).

SimpleCore: an appeal for less complex core networks. 2016. 5G PPP–1<sup>st</sup> 5G Architecture Workshop. Docomo communication laboratories, Munich, Germany.

Singh, S., Dhillon, H. S., & Andrews, J. G. 2013. Offloading in heterogeneous networks: Modeling, analysis, and design insights. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 12(5), 2484–2497.

- Siomina, I., Yuan, D. 2004. Optimization of pilot power for load balancing in WCDMA networks. *Global Telecommunications Conference: GLOBECOM*. DOI: 10.1109/GLOCOM.2004.1379093
- Siomina, I., Yuan, D. 2012. Load Balancing in Heterogeneous LTE: Range Optimization via Cell Offset and Load-Coupling Characterization. *IEEE ICC – Communication, Reliability and Modeling Symposium*. DOI: 10.1109/ICC.2012.6364075
- Skorin-Kapov, L., Huljenic, D., Mikic, D., Vilendecic, D. 2004. Analysis of end-to-end QoS for networked virtual reality services in UMTS. *IEEE Communications Magazine*, 42(4), 49–55.
- Small Cell Forum. 2012. Small Cell Vendors Race to Fulfill Operator Demand for LTE. *Press Release*. [žiūrėta 2014.06.01]. Prieiga per internetą: <http://www.smallcellforum.org/press-releases/small-cell-vendors-race-fulfill-operator-demand-lte/>
- Small cells: More small cells, hyper-dense small cell deployments. 2014. *Qualcomm*. [žiūrėta 2014.11.05]. Prieiga per internetą: <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/1000x-more-small-cells-.pdf>
- Soldani, D., Li, M., Cuny, R. (Eds.). 2007. QoS and QoE management in UMTS cellular systems. *Book*, West Sussex, United Kingdom, John Wiley & Sons.
- Song, W., Zhuang, W., Cheng, Y. 2007. Load balancing for cellular/WLAN integrated networks. *IEEE Network* : Volume: 21, Issue: 1, 27–33. DOI: 10.1109/MNET.2007.314535
- Subramaniam, K., Nilsson, A. A. 2005. An analytical model for adaptive call admission control scheme in a heterogeneous UMTS system. *In IEEE International Conference on Communications: Vol. 5*, 3334–3338.
- Sudhindra, K. R., Sridhar, V. 2014) Adaptive Traffic Load Sharing for GSM Network. *In Emerging Research in Electronics, Computer Science and Technology: 487–494*). Springer India.
- Tolli, A., Barbancho, I., Gomez, J., Hakalin, P. 2003. Intra-system load balancing between adjacent GSM cells. *In Vehicular Technology Conference*. The 57th IEEE Semiannual Vol. 1: 393–397.
- Tolli, A., Hakalin, P. 2002. Adaptive load balancing between multiple cell layers. *In Vehicular technology conference. Proceedings*. IEEE 56<sup>th</sup>, Vol. 3: 1691–1695.
- Tsompanidis, I., Zahran, A. H., Sreenan, C. J. 2014. Mobile network traffic: A user behaviour model. *In Wireless and Mobile Networking Conference, 7th IFIP*: 1–8.
- Upponor, S., Ziemlicki, C., Secci, S., Smoreda, Z. 2016. On mobile traffic distribution over cellular backhauling network nodes. *13th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC): 726-731*. Electronic ISSN: 2331-9860, DOI: 10.1109/CCNC 2016.7444869
- Viavi. 2012. Optimizing Small Cells and the Heterogeneous Network (HetNet). *White Paper*. [žiūrėta 2014.05.10]. Prieiga per internetą: <http://www.viavisolutions.com/sites/default/files/technical-library-items/smallcellhetnet-wp-hsd-tm-ae.pdf>
- Villy B. I. 2001. TELETRAFFIC ENGINEERING, Technical University of Denmark. *Handbook*. Denmark, Building 343, DK–2800 Lyngby.
- Vujic, D. S., Certic, J. D. 2014. UMTS RAN Capacity Analysis for Special Events. *Wireless personal communications*, 77(3), 1935–1958.
- Weitzen, J., Grosch, T. 2010. Comparing coverage quality for femtocell and macrocell broadband data services. *IEEE Communications Magazine*, 48(1), 40–44.
- Wen, Y. 2016. U.S. Patent No. 9,326,210. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Westphal, C., Melodia, T., Zhu, W., & Timmerer, C. 2016. Guest Editorial Video Distribution Over Future Internet. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 34(8), 2061–2062.

Xu, F., Lin, Y., Huang, J., Wu, D., Shi, H., & Li, Y. 2016. Big Data Driven Mobile Traffic Understanding and Forecasting: A Time Series Approach. *IEEE Transactions on Services Computing: Volume: 9, Issue: 5*. DOI: 10.1109/TSC.2016.2599878

Zhang, Y., Årvidsson, A. 2012. Understanding the characteristics of cellular data traffic. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 42(4), 461–466.

Zhang, J., De la Roche, G. 2010. Femtocells: technologies and deployment. *Online book*. New York: Wiley. DOI: 10.1002/9780470686812.fmatter

Zyoud, A. H., Habaebi, M. H., Chebil, J., Islam, M. R. 2012. Femtocell interference mitigation. *In Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC), IEEE*: 94–99.





---

# Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

## **Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose**

Žvinys, K.; Guršnys, D. 2014. Call Duration Characteristics based on Customers Location. *The Scientific Journal of Riga Technical University. Electrical, Control and Communication Engineering*, ISSN 2255-9140, Vol 5, Rygos technikos universitetas, Latvija, p. 67–73.

Žvinys, K. 2013. Femto celių panaudojimo problematika mobiliojo ryšio tinkluose. „Mokslas – Lietuvos ateitis“, *Elektronika ir elektrotechnika*, ISSN 2029-2341(print)/ISSN 2029-2252(online), Vilnius, Lietuva, p. 143–149.

Stirbys, M.; Žvinys, K. 2014. Hibridinių 2G/3G korinio ryšio tinklų srautų valdymo tyrimas. „Mokslas – Lietuvos ateitis“, *Elektronika ir elektrotechnika*, ISSN 2029-2341(print)/ISSN 2029-2252(online), Vilnius, Lietuva, p. 350–356.

## **Straipsniai kituose leidiniuose**

Žvinys, K.; Guršnys, D.; Stankevičius, E. 2015a. Coverage Impact for Data Traffic Profiling in WCDMA networks. *Progress In Electromagnetics Research Symposium*, ISSN 1559-9450, Praha, Čekijos Respublika, p. 1087–1091.

Žvinys, K.; Guršnys, D. 2015b. QoS efficiency for individual user in 3G networks. *Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream)*, ISBN: 978-1-4673-7445-3, IEEE Xplore database, Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva, p. 1–4.

Žvinys, K. 2016. Voice Calls Users' Behavior in Terms of Call Duration. *Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream)*, ISBN: 978-1-5090-1516-0, IEEE Xplore database, Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva, p. 1–4.

Sukarevičienė, G.; Žvinys, K. 2014. In search of viable Business Models for femtocell deployment. Baltische Sommerschule „*Technische Informatik / Informationstechnik*“ Ba-SoTI 10, Baltic Young PhD Conference medžiaga, Ryga, Latvija, p. 21–31.

---

# Summary in English

## Introduction

### Problem formulation

The importance of mobile communications is growing rapidly. Wide coverage area, mobility, multidimensional services determined that they are occupying the majority of areas in human lives. Customers' habits of using telecommunication services now and few decades ago differ a lot. Smart mobile devices are used for communication, browsing, streaming data, entertaining or in a daily works. Huge amount of customers and the demand of broadband services caused a high increase of network load. The capacity of mobile network became an issue, which detectably affects the quality of services. Uncoordinated users' movement in complex network topology reinforced significance of problem. Based on users' equipment, which is a multi-functional, users are free to move through all the layers. The latter behavior leads to a large number of users to be concentrated on a layers with a higher priority. Together, large amount of users and obvious increase of load have induced the overload of network. Unbalanced traffic negatively affects the user experience. Besides a part of network resources remain unused. For relieving a cell load during the rush hours mobility load balancing (MLB) techniques are used.

### Relevance of the thesis

Users traffic management in a network is important for several reasons. Firstly, usage of data via smartphone has changed a lot. During the last five years consumption of data

increased to 9 GB monthly and it is expected to grow. The trend shows, that capacity of network is becoming even more essential. Expansion of cells capacity is costly.

The second reason is related with a customers' distribution in a network. Analysis show, that more than 70% of voice and data traffic is generated inside the buildings. This indicates a high population distribution in small areas. Latter reason means, that some part of network is heavy loaded, while another is lightly loaded. Researches claim, that typical mobile network has 10 – 15% of cells, which carry a major part of network traffic, while remaining cells are almost free.

MLB techniques were introduced into mobile communications as a complementary method to manage the sudden storms of traffic. MLB allows distributing the users' traffic from heavy loaded network cells to surrounding cells. Traditional load balancing methods for users traffic management in the network are used for some time. However, an explosion of data usage determined, that traditional methods can not always deal with a high load. This is the reason why extended ways for load balancing are required.

### **The object of the research**

The object of the research is users' voice and data traffic balancing methods in commercial heterogeneous cellular networks. The practical methods of traffic balancing, based on inter RAT, inter-layer and quality of service, are investigated in present thesis.

### **The aim of the thesis**

The aim of the thesis is to balance the traffic load in heavy loaded network cells by adapting inter RAT, inter-layer, QoS based load control methods and provide the gains for network and users given by them.

### **The objectives of the thesis**

To achieve the aim stated in thesis the following main tasks are formulated:

1. To evaluate the main characteristics of voice traffic distribution in heterogeneous cellular network.
2. To propose and examine inter RAT load balancing methods, which are suitable for voice traffic management.
3. To evaluate the efficiency of data traffic load balancing, based on QoS profiles.
4. To develop the model representing integration process of small cells into cellular HetNets, which can be used for inter-layer traffic balancing and to investigate an efficiency of traffic load balancing, when small cells are used.

### **Research methodology**

The following theories are applied in this work: mathematical and applied statistics, tele-traffic engineering, big data analysis, the design of cellular radio systems. The results of investigated load balancing techniques are checked experimentally. Researches are performed in commercial cellular networks. The conclusions are justified with measurements. For measurements Tera software and hardware were used. Researches were done in network environment, where Huawei BTS 3900 and Ericsson RBS 6000 family base stations are operating.

### **Scientific novelty of the thesis**

Preparing the thesis the following results beneficial for electrical and electronics engineering science were obtained:

1. The behavior of voice calls user groups and voice traffic distribution were determined, according to the location where call was performed.
2. Inter RAT load balancing technique for voice calls management between 2G–3G networks was implemented, when most and least aggressive traffic control tactic is used. The most suitable inter RAT load balancing tactic was determined.
3. The effectiveness of data transfer services is defined and related with radio channel parameters, when differentiated services based on QoS priorities are used.
4. The model of self optimizing small cells, suitable for development and characterizing HetNet systems, is proposed. First time, the efficiency of inter-layer load balancing in Lithuanian mobile network was investigated, when small cells are used.

### **Practical value of the research findings**

Working with real radio communication systems in Lithuania, it was determined, the characteristics of voice traffic distribution, based on performed call location. The results obtained during the investigation can be used for human communication habits analysis, forecasting possible users' behavior impact for mobile systems. For voice traffic management in network were proposed inter-system load balancing techniques, which allow to utilize heterogeneous cellular network radio resources effectively. Applying such methods network-wide can increase the efficiency of entire network.

In case of data traffic balancing, a quality of users experience was determined, when QoS based and inter-layer traffic balancing is used. According to practical measurements in real radio environment, the gain of user service quality was shown. Implemented MLB methods have improved user experience in heterogeneous network greatly. Besides, applied methods can help to increase the popularity of network operator between external users and increase the revenue. The research performed does not have the similar analogues in Lithuania and is unique, because the analysis was done with a live network.

### **The defended statements**

1. Voice calls users should be classified in a cellular network based on the call location, which allows to estimate the behavior of voice service users and foreseen the possible impact for radio system.
2. The most effective utilization of network resources and quality of services can be achieved, when moderate inter-system voice load balancing technique is applied.
3. QoS differentiation can increase a data transfer service experience for users with a higher priority and ensure better utilization of network capacity, unless and until a radio conditions are good.
4. The load of macro network cells can be reduced twice on average, when self-optimizing small cells are used in HetNet, this leads to significant improve of user experience.

## Approval of the research findings

The research results are published in 7 peer-reviewed scientific publications. 3 of them are referred in other international data bases, 4 in a conference material. Full list of articles are provided in 115–116 pages. The main results of the thesis are presented in the following 7 scientific conferences in Lithuania and abroad:

- annual national conferences “Science – Future of Lithuania”, 2013–2014, Lithuania, Vilnius.
- 1st international workshop on “Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE)”, 2012, Latvia, Riga;
- 8th international conference “Baltic Young PhD Conference "10 Years Baltic Summer School“, 2014, Latvia, Riga;
- 36th international conference „Progress In Electromagnetics Research Symposium“, 2015, Czech Republic, Prague;
- annual national conferences „eStream“ 2015–2016, Lithuania, Vilnius.

## Structure of the Dissertation

The dissertation contains: introduction, three chapters, general conclusions, summary in English, list of references. The dissertation consists of 133 pages, where: 59 figures, 7 tables are used. In total 128 references are cited in the thesis.

## 1. Analysis of users voice and data traffic balancing

Over the past ten years the usage of mobile services, especially of data traffic has increased enormously. Mainly, it was an impact of changing lifestyle of the society. The habits of telecommunication services usage of the customers vary a lot and the requirements for service is always growing. Users are demanding a superior connectivity and high quality anywhere at any time. Today, the number of users in communication systems reached more than 7 milliards. Majority of them have at least one mobile terminal. An equipment, which are used nowadays work as a multi-functional devices and can support all wireless technologies. Today’s cellular network topology is a complex system composed of 2G, 3G, 4G network elements. Together, all wireless technologies compose a heterogeneous cellular network (HetNet). Customers do not care, which access technology they use. They just expect to get a good experience from service provider. However, the movement of millions of devices in HetNet system is unbalanced. This has caused, that mobile users in a network became unevenly distributed. Therefore, some network cells became congested and quality of services are affected. Same as in a public transport the streams of traffic in the network should be controlled in order to ensure the QoS and an efficient utilization of network resources. Mobility load balancing (MLB) techniques in heterogeneous cellular networks are used for users’ voice and data traffic management.

The methods of users traffic balancing in the network are not determined strictly. In many cases, vendors of mobile equipment decide what criteria should be met to perform a load balancing. Usually, as a main criteria number of users per cell or level of resources utilization is used. The utilization level of resources are closely related to number of active users per cell. The quality of service provided to customer depend on the number of users.

QoS is defined, as a user satisfaction with a received service. To ensure a sufficient service level, an acceptable load of the cells should be maintained. Voice and data traffic load from heavy loaded network cells are distributed to the cells, which are loaded lightly. Such MLB techniques allow to balance the users' traffic load in HetNet. Starting with 3GPP Release 8, MLB functionality became more structured. MLB was assigned to so called self-optimizing network (SON) functions. Methods used for voice and data traffic balancing in cellular networks can be divided into two groups. First group contains methods, where load balancing is performed based on radio access bearer (RAB) of service. Traffic in the network, based on service RAB can be balanced using five strategies. First two methods are used to balance the traffic inside the same technology, so they are called intra-system load balancing. The difference between two intra-system balancing strategies is, that traffic is distributed to different cells. First technique uses load distribution to cells, which are operating on a same band, therefore method is called intra-frequency. The second technique transfers the traffic to cells at same technology, but operating on different frequencies. This method is known as inter-frequency balancing.

Similar method, as intra-system load balancing, is used for traffic balancing between different network layers. Usually, small cells form a different layer beside the macro cells and in tandem create a solid mobile network. During the peak traffic loads, a part of load from macro cell is transferred to small cells. Such inter-layer load balancing strongly relieves an intensive load and protects users from being discarded or cells congested.

Remaining two methods are called inter-system load balancing. Differently from other techniques, inter-system load balancing uses load distribution to other technologies.

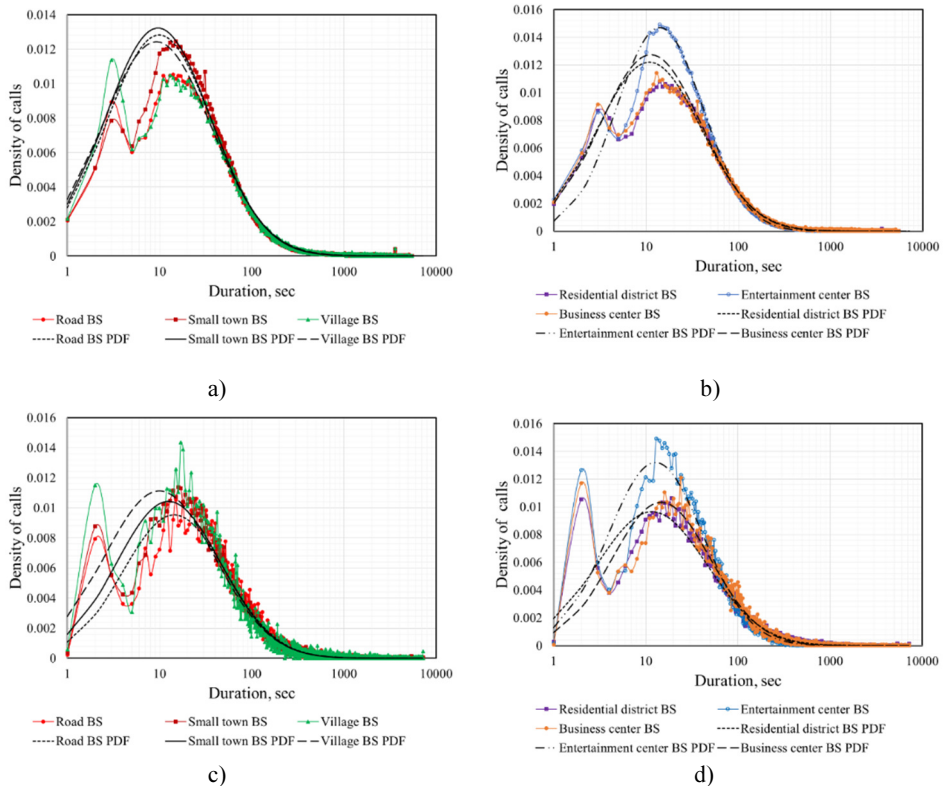
It is worth to mention, that traffic balancing according to RAB is performed based on blind or measurements based handover.

The other group of methods used for traffic control relies on required QoS management. Sometimes a part of network cells become overloaded and it is impossible to forward a traffic to cells with a light load. Then, load balancing is carried out inside the cells. All the traffic is differentiated based on the priorities assigned to users. Users with a higher priority receive more resources from network during peak hours and enjoy better quality, compared to users with lower priority.

Discussed load balancing methods are used in networks unequally. RAB load balancing can be met more often, than QoS balancing. However, not all of methods for RAB balancing are involved proportionally. Intra-system load balancing are encountered more frequently. While traffic balancing between different operators is used only for specific cases. A rapid increase of data volume forced network operators to look for supplementary methods of traffic control. This has caused, that inter-layer and inter-system load balancing techniques became more popular. It is natural, that knowledge about the performance of traffic balancing methods, which were rarely used, is insufficient. Scenarios, where these methods can be applied were rare. Especially, when the understanding of real commercial traffic scenarios is needed. Methods, which were discussed in theoretical level, today are integrated in commercial mobile networks. In many cases, the results obtained in this research are new for load balancing and let to understand why traffic management is mandatory for communication systems.

## 2. Balancing of voice traffic

Before starting to balance the voice load in the network it is required to understand the characteristics of voice traffic in the network. Therefore, the research of mobile call users was organized in Lithuanian mobile networks. Based on CDR metadata, an evaluation of users' communication habits, when being in different locations is performed. As a main input for the research voice call duration measurements are used. Analysis contain more than 6 millions of calls from different locations. According to these locations, users were classified into six separate groups. The name of group represents the location, where voice call was originated or terminated. An idea to analyze the distribution of voice calls in groups was chosen, because the analysis of single user voice calls has some disadvantages. A review of former researches showed, that distribution of individual user voice calls, present an impact to network cells incompletely. Regarding the location of voice call, groups were distinguished into road, village, small town, residential district in the city, business and entertainment center. The distributions of voice calls duration for these groups are shown in Fig. S2.1.



**Fig. S2.1.** Distributions of call duration for user groups, when log-normal approximation is used:  
 a) 1 operator suburban; b) 1 operator urban; c) 2 operator suburban; d) 2 operator urban



Obtained results show, the distributions of voice call durations in urban and suburban areas. For all distributions an approximation of well-known log-normal function is applied, which is widely used for voice calls analysis. It is seen, that log-normal function perfectly fits to the end of voice call distributions, however it misses in the beginning of distribution. Such a discrepancy is caused, because of high number of short calls in mobile networks. The analysis showed that short calls (2–3 sec.) compose around 11–15% of calls in the network. High amount of short calls in the network is an effect of contemporary mobile systems. Many voice calls are forwarded to answering machines, if destination is not reachable. When individual user voice call distributions are investigated, it can happen that such calls will not occur. It is necessary to mention, that higher amount of calls are familiar to the distributions of originated calls, than terminated.

More detailed analysis has showed, that users of different operators behave similarly at same circumstances. Obviously different user groups are concentrated in business and entertainment centers (B&E). These groups perform a lot of short calls. More than half of calls in these groups are shorter than 1min. and 95% of them do not exceed 10min. Compared to other groups, B&E centers users' average call duration is up to 40% shorter. Also, it was noticed, that majority of voice calls for B&E centers, residential districts users', are carried over 3G cells, than 2G. This means, that voice load in urban and suburban areas are distributed differently, on a perspective of radio technology load.

In a research, two similar inter-system voice load balancing algorithms were implemented in a commercial mobile network. The principle of used techniques rely on voice call handover to 2G system during peak traffic loads. LBHO (load based handover) performs a handover of voice call from 3G cell to 2G, based on measurements of cell candidate. The other, direct retry method uses a handover procedure, however handover is performed blindly. Both methods start to balance the load, when the transmitter power threshold is exceeded. First scenario allows to transfer a quarter of users from a cell, when cell bearer power is exceeded more than 50%. Second scenario allows to transfer all voice call users at the same power level. The last is most aggressive and allows to transfer all the users, despite of used cell power. The results are shown in Fig. S2.2.

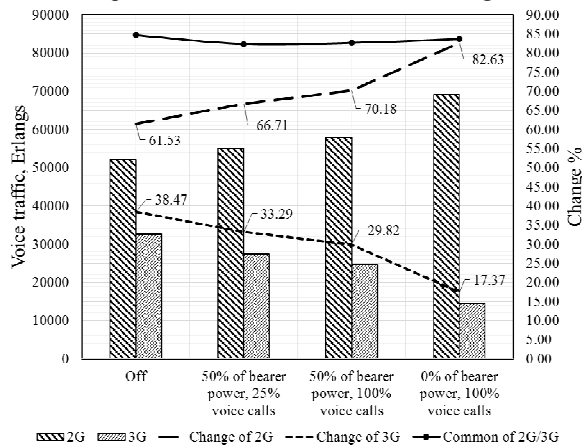


Fig. S2.2. Change of voice traffic according to different voice load balancing rules

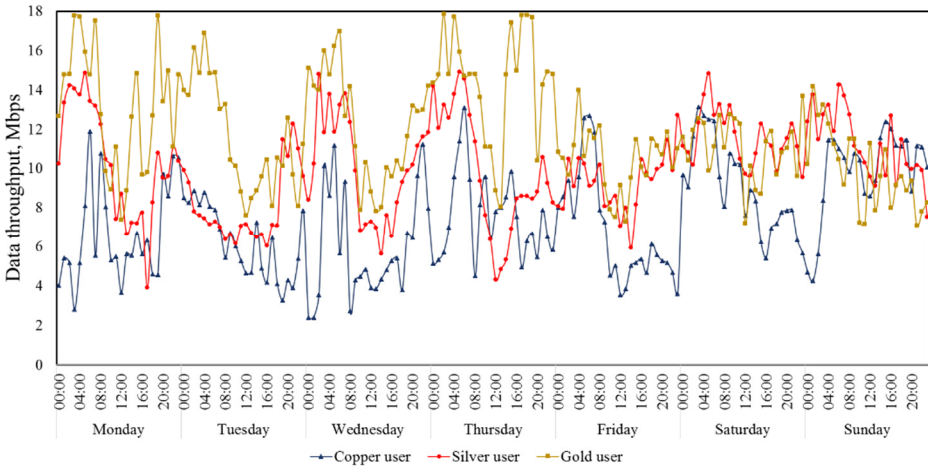
In total, the traffic load on tested base stations were distributed as following: 60% of load on 2G sites and 40% on 3G, when any load balancing is applied. After introducing the least aggressive tactic, the load on 2G cells has increased 5%. The more aggressive tactic allowed to transfer 8% of voice load. However, the most aggressive scenario transfers up to 20% voice load to 2G network. All voice traffic from 3G cell was not transferred to 2G cells, because some of users are using multiRAB services, which do not allow to push the user to 2G. Also, the 2G cells become fully utilized and new connections can not be processed. Applying load balancing strategies in radio communication systems it is necessary to ensure the good quality of services and stable network performance KPI's. The obtained results showed, that inter-RAT handover success rate has decreased around 0,56%, when most aggressive scenario is used. Blocking rate of new connections on 3G has dropped by 5%. This allowed new users to come and signaling storms were eliminated, because of repeated connection attempts. New connection establishments have increased the rate of connection success rate and quality of received services has been improved greatly. HS-DSCH throughput limitation rate has decreased by 8%. For E-DCH, access success rate has improved as well. Three different strategies used for voice traffic balancing showed, that the most aggressive tactic allows to save the highest amount of network resources. The saving of channel elements (CCE) has increased by 26% for downlink and 6% for uplink. However, the most aggressive tactic affects the quality of services negatively. If all the traffic is transferred to 2G, cells become overloaded and connections are discarded. Lastly, an investigation revealed, that moderate inter-system load balancing tactic allows to expect more efficiency of 2G resources utilization and the improvement of 3G services.

### **3. Balancing of data traffic**

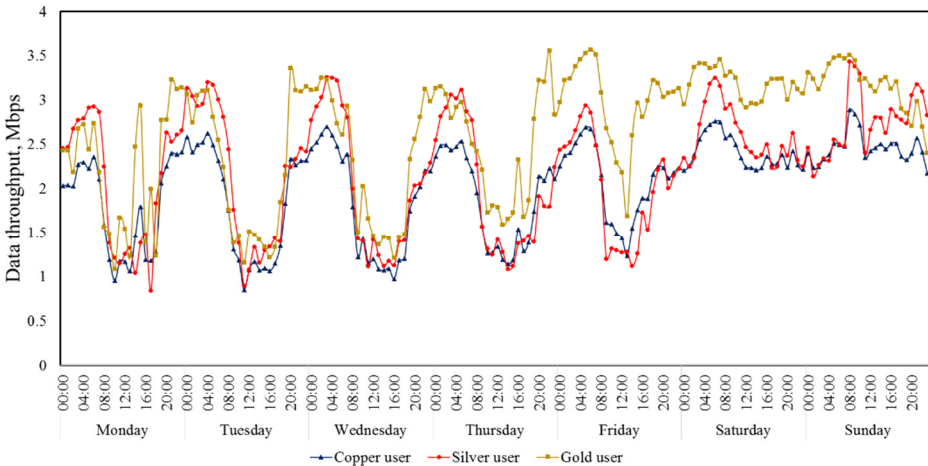
The growth of data volume in the mobile cellular network is much faster than any other type of traffic. For the last few years, the annual consumption of mobile data increases around 60%. Contrary to voice traffic, to analyze data traffic is more difficult. Active data sessions are not always controlled by the user and can take action without the users' knowledge. This leads to, that prediction of data traffic distribution becomes harder. Therefore, network operators are forced to enable basic data load balancing techniques for entire network. Many of operators worldwide are using intra-system, inter-band load balancing methods to manage a 3G data traffic inside the network. However, the latest mobility reports say, that operators should expect for even higher load of data volume. This means, that new methods should be introduced for load balancing. Such are: inter-layer load balancing and differentiated services based on QoS. The latter method rely on provided priority to the user. Inter-layer load balancing uses a layer of small cells. Users from macro network cells are redirected to small cells layer.

In order to investigate the benefits of QoS based load balancing strategy, a research was organized in a live mobile network. According to 3GPP requirements, three user profiles were implemented with different priorities. Users' profiles created using UMTS parameters, allocation/retention priority (ARP) and scheduling priority (SPI), which are used in UMTS QoS architecture. The profiles are prioritized as following: gold user has higher priority compared to silver user twice and silver is twice higher than copper. These users are camped on same highly loaded 3G cell with other regular network users. An equipment

of these users were configured to provide data transfer services on FTP. The services for users are prioritized over Uu and Iu interfaces, but Iub interfaces remains not prioritized. Two different scenarios are investigated, when QoS prioritization is applied. First one, when all the users use the service under good radio conditions. The other one, when user with higher priority moves to the edge of cell. The results obtained during the research are in figures S3.1.–S3.2.



**Fig. S3.1.** Distributions of data throughput on HS-DSCH for differently profiled users



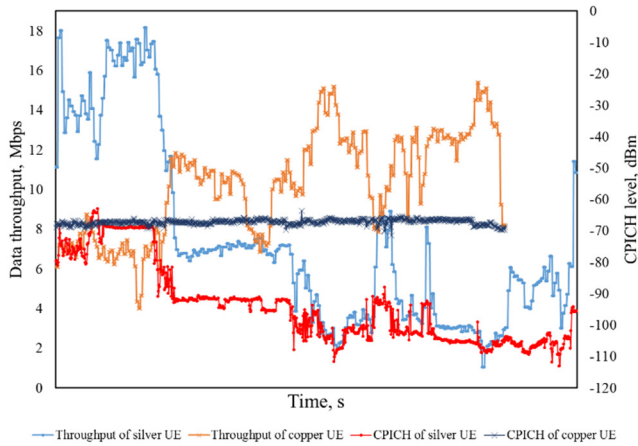
**Fig. S3.2.** Distributions of data throughput on E-DCH for differently profiled users

Under equal radio conditions the gold user achieves the highest data throughput during the peak hours of working day. Outside the peak hours, throughput of user plane becomes similar. The gold user is not able to utilize all provided resources, because UE becomes saturated and the resources are rescheduled to the UEs, which are capable to use them. The measurement of user plane data throughput were collected whole week continuously. Based on these measurement obtained, that silver user has achieved higher data throughput over HS-DSCH by 29,8% compared to copper user. Gold user has achieved better throughput by 16,5% than silver and almost twice better (45,7%), than copper. The large throughput gap between gold and copper users received, because UE is able to utilize network resources on downlink channel more efficiently, than in uplink.

Different channels are used for uplink data transmission. Only four channel codes can be used by UE, when spreading factor is equal to four. This causes, that on uplink UE is not capable to use the same amount of resources during the transmission. Therefore, the difference between achieved throughputs on application layer for UE's with different priorities are lower. An average data throughput on E-DCH for silver user was higher by 9,15% compared to copper. Gold user has received a higher throughput by 17,33% than silver and 26,39% higher, than copper. The results are obtained, when signal level for all the users are very good.

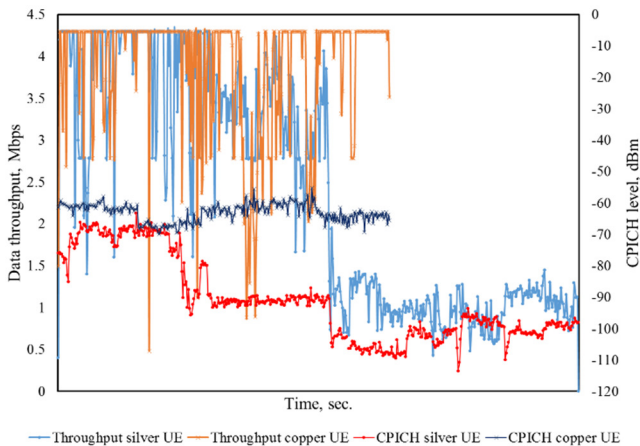
To ensure the stable received signal level for UE is a difficult task, because the user moves in mobile network. Mobility of users, obstacles leads to, that users are distributed in dynamic environment. What is the influence of changing radio conditions for differently prioritized users it is hard to say. Researches analyzing the user experience with QoS based priority under dynamic radio environment are limited. Therefore, the research with the same users was performed. User with a higher priority is compared with a user, which has lower priority. Both of them are camped on the same highly loaded network cell. User with a higher priority moves to the cell edge gradually. For analysis, received data throughput is linked to the channel quality indicator (CQI) measurements. The results for downlink throughput measurements under dynamic radio conditions are in Fig.S3.3.

While both the users are under the same radio conditions, the throughput received by user with a higher priority is much better. Provided graph shows, that silver user achieves the downlink throughput, which is double better, than for copper user. However, when silver user starts to move to the cell edge the power of received CPICH decreases obviously. The channel decoding rate, modulation and mobile coding schemes used for data transfer become lower. When CPICH power reaches -80 dBm, the scheduler starts to redistribute the resources for UE's of next TTI. This causes an increase of data throughput for UE with a lower priority. Resources of a base station are assigned to UE, which is able to utilize them. After next step of signal decrease for silver user, copper user experiences additional peaks in data throughput. The throughput received by UE is dependent on radio conditions. Low CQI values for silver UE indicate that used TBS is small. Small TBS means, that number of codes assigned for UE over HS-DSCH are low. This strongly affects the data throughput on user plane. Therefore, provided QoS priority does not guarantee exclusive service of data transfer under uneven radio environment. Priority based data traffic balancing is efficient and forecasted only at good radio conditions. The same behavior is observed for remaining pairs of users.



**Fig. S3.3.** HS-DSCH data throughput of silver and copper users

Data transfer on uplink direction is performed using dedicated uplink channel. Dedicated connection in uplink allows base station to ensure a fast scheduling of resources and to reduce the delay. The transmitter power is used as a main resource on uplink. During the fast HSUPA resources scheduling the power level transmitted by UE is set to allowed. Control of transmitted power lets avoid a high level of interference. Strict power control on uplink limits the ability to use the resources on uplink direction. Therefore, the gain of data throughput is not so obvious. The results of uplink throughput distribution for pair of silver and copper UE's under dynamic radio environment are in Fig. S3.4.



**Fig. S3.4.** E-DCH data throughput for silver and copper users

At the beginning of session both UE's have same data throughput on uplink. When power of pilot channel starts to decrease for UE with a higher priority, the throughput for copper user do not increase. Its uplink channel is fully utilized and can not seize extra resources. When both UE's with an uplink session move to the edge of cell, the performance of data service decreases equally, despite the priority of profile. The UE under bad radio conditions is forced to use more power on DPCH, than on DPDCH. This leads to smaller TBS and decreased throughput.

The second possibility to balance data load is inter-layer load balancing strategy. The layer in a mobile communications is a part of network cells, which are working on different bands or differ by size. Small cells are the future of cellular networks in providing a huge network capacity and superior connectivity everywhere. Because of their size, small cells are used in different types of premises. Technologically the group of small cells form an independent network layer, which co-operates with macro layer and helps to optimize the traffic load in the network. Pico cells are mainly used for 2G services. Femto cell (HNB – Home NodeB) can provide 3G and 4G services.

Section investigates the challenges and facilities provided by femto cells. The aim of it is show an advantages and disadvantages of femto and how they can be used in today's telecommunication network for better traffic distribution and quality improvement.

Femto cells are simple, low power, plug & play base stations, which can be integrated by end user. Random integration of femto zones makes the deployment of network a bit uncontrollable. However, femto cells depend for self-optimizing (SON) device group. SON features allow HNB to select the best channel and adjust a power. Sensing and tuning procedures are invoked for operating frequency selection. Femto cells can flexibly select a suitable frequency from shared spectrum resources of all operators, white spaces of home operator or from other services. Strict power control and automatic channel optimization ensure the mitigation of interference between the cells, which is caused by unplanned deployment. The accessibility of femto cell can be organized in three different ways. Access to HNB can be open, closed or hybrid. Open access allows to join all the users. While closed access is only for user, which depend for closed group. Hybrid access is also available for all UE's, but user with lower priority can be dropped out of the cell during the peak load. Users of femto zones can achieve better quality of services, because the cells are closer. Higher signal level and channel quality ensure higher throughput and voice quality. Also, better signal reception allows to reduce the transmitted power and saves UE battery. The requirements of femto cell layer from regulatory authorities are lower compared to makro base stations, this facilitates the network development and reduces a cost. As a most important disadvantage of small cells are unreliable backhaul. In many cases last mile connection from third party providers are used. Therefore, it is very hard to guarantee a quality of connection and sufficient capacity. Sometimes unreliable connection can influence a real time services. From the users perspective, femto zone is an value added service, so additional costs are applied. Users pay a monthly tax for a hardware, however for services in femto zone they have favorable pricing.

According to reviewed advantages and disadvantages of femto zones we have created an integration model (Fig. S3.5), which represents femto zone in a perspective of mobile operator and user. The segments of model show the six branches, which characterize a femto zone in today's HetNet.

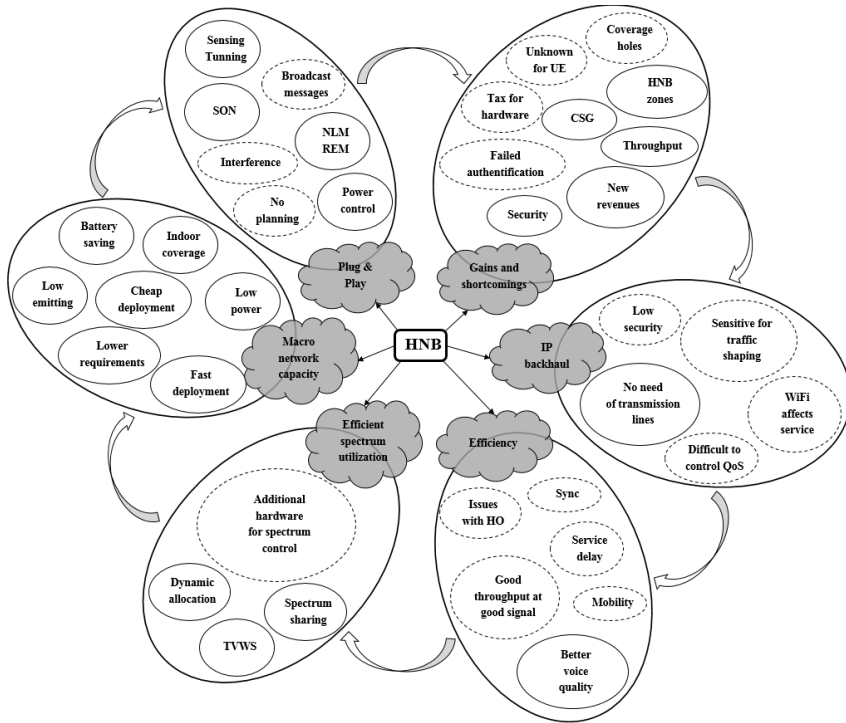


Fig. S3.5. Model of Home NodeB

In more detailed, the model is divided into processes, which cover integration, IP backhaul, interaction with macro layer, resources utilization, efficiency and gains received by users. A positive features related to the branch are marked in a bubble with a straight line. Features, which make challenges, are marked in dotted line. The most positive effect, provided by femto zones, is achieved for a network itself. Increased network capacity and coverage are the main improvements. Flexibility of installation and benefits for users ensure, that femto zones will be deployed widely. Extensive pool of resources allow to use femto zones under different circumstances. Combining SON functionality and features provided by network equipment vendors the high service quality of HNB can be assured. This model can be used by network engineers or marketing specialist, as an informative tool for developing a network strategy.

Based on a created model, the mobile network business strategy can be expanded by integrating a femto cells into the network. One of the way to develop the HNB layer is based on femto zone access strategy. In search of viable business models the matrix of ICT (Information and Communication) modeling parameters are used. Adopting these parameters, a design for any communication system can be made. Selected value parameters, which contain a revenue model and user involvement parameters allow to design a groups of possible femto cells business models (Fig. S3.6).

		Revenue Model	
		Direct	Indirect
User Involvement	Low	User do not contribute entire cost of HNB Static frequency allocation of recourse	User do not contribute entire cost of HNB Dynamic frequency allocation of recourse
	High	User contribute entire cost of HNB Static frequency allocation of recourse	User contribute entire cost of HNB Dynamic frequency allocation of recourse

Fig. S3.6. Groups of business models

These four scenarios are dependent on network operator resources used for service and the involvement of users. The direct value of revenue parameter is a static spectrum resources allocation to the HNB. In opposite way, a dynamic resources allocation is used. If the user agrees to pay a hardware tax, then user involvement is kept as high. Otherwise, the involvement is low. Verizon develops similar strategy in US.

For proposed four different scenarios a probable femto zone configurations can be defined. The following configurations should be understood as an augmentation of scenarios. The aim of configuration is to identify the subject, who plays the main role. The possible configurations are: Operator-based configuration – the main role is played by HNB operator that manages the coverage of femto network. Outsource-based configuration – the main role is played by the third party that is aided by HNB operator who develops and operates HNB network. User-based configuration – the main role is played by the user, which controls a HNB. Broker-based configuration – the main role is aided by broker at the same time ensuring high user involvement. Thus, these business model configurations for HNB deployment can be matched with scenarios proposed before. Note that within each scenario not all business model configurations are possible. Within closed access scenario only two configurations: operator and user-based seems to be possible to be implemented. While open access scenario also two configurations: outsource and broker-based. For a hybrid access scenario all proposed configurations are likely to be applied. Created configurations for femto cells business models are the basis for final models development. Which model to develop depends on the market. Current examples show, that operator-based and user-based configurations are used mostly. However, broker-based and outsource-based configuration will become more popular, because of virtualization of mobile networks. These configurations are too expensive today.

The development of small cell layers in current heterogeneous cellular networks is gathering momentum. Especially, it is noticeable in the markets of US, northern European countries. In Lithuanian market, network operators also develop solutions of small cells,



however a wide expansion is still pending. The main reason is low data usage in smart devices per user and the sufficient capacity of existing macro layer.

The research in a commercial mobile network in Lithuania was organized to prove the provided benefits. Femto cell has provided the coverage as overlaid cell, while the macro cell depending for same operator was working as underlaid. Note, that overlaid cell in the network always has a higher priority and user camps on it, if conditions are met.

Results show, that voice load on a macro cell has reduced twice on average. The same behavior was noticed with a data load distribution. When the femto zone in area has been deployed the data traffic in macro cell has decreased twice. Femto zone has absorbed 14% of data traffic in the area covered by macro base station.

Developing the femto zones closer to customers, S/N ratio and other channel parameters are improved. The measurements show, that average channel quality indicator for femto zone users is around 24.9, while macro users have only 21.56. The VQI (Voice Quality Indicator) measurements revealed, that better voice quality in MOS scale was achieved in femto zone. Measurements with a good score in femto zone were more than 5%. Switching to data transfer measurements, the data throughput was estimated for the users, when composite data transfer service is used. This scenario corresponds to a real service usage of majority of customers. Obtained results show, that femto user throughput is higher up to 10% compared to macro cell user. The analysis showed that inter-layer load balancing reduces the load of macro layer and improves the end user experience. Growing usage of data in HetNet will encourage operators to develop the small cell layer. Firstly, it should start in huge business centers, stadiums, other highly loaded places. Users can expect to get even better service performance, while moving towards to 5G.

## General conclusions

In a thesis, it was proven, that an application of load balancing methods in a mobile heterogeneous network can help to improve an efficiency of resources utilization and user experience. The following significant results for scientific field of Electrical and Electronic engineering are obtained:

1. The habits of voice calls users were determined based on the location, where voice call is performed.
  - 1.1. It was determined, that 15% of calls in network are short calls (2–3 s). These calls make an impact to voice traffic model, therefore they should be included into distributions of call durations. The shortest calls are typical for user groups located in business and entertainment centers.
  - 1.2. 75% of voice calls in urban areas are initiated on 3G. This shows, that load for network cells is distributed unevenly.
2. The performance of voice calls balancing techniques, based on blind and adaptive, measurements based, handover were investigated.
  - 2.1. The inter-system voice load balancing have improved the utilization of network resources and user experience, by increasing the cell capacity up to 9% and ensuring better access rate up to 6 %.

- 2.2. The most aggressive strategy of voice load balancing allows to distribute up to 20% of voice load. However, it does not ensure the optimal utilization of resources and quality of service. It is better to rely on moderate voice load balancing.
3. New findings were provided about the data throughput for users with different QoS profiles, under dynamic radio conditions in 3G network.
  - 3.1. At similar radio conditions, users with higher QoS profile receive better data throughput. Gold user achieves higher throughput up to 16% on downlink channel, than silver user and up to 45% than copper. On dedicated uplink channel, gold user achieves higher throughput up to 17%, than silver and up to 26% than copper.
  - 3.2. When received pilot signal level drops below than  $-80$  dBm, the higher priority user profile does not guarantee exceptional service. Resources of channel are divided based on measured CQI, therefore data load balancing based on QoS is predictable only at good radio environment.
4. Unique integration model of self-optimizing small cells was created and influence on inter-layer load balancing was investigated for a first time in Lithuanian mobile network, when small cells are used.
  - 4.1. Provided model facilitates a process of small cells integration into heterogeneous cellular networks and allows to create a possible business models and configurations for it, when parameters of ICT modelling matrix are used. Four configurations are created based on value parameters, which are suitable for creation of models.
  - 4.2. The scatter of users in the network is ensured, when small and macro cells are combined. The load of macro network cells can be reduced twice on average, while channel quality is improved up to 15%, data throughput up to 10% and voice quality with a good score, according to MOS, up to 5% for femto cell users.

## Recommendations

1. When planning and optimization of capacity in heterogeneous cellular network, which contains many of users with multi technological handsets, is performed, it is recommended to use a metadata of voice calls, to evaluate a distribution of voice calls duration according to location and to foreseen a possible network load.
2. In a networks, which are operating several radio technologies, it is recommended to implement inter-system load balancing techniques, based on blind and measurements based handovers. They ensure full cellular system capacity utilization. It is proposed to use moderate load balancing methods.
3. When quality of experience for highly prioritized users needs to be improved during peak load, it is recommended to apply users' traffic differentiation in a network based on QoS.
4. Developing an innovative, future oriented heterogeneous cellular networks, it is recommended to expand the network layer of small cells and to focus on the researches of such cells efficiency and application.

---

## Priedai<sup>1</sup>

**A priedas.** Disertacijos autoriaus sąžiningumo deklaracija.

**B priedas.** Bendraautorių sutikimai teikti publikacijų medžiagą disertacijoje.

**C priedas.** Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos.

---

<sup>1</sup>Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje

Karolis ŽVINYS

VARTOTOJŲ SUKURIAMŲ SRAUTŲ BALANSAVIMAS  
HETEROGENINIO KORINIO RYŠIO TINKLUOSE

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,  
elektros ir elektronikos inžinerija (01T)

LOAD BALANCING OF USERS GENERATED TRAFFIC  
IN HETEROGENEOUS CELLULAR NETWORKS

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,  
Electrical and Electronic Engineering (01T)

2017 04 21. 10,0 sp. l. Tiražas 20 egz.  
Vilniaus Gedimino technikos universiteto leidykla „Technika“,  
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,  
<http://leidykla.vgtu.lt>  
Spausdino BĮ UAB „Baltijos kopija“  
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius