VILNIAUS GEDIMINO
TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTRONINIŲ SISTEMŲ KATEDRA

Ernestas Ročys

SIAURAJUOSČIO DAIKTŲ INTERNETO MODULIŲ ENERGETINIO EFEKTYVUMO TYRIMAS

NARROWBAND INTERNET OF THINGS MODULES POWER EFFICIENCY RESEARCH

Magistro baigiamasis darbas

Elektronikos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX050

Kompiuterizuotų elektroninių sistemų specializacija

Elektronikos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2020

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTRONINIŲ SISTEMŲ KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas
_____
(*parašas*)
prof. dr. (HP) D. Navakauskas
2020 m. 05 mėn. 26 d.

Ernestas ROČYS

SIAURAJUOSČIO DAIKTŲ INTERNETO MODULIŲ ENERGETINIO EFEKTYVUMO TYRIMAS

NARROWBAND INTERNET OF THINGS MODULES POWER EFFICIENCY RESEARCH

Magistro baigiamasis darbas

Elektronikos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX050
Kompiuterizuotų elektroninių sistemų specializacija
Elektronikos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas doc. dr. A.Katkevičius 2020-05-25
(*pedag. vardas, moksl. laipsnis, vardas, pavardė*) (*parašas*) (*data*)

Darbas atitinka reikalavimus
Patvirtino A. Gaidienė
2020-06-01

Patvirtino
Rita Raguckienė
Elektroninių sistemų katedra
Administratorė

Vilnius, 2020

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Elektronikos fakultetas
Elektroninių sistemų katedra

ISBN ISSN
Egz. sk. .....
Data .....-.....-.....

Antrosios pakopos studijų **Elektronikos inžinerijos** programos magistro baigiamasis darbas

Pavadinimas **Siaurajuosčio daiktų interneto modulių energetinio efektyvumo tyrimas**

Autorius **Ernestas Ročys**

Vadovas **Andrius Katkevičius**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Siaurajuosčio daiktų interneto modulių energetinio efektyvumo tyrimas. Magistro baigiamasis darbas elektronikos inžinerijos laipsniui. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius, 2020, 58 p., 28 iliustr., 17 lent., 36 bibl., 2 priedų.

Baigiamojo darbo pagrindinis tikslas yra ištirti siaurajuosčio daiktų interneto technologiją palaikančių modulių energetinį efektyvumą ir palyginti rezultatus su šiuo metu naudojamų technologijų energetiniu efektyvumu. Tikslui pasiekti buvo atlikta literatūros analizė, ištirti modulių energetiniai efektyvumai ir atsižvelgiant į gautus rezultatus pateikti pasiūlymai, kaip geriausia naudoti šią technologiją. Gauti rezultatai parodė, kad siaurajuosčio daiktų interneto technologiją palaikantys moduliai energetiniu atžvilgiu yra keletą kartų efektyvesni ir pasitelkus šią technologiją galima suprojektuoti gaminius, kurie gali veikti dešimt metų naudodami tik baterijos energiją.

Prasminiai žodžiai: Siaurajuosčio daiktų interneto technologija, energetinis efektyvumas, energijos suvartojimas, NB-IoT.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Electronics
Department of Electronic Systems

ISBN ISSN
Copies No. .....
Date .....-.....-.....

Master Degree Studies **Electronics Engineering** study programme Master Graduation Thesis

Title	**Investigation of Narrow-Band Internet of Things Modules Energy Efficiency**
Author	**Ernestas Ročys**
Academic supervisor	**Andrius Katkevičius**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

NarrowBand Internet of Things modules power efficiency research. Master thesis for electrical engineering degree. Vilnius Gediminas technical university. Vilnius, 2020, 58 p., 28 illust., 17 tab., 36 bibl., 2 app.

The main objective of this thesis is to investigate NarrowBand Internet of Things modules power efficiency and compare it to other mobile technologies power efficiency. There was analysis of literature done, investigation of modules power efficiency done and suggestions given, how better to use this technology, in order to reach this objective. Results of this research showed that the power efficiency of NarrowBand Internet of Things modules is many times better than other modules based on other technologies. Using the NarrowBand Internet of Things technology it is possible to design a device which could work for 10 years using only battery.

Keywords: NarrowBand Internet of Things, power efficiency, power consumption, NB-IoT.

Vilniaus Gedimino technikos universiteto egzaminų sesijų ir baigiamųjų darbų rengimo bei gynimo organizavimo tvarkos aprašo
2 priedas

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Ernestas Ročys, 20124206
(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Elektronikos fakultetas
(Fakultetas)

Elektronikos inžinerija, EKSfm-18
(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2020 m. birželio 01 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Siaurajuosčio daiktų interneto modulių energetinio efektyvumo tyrimas“ patvirtintas 2018 m. spalio 31 d. dekano potvarkiu Nr. 249el, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Mano darbo vadovas docentas daktaras Andrius Katkevičius.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).

(Parašas) Ernestas Ročys
(Vardas ir pavardė)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

ELEKTRONINIŲ SISTEMŲ KATEDRA

Technologijos mokslų sritis

Elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo kryptis

Elektronikos inžinerijos studijų kryptis

Elektronikos inžinerijos studijų programa, valst. kodas 6211EX050

Kompiuterizuotų elektroninių sistemų specializacija

TVIRTINU

Katedros vedėjas

prof. dr. D. Navakauskas

2020 m. 05 mėn. 08 d.

MAGISTRO BAIGIAMOJO DARBO

UŽDUOTIS

Studentui Ernestui ROČIUI

Baigiamojo darbo tema: Siaurajuosčio daiktų interneto modulių energetinio efektyvumo tyrimas

Investigation of Narrow-Band Internet of Things Modules Energy Efficiency

Patvirtinta 2018 m. 10 mėn. 31 d. dekano potvarkiu Nr. 249 el.

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2020 m. 05 mėn. 28 d.

Darbo tikslas – ištirti siaurajuosčio daiktų interneto technologiją palaikančių modulių energetinį efektyvumą ir palyginti rezultatus su šiuo metu Lietuvoje plačiai naudojamų technologijų energetiniu efektyvumu.

Darbo uždaviniai

1. Atlikti literatūros analizę apie siaurajuosčio daiktų interneto technologiją.
2. Ištirti modulių energetinį efektyvumą.
3. Pateikti pasiūlymus, kaip geriausiai naudoti šios technologijos modulius.

Aiškinamojo rašto turinys

Įvadas

Darbo aktualumas ir tikslas

Darbo uždaviniai

Naudoti tyrimo ir analizės metodai

Darbo naujumas ir praktinė nauda

Darbo struktūra

1. Siaurajuosčio daiktų interneto technologijos teorinė apžvalga
2. Siaurajuosčio daiktų interneto modulių prototipų paruošimas eksperimentams

3. Siaurajuosčio daiktų interneto modulių energetinio efektyvumo tyrimas

Apibendrinimas. Išvados

Literatūra

Priedai

A priedas. (Magistro baigiamojo darbo CD, DVD, USB ar įkelti į mano.vgtu.lt)

Baigiamojo darbo rengimo konsultantas:

(*pedag. vardas, moksl. laipsnis, vardas, pavardė*)

Vadovas

(*parašas*) doc. dr. A. Katkevičius

(*pedag. vardas, moksl. laipsnis, vardas,pavardė*)

Užduotį gavau 2020 m. balandžio mėn. 15 d.

TURINYS

Žymenys ir santrumpos **8**

Įvadas **9**
Darbo aktualumas ir tikslas ... 9
Darbo uždaviniai ... 9
Naudoti tyrimo ir analizės metodai ... 9
Darbo naujumas ir praktinė nauda ... 10
Darbo struktūra ... 10

1. Siaurajuosčio daiktų interneto technologijos teorinė apžvalga **11**
1.1. Technologinis įgyvendinimas ... 11
1.2. Siaurajuosčio daiktų interneto technologijos specialios funkcijos ... 15
1.3. Trumpas skyriaus apibendrinimas ... 17

2. Siaurajuosčio daiktų interneto modulių prototipų paruošimas eksperimentams **18**
2.1. Elektrinės principinės schemos ... 18
2.2. Spausdintinių plokščių projektavimas ... 20
2.3. Pagamintų plokščių patikra ... 21
2.4. Atliekamų matavimų scenarijai ... 24
2.5. Bandymų įrangos pasirinkimas ... 25
2.6. Programų kodai, reikalingi bandymams atlikti ... 26
2.7. Programinė įranga matavimams atlikti ... 28
2.8. Trumpas skyriaus apibendrinimas ... 29

3. Siaurajuosčio daiktų interneto modulių energetiniai efektyvumo tyrimai **30**
3.1. Modulių energijos suvartojimas dirbant skirtingais režimais ... 30
3.2. Skirtingų technologijų energetinis efektyvumas siunčiant duomenis ... 40
3.3. Technologijos panaudojimo galimybės ... 43
3.4. Trumpas skyriaus apibendrinimas ... 50

Apibendrinimas. Išvados **52**

Literatūra **53**

PRIEDAI **55**
A priedas. Magistro baigiamasis darbas įkeltas į mano.vgtu.lt sistemą ... 55
B priedas. Pranešimo XXIII-oje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje medžiaga ... 55

ŽYMENYS IR SANTRUMPOS

Žymenys:

- I – srovė, A
- P – galia, W
- S11 – įėjimo atspindžio koeficientas
- U – įtampa, V

Santrumpos:

- GSM (angl. *Global System for Mobile Communications*) – pasaulinė antrosios kartos mobiliojo ryšio sistema.
- LTE (angl. *Long-Term Evolution*) – pasaulinė ketvirtosios kartos mobiliojo ryšio sistema.
- NB-IoT (angl. *NarrowBand – Internet of Things*) – siaurajuosčio daiktų interneto mobiliojo ryšio sistema.
- SMS (angl. *Short Messae Service*) – trumpųjų žinučių paslauga.

ĮVADAS

Darbo aktualumas ir tikslas

Sparčiai populiarėjant daiktų interneto naudojimui buvo pastebėta, kad yra labai didelis poreikis gaminių, galinčių veikti autonomiškai naudojant tik baterijos energiją. Iki šiol veikiančios mobiliojo ryšio technologijos buvo nelabai tinkamos tokiam darbo režimui, kadangi šios technologijos suvartoja santykinai daug energijos. Daiktų interneto gaminiai nereikalauja didelio kiekio siunčiamų duomenų, nereikalauja didelio duomenų apsikeitimo greičio ir dažnai didelę dalį veikimo laiko dirba miego režimu. Taigi „3GPP“ organizacija nusprendė, kad reikia sukurti naują technologiją, kuri būtų skirta daiktų interneto gaminiams ir ją palaikantys gaminiai, kurie naudodami tik baterijos energiją, galėtų veikti 10 metų ir kartu turėtų mobilųjį ryšį. Ši technologija vadinama siaurajuosčio daiktų interneto technologija. Šio darbo tikslas yra ištirti naujos mobiliojo ryšio technologijos, t. y. siaurajuosčio daiktų interneto, energetinį efektyvumą. Tyrimo tikslas – atlikti siaurajuosčio daiktų interneto technologiją palaikančio modulio energijos suvartojimo tyrimus Lietuvoje. Gautus rezultatus palyginti su šiuo metu plačiai naudojamų modulių, kurie palaiko GSM ir LTE technologijas, energijos suvartojimo rezultatais. Remiantis tyrimo rezultatais įrodyti šios technologijos pranašumą daiktų interneto srityje (Wikipedia, 2020a).

Darbo uždaviniai

Tiriamojo darbo metu yra įgyvendinami keli uždaviniai. Visų pirma atliekama siaurajuosčio daiktų interneto technologijos analizė. Didžiausias dėmesys skiriamas energetiniam efektyvumui. Įgyvendinant antrąjį uždavinį yra suprojektuoti eksperimentiniai maketai, skirti atlikti tyrimams su GSM, LTE ir siaurajuosčio daiktų interneto technologijas palaikančiais moduliais. Taip pat yra atliekami energetinio efektyvumo eksperimentiniai tyrimai. Tiriamojo darbo pabaigoje yra formuluojamos išvados ir rekomendacijos.

Naudoti tyrimo ir analizės metodai

Eksperimentiniai maketai ruošti „Atlium Designer“ programiniu paketu. Mobiliojo ryšio perdavimo antenos projektuojamos naudojant „Ansys HFSS“ programinį paketą, kuriame projektuojamos antenos parametrai apskaičiuojami remiantis baigtinių elementų metodu ir Maksvelo lygtimis. Energetiniam efektyvumui nustatyti reikalingi rezultatai gaunami iš maitinimo šaltinio „NGMO2“, naudojant „LabView“ programinį paketą.

Darbo naujumas ir praktinė nauda

Pirmą kartą siaurajuosčio daiktų interneto technologija buvo pristatyta „3GPP“ organizacijos 2016 m. birželį. Pagrindiniai šios technologijos kūrimo tikslai buvo padidinti prie vienos bazinės stoties prisijungusių vartotojų skaičių, užtikrinti geresnę ryšio kokybę patalpose, esančiose po žeme, sumažinti šią technologiją palaikančių modulių kainą, sudaryti galimybę prietaisui veikti 10 metų naudojant tik baterijos energiją, taip pat greitai ir paprastai įdiegti naują technologiją. 2017 m. Lietuvoje buvo paleista pirma bazinė stotis, palaikanti šią technologiją, o 2020 m. pradžioje Lietuvoje ši technologija buvo išleista naudoti oficialiai. Šio darbo metu buvo tiriama, kaip skiriasi naujos mobiliojo ryšio technologijos energetinis efektyvumas lyginant su prieš tai naudotomis mobiliojo ryšio technologijomis. Gauti rezultatai parodė, kokį energetinį efektyvumą galima pasiekti su šia mobiliojo ryšio technologija ir kaip, naudojantis šia technologija, galima pailginti gaminio veikimo laiką naudojant tik baterijos energiją. (Degutis, 2020; GSMA, 2016; Mangalvedhe et al., 2016; Wikipedia, 2020a)

Darbo struktūra

Aiškinamąjį rašto darbą sudaro penkios darbo dalys. Darbas pradedamas įvadu. Pirmajame skyriuje pateikiama literatūros analizė. Analizuojami siaurajuosčio daiktų interneto techniniai parametrai ir galimi technologijos įgyvendinimo būdai. Toliau apžvelgiamos naujosios technologijos specialiosios funkcijos. Dalis šių funkcijų yra atsakingos už energetinį efektyvumą.

Antrame skyriuje pateiktas aprašymas, kaip ruoštasi tyrimui. Aprašyta maketų spausdintinių plokščių projektavimo ir patikros eiga. Paruoštas atliekamų tyrimų planas ir naudojami modulių veikimo scenarijai. Tyrimams atlikti parinkta matavimų įranga. Paruoštos programinės įrangos, skirtos modulių veikimo scenarijams įgyvendinti ir matavimo įrangai valdyti.

Trečiame skyriuje atlikti energetinio efektyvumo tyrimai. Išbandytos siaurajuosčio daiktų interneto funkcijos. Pateikti ir aptarti matavimų rezultatai. Palyginti energijos suvartojimai tarp skirtingas technologijas palaikančių modulių, jiems veikiant skirtingais veikimo režimais ir siunčiant duomenis į serverį skirtingu periodu. Atlikti tyrimai, kiek vidutiniškai energijos reikia išsiųsti vienam baitui su skirtingas technologijas palaikančiais moduliais. Apskaičiuotas gaminio, kuris palaiko siaurajuosčio daiktų interneto technologiją, teorinis veikimo laikas naudojant tik baterijos energiją. Darbo pabaigoje pateiktas apibendrinimas ir išvados.

1.SIAURAJUOSČIO DAIKTŲ INTERNETO TECHNOLOGIJOS TEORINĖ APŽVALGA

Davikliai, nuotoliniu būdu pranešantys oro kokybę, jutikliai, nustatantys automobilių srautą gatvėse ir nuotoliniu būdu rodantys informaciją, skaitikliai, serveriui teikiantys informaciją apie kiekvieno mėnesio rodmenis, ar konteineriai, pranešantys šiukšlių išvežimo įmonėms, kad jau prisipildė, – visa tai yra daiktų interneto inžinerijos pavyzdžiai. Daiktų interneto prietaisams svarbu palaikyti ryšį su serveriu arba tarpusavyje, kad įvykus kokiam nors loginiam įvykiui serveryje esanti programa arba kiti prietaisai galėtų atlikti tam tikrus veiksmus, priklausančius nuo to įvykio. Logiška, kad tokiems prietaisams reikia ir tam tikro energijos šaltinio. Kol tokie prietaisai nereikalauja mobilumo ir turi prieigą prie pastovaus energijos tinklo, tol jiems nekyla jokių sunkumų energijai gauti. Kitu atveju reikia naudoti tam tikro tipo baterijas. Jeigu norima, kad prietaisas veiktų dešimt metų, naudodamas bateriją, jis turi vartoti labai mažai energijos arba turi turėti labai didelės talpos bateriją. Tačiau prietaisas su labai didelės talpos baterija bus sunkus, didelis, nemobilus, lengvai pastebimas. Todėl norint turėti prietaisą, kuris būtų mažas, mobilus ir galėtų veikti ilgai, reikia labai mažo energijos suvartojimo. Taip pat tokiam prietaisui reikia kiek įmanoma platesnės belaidžio tinklo srities, kuri būtų pasiekiama esant stipriai nutolus nuo belaidžio ryšio šaltinio. Tokie prietaisai jau egzistuoja daugiau nei dešimt metų (Huawei Technologies, 2016), bet jie buvo nestandartizuoti, nepatikimi ir nesaugūs. Siaurajuosčio daiktų interneto technologija išsprendžia visas šias problemas. Technologija pasižymi mažu energijos suvartojimu, plačia belaidžio tinklo sritimi ir užtikrina saugų duomenų perdavimą.

1.1. Technologinis įgyvendinimas

NB-IoT yra nauja mobiliojo ryšio technologija, kurią standartizavo „3GPP“. Ši technologija yra sukurta specialiai dėl labai išaugusio poreikio prietaisų, galinčių veikti plačiame ruože ir vartojančių labai mažai energijos duomenų siuntimui ir paties prietaiso veikimui (GSMA, 2017). Kadangi tokios technologijos paklausa yra didelė, nuspręsta, kad ją sukurti reikia kuo greičiau. Tam tikslui pasirinkta naudoti jau esamas mobiliojo ryšio bazines stotis ir pačią NB-IoT technologiją sukurti LTE pagrindu.

NB-IoT naudojami tie patys dažnių ruožai kaip ir LTE: 1, 2, 3, 5, 8, 11, 12, 13, 17, 18, 19, 20, 25, 26, 28, 31, 66, 70 (VIAVI Solutions, 2017). Šių dažnių ruožų panaudojimas pasiskirsto skirtingai tam tikruose pasaulio regionuose: Europa – B3 (1800 MHz), B8 (900 MHz), B20 (800 MHz); Nepriklausomų valstybių sandrauga – B3 (1800 MHz), B8 (900 MHz), B20 (800 MHz); Šiaurės Amerika neturi; Azijos Ramiojo vandenyno regionas – B1 (2100 MHz), B3 (1800 MHz), B5 (850 MHz), B18 (850 MHz), B20 (800 MHz), B26 (850 MHz) ir B28 (700 MHz); Afrikos

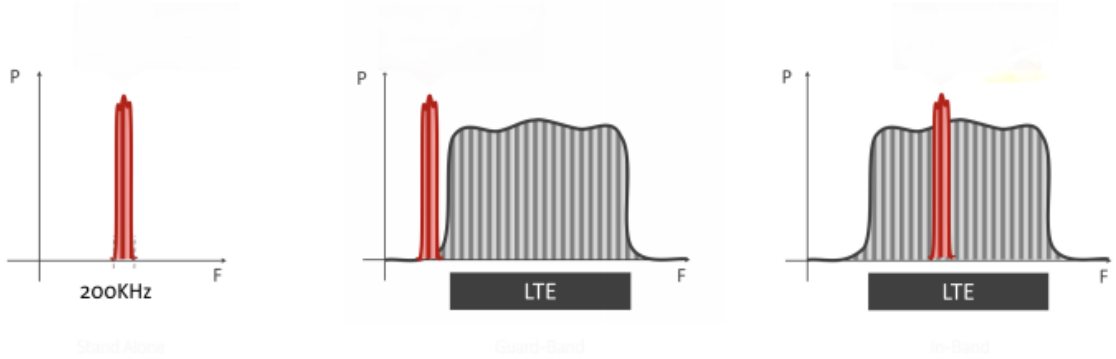
pietinė dalis – B3 (1800 MHz), B8 (900 MHz); Vidurio rytų ir Šiaurės Afrika B8 (900 MHz) ir B20 (800 MHz); Pietų Amerika – B2 (1900 MHz), B3 (1800 MHz), B5 (850 MHz) ir B28 (700 MHz) (GSMA, 2017).

1.1 lentelė. NB-IoT naudojami dažnių ruožai (VIAVI Solutions, 2017)

Dažnių juosta	Dažnių ruožas siunčiant į bazinę stotį (MHz)	Dažnių ruožas gaunant iš bazinės stoties (MHz)
1	1920–1980	2110–2170
2	1850–1910	1930–1990
3	1710–1785	1805–1880
5	824–849	869–894
8	880–915	925–960
11	1427,9–1447,9	1475,9–1495,9
12	699–716	729–746
13	777–787	746–756
17	704–716	734–746
18	815–830	860–875
19	830–845	875–890
20	832–862	791–821
25	1850–1915	1930–1995
26	814–849	859–894
28	703–748	758–803
31	452,5–457,5	462,5–467,5
66	1710–1780	2110–2200
70	1695–1710	1995–2020

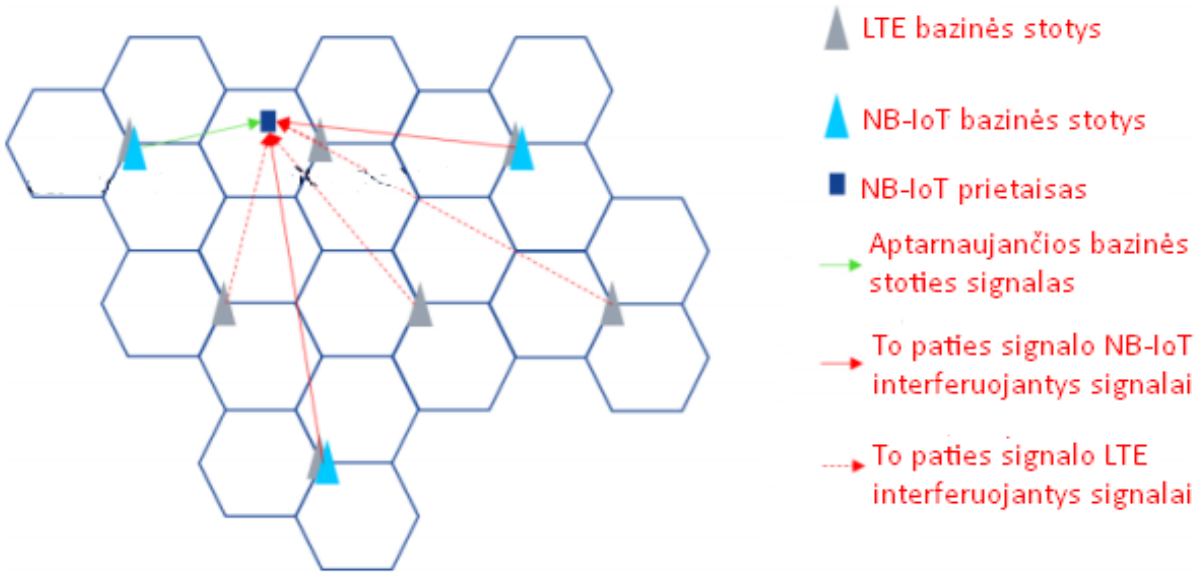
NB-IoT tinklas gali būti įgyvendinamas trimis būdais (žr. 1.1 pav.). Pirmas būdas – veikiant atskirai zonose, kur dar nėra mobiliojo ryšio ar panaikinti tam tikri mobiliojo ryšio dažnių ruožai, tam, kad būtų įgyvendinta siaurajuosčių daiktų interneto technologija (VIAVI Solutions, 2017). Pavyzdžiui, kai kuriose zonose naikinami GSM dažnio nešliai ir jie naudojami nešti NB-IoT technologija perduodamai informacijai. Kiti du būdai veikia naudojant jau palaikomus LTE dažnių ruožus. Antras būdas yra realizuotas naudojant nešlio periodus, esančius šalia LTE dažnių ruožo, taip nepanaudojant LTE ryšio išteklių ir kartu visiškai išvengiant galimos duomenų interferencijos. Trečias būdas yra panaudoti jau palaikomų LTE dažnių ruožo periodus, veikiant kartu su LTE ryšiu. Toks būdas yra lengviausiai ir pigiausiai įgyvendinamas mobilaus ryšio operatoriams, nes jis

nereikalauja jokių bazinių stočių aparatinės įrangos pakeitimų. Taip pat šis būdas yra efektyviausias, nes LTE ir NB-IoT ištekliai bus naudojami pagal mobiliojo ryšio naudotojų ar prietaisų paklausą, taip efektyviai išnaudojant tą pačią bazinę stotį.



1.1 pav. NB-IoT tinkle įgyvendinimo būdai. Kairysis – veikiant atskirai, vidurinysis – šalia LTE dažnių ruožo, dešinysis – veikiant LTE dažnių ruože (VIAVI Solutions, 2017)

Viena bazinė stotis galės palaikyti labai didelį skaičių prisijungusių siaurajuosčio daiktų interneto technologiją palaikančių prietaisų. Planuojama, kad viena bazinė stotis galės palaikyti mažiausiai 52547 prisijungusių prietaisų. Toks skaičius parinktas skaičiuojant, kad vienas namas turės apie 40 tokių prietaisų, ir atsižvelgus į Londono namų tankumą, t. y. viename kvadratiniame kilometre 1517 namai, o bazinės stoties aptarnavimo spindulys 1732 metrai (Mangalvedhe et al., 2016).



1.2 pav. NB-IoT prietaiso prisijungimo prie bazinės stoties iliustracija (Mangalvedhe et al., 2016)

Veikiant siaurajuosčio daiktų interneto technologijai LTE dažnių ruože svarbu užtikrinti, kad neįvyktų duomenų interferencija tarp LTE ir NB-IoT siunčiamos informacijos. Tarkime, artimiausios bazinės stoties zonoje yra NB-IoT technologiją palaikantis prietaisas, kuris yra šalia LTE bazinės stoties ir prisijungimui naudoja tokio dažnio kanalą, kurį naudoja zonoje esantis LTE technologiją palaikantis prietaisas. Taigi tai yra prieš tai apibūdintas trečiasis veikimo būdas, kai NB-IoT informacija perduodama kartu su LTE informacija tame pačiame dažnių ruože. Norint išvengti galimos duomenų interferencijos NB-IoT prietaisas geriau jungsis prie toliau esamos NB-IoT bazinės stoties tam, kad būtų išvengta menkiausia galimybė duomenų interferencijai ir kad būtų gautas mažiausias signalo ir interferencijos plius triukšmo santykis (žr. 1.2 pav.). Veikiant kitais dviem būdais tokia galima problema neegzistuoja, bet informacijos praradimas lieka įmanomas dėl blogo ryšio esant dideliam atstumui tarp prietaiso ir bazinės stoties.

1.2 lentelė. Maksimalūs galimi visos NB-IoT linijos nuostoliai (VIAVI Solutions, 2017)

Kanalo tipas	**Bendras siuntimo kanalas**(Wu, 2017)	**Prietaiso siuntimo kanalas**(Wu, 2017)
Maksimali galia (dBm)	46	23
(1) Naudojama galia (dBm)	35	23
(2) Šiluminis triukšmo tankumas (dBm/Hz)	-174	-174
(3) Gavėjo triukšmo lygis (dB)	5	3
(4) Interferencijos riba (dB)	0	0
(5) Užimamas dažnių ruožas (kHz)	180	15
(6) Efektyvioji nuostolių galia = (2) + (3) + (4) + 10log((5)) (dBm)	-116,4	-129,2
(7) Reikalingas signalo ir interferencijos plius triukšmo santykis (dB)	-12,8	-11,9
(8) Reikalingas gavėjo jautrumas = (6) + (7) (dBm)	-129,2	-141,1
(9) Maksimalūs linijos nuostoliai (dB)	**164,2**	**164,1**

Kitas būdas norint išvengti duomenų interferencijos tiek veikiant LTE dažnių ruože, tiek veikiant šalia LTE dažnių ruožo ar atskirai yra didinti siunčiamo signalo galią. Teoriškai padidinę NB-IoT signalo galią tiesiogiai pageriname signalo ir interferencijos plius triukšmo santykį. NB-IoT

signalo, veikiančio tam tikrame dažnio kanale, galią padidiname panaudodami dalį kitų kanalų galios. Standartiškai naudojamo kanalo galios padidinimas negali viršyti 6 dB, o padidinę vieną kanalą 6 dB kitų kanalų, naudojamų LTE signalams perduoti, galia sumažėja nežymiai (Mangalvedhe et al., 2016). Pavyzdžiui, turint bazinę stotį, kurios maksimali galia 46 dBm ir palaikomas dažnių ruožas 10 MHz, pakeliant jos vieno kanalo galią per 6 dB, kitų kanalų galios sumažėtų nuo 29 dBm iki 28,7 dBm. Toks pokytis niekaip nelemia jau esamų mobiliojo ryšio standartų.

Norint nustatyti NB-IoT bazinės stoties veikimo zoną, reikia apskaičiuoti maksimalius perdavimo linijos nuostolius, kad būtų galima išsiaiškinti, kada prietaisas jau nepriklauso bazinės stoties veikimo sričiai. Pirmoje lentelėje pavaizduotos bendro ir prietaiso naudojamo kanalo maksimalios specifikacijos ir galimų nuostolių maksimalios vertės. Šiuo atveju atsižvelgiama, kad naudojamos bazinės stoties maksimali galia yra 46 dBm, bet NB-IoT signalui perduoti realiai naudojama maksimali galia yra 35 dBm po signalo pastiprinimo per 6 dB. Prietaisas maksimaliai gali siųsti 23 dBm stiprumo signalą. Iš lentelėje pateiktų duomenų matome, kad maksimalūs linijos nuostoliai abiem atvejais gali būti 164 dB, taip pat matome, kad optimaliam veikimui užtenka signalo ir interferencijos plius triukšmo santykio apie -13 dB gavėjo pusėje. Taigi riba, kuriai esant baigiasi bazinės stoties veikimo zona, bus pasiekta tuomet, kai gauto signalo ir interferencijos plius triukšmo santykis bus apie -13 dB ir bazinės stoties su prietaisu tarpusavio ryšys taps nestabilus arba neįmanomas.

Taigi norint supaprastinti techninį siaurajuosčio daiktų interneto technologijos įgyvendinimą stengiamasi kiek įmanoma daugiau išnaudoti turimus išteklius. Įgyvendinimui išnaudojami esami LTE dažniai arba nebenaudojami dažnių ruožai. Pasitelkti trys skirtingi duomenų perdavimo būdai: veikiant atskirai, šalia LTE dažnių ruožo arba jame. Smarkiai padidintas galimų prisijungimų prie vienos bazinės stoties skaičius. Išspręsta, kaip išvengti arba sumažinti galimų duomenų perdavimo interferenciją.

1.2. Siaurajuosčio daiktų interneto technologijos specialiosios funkcijos

Siaurajuosčio daiktų interneto technologijos prietaisai turi keletą funkcijų, kurios padeda įgyvendinti pagrindinius šios technologijos sukūrimo tikslus. Įterptinėje prietaisų sistemoje funkcijos dažniausiai gali būti pateiktos kaip konfigūruojami parametrai arba kaip nustatytos konstantos.

Viena iš funkcijų, kuri labiausiai prisideda prie to, kad baterija veiktų dešimt metų, yra energijos taupymo režimas. Daugelyje radijo ryšio technologijų galima išjungti radijo siųstuvo-

imtuvo grandinę, taip sutaupant didelę dalį naudojamos energijos, bet prireikus išsiųsti duomenis vėl reikia prisijungti prie gavėjo (šiuo atveju bazinės stoties). Kol ši procedūra yra atliekama retai, jai atlikti yra iššvaistoma mažai energijos, bet jei ši procedūra yra atliekama gana dažnai, pavyzdžiui, kas 5 ar kas 10 minučių, tuomet ilgu prietaiso naudojimo laikotarpiu iššvaistytas energijos kiekis sudaro nemažą suvartotos energijos dalį. NB-IoT atveju to daryti neprireiks. Kai prietaisas inicijuoja NB-IoT energijos taupymo režimą, jis aktyviai bazinei stočiai išsiunčia sukonfigūruotą laiko tarpą, kokiu periodu prietaisas įjungs radijo siųstuvą-imtuvą duomenims siųsti. Tuomet visą tą nustatytą laiką bazinė stotis yra rezervavusi ryšio kanalą tam prietaisui ir norint jam išsiųsti duomenis nebereikia vėl prisijungti prie tinklo (GSMA, 2017). Tačiau išlieka tas pats minusas kaip ir kitose technologijose, kad tuo metu, kai yra išjungtas siųstuvas-imtuvas, prietaisas yra nepasiekiamas jokiu radijo ryšiu. Šis režimas gali būti nereikalingas tam tikro tipo gaminiuose, kurie privalo visada turėti ryšį su tinklu. Verta paminėti, kad jei nėra svarbu gauti duomenis realiuoju laiku, tuomet, pagal rekomendacijas, kiekvienas tinklo operatorius turėtų saugoti bent 100 baitų paskutinių siųstų duomenų, kol nėra galimybės susisiekti su prietaisu.

Kita funkcija – prailgintas nepastovus gavimas. Panaši funkcija yra galima ir LTE technologiją palaikančiuose prietaisuose, tik NB-IoT technologijoje ši funkcija yra patobulinta atsižvelgiant į tai, kokiems tikslams ji gali būti naudojama. LTE technologiją palaikančiuose prietaisuose ši funkcija yra vadinama tiesiog nepastoviu gavimu. Nepastovaus gavimo funkcija yra labai plačiai naudojama išmaniuosiuose telefonuose tam, kad būtų pailgintas baterijos gyvavimo laikas iki kito krovimo. Naudojant šią funkciją išmaniuosiuose telefonuose, kol prietaiso savininkas nesinaudoja tinklu, dalį sekundės yra išjungiama prietaiso imtuvo grandinė ir po to vėl įjungiama. Šis procesas yra kartojamas tol, kol tinklas nepradedamas naudoti nuolat (skambučio, internetinių duomenų naudojimas). Žmogus, naudodamasis išmaniuoju telefonu, nepastebi tokio dalyko, nes jam sekundę pavėlavusi gauta žinutė ar įeinantis skambutis neturi jokios įtakos. Siaurajuosčio daiktų interneto technologijos atveju nepastovaus gavimo periodas yra pailgintas ir gali būti konfigūruojamas nuo 20,48 iki 10485,76 sekundžių (GSMA, 2017). Prietaisui, veikiančiam siaurajuosčio daiktų interneto tinkle, dvidešimt sekundžių pavėluota SMS žinutė ar pavėluotai gauti duomenys gali būti mažas laikas, o gaunamas energijos sutaupymo skirtumas – ryškus.

NB-IoT palaiko daug kitų funkcijų, tokių kaip SMS, bazinės stoties pakeitimas, išplatintas ryšio padengimo plotas ir trys skirtingos galios klasės. SMS yra vienas iš būdų, kaip „prižadinti“ siaurajuosčio daiktų interneto technologiją palaikantį prietaisą, taip pat ir pats prietaisas gali išsiųsti SMS pranešimus į kitus mobilųjį ryšį palaikančius prietaisus, pranešdamas apie tam tikrus įvykius. Bazinės stoties pakeitimas realizuotas taip, kad bazinė stotis gali perduoti prijungtą prietaisą kitai bazinei stočiai, esančiai to prietaiso ryšio zonoje, be jokių papildomų prisijungimo užklausų. Taip

pat viena užduočių, kuriant NB-IoT technologiją, buvo sukurti kiek įmanoma platesnį ryšio padengimą įskaitant ir vietas, kur paprastai radijo ryšys veikia labai prastai, pavyzdžiui, požemines automobilių stovėjimo aikšteles. Ryšio padengimo išplėtimo funkcija leidžia reguliuoti signalo galią ir kartu tą patį signalą siunčia kelis kartus, taip užtikrindama, kad bent vieną kartą signalas pasieks bazinę stotį nepažeistas. Aišku, tokia funkcija suvartoja papildomą kiekį energijos, bet bazinės stotys yra maitinamos nenutrūkstamu energijos šaltinio, todėl tai jokios įtakos nedaro. Tam, kad būtų sumažintas modulių energijos suvartojimas, yra realizuotos trys skirtingos galios klasės: tradicinė LTE 23 dBm, kita mažiau energijos reikalaujanti 20 dBm ir trečia, taupiausia energijos atžvilgiu, 14 dBm (GSMA, 2017).

1.3. Trumpas skyriaus apibendrinimas

Siaurajuosčio daiktų interneto technologija yra sukurta LTE ryšio pagrindu. Technologija įgyvendinta taip, kad mobiliojo ryšio operatoriams reikėtų investuoti kuo mažiau lėšų. Realizuoti trys skirtingi veikimo būdai, naudojant jau esamus dažnių ruožus. Tam, kad būtų išvengta duomenų interferencijos, naudojami 6 dB stipresni signalai lyginant su LTE signalo stiprumu.

Pagrindinis technologijos tikslas yra sukurti galimybę gamintojams suprojektuoti tokius prietaisus, kurie, palaikydami mobiliojo ryšio signalą, galėtų veikti iki dešimt metų, kol bus pakeista baterija. Pagrindinės funkcijos, leidžiančios pagerinti NB-IoT modulio energetinį efektyvumą, yra energijos taupymo režimas ir pailgintas nepastovus gavimas. Būtent naudojant šias funkcijas ir keičiant šių funkcijų parametrus bus atliekami pagrindiniai šio darbo tyrimai.

2.SIAURAJUOSČIO DAIKTŲ INTERNETO MODULIŲ PROTOTIPŲ PARUOŠIMAS EKSPERIMENTAMS

Šio tyrimo tikslas yra pamatuoti energetinį siaurajuosčio daiktų interneto technologiją palaikančių modulių efektyvumą. Tikslui pasiekti bandymų metu bus matuojamas modulio energijos suvartojimas įvairiais veikimo režimais ir konfigūracijomis. Tam, kad būtų parodytas šios technologijos pranašumas, bus atlikti analogiški tyrimai su moduliais, kurie palaiko kitas, senesnes technologijas, t. y. LTE ir GSM. Gauti rezultatai bus lyginami tarpusavyje. Norint palyginti skirtingas technologijas palaikančius modulius vienodomis sąlygoms, reikia užtikrinti, kad spausdintinės plokštės, ant kurių bus lituojami moduliai, modulių techninės konfigūracijos ir antenos būtų vienodos. Tą pasiekti galima projektuojant atskiras spausdintines plokštes kiekvienam moduliui išlaikant kuo labiau vienodus prieš tai išvardintus parametrus. Taip pat pasirinkti vienodo gamintojo moduliai, taip išlaikant dar didesnį testavimo sąlygų vienodumą.

2.1. Elektrinės principinės schemos

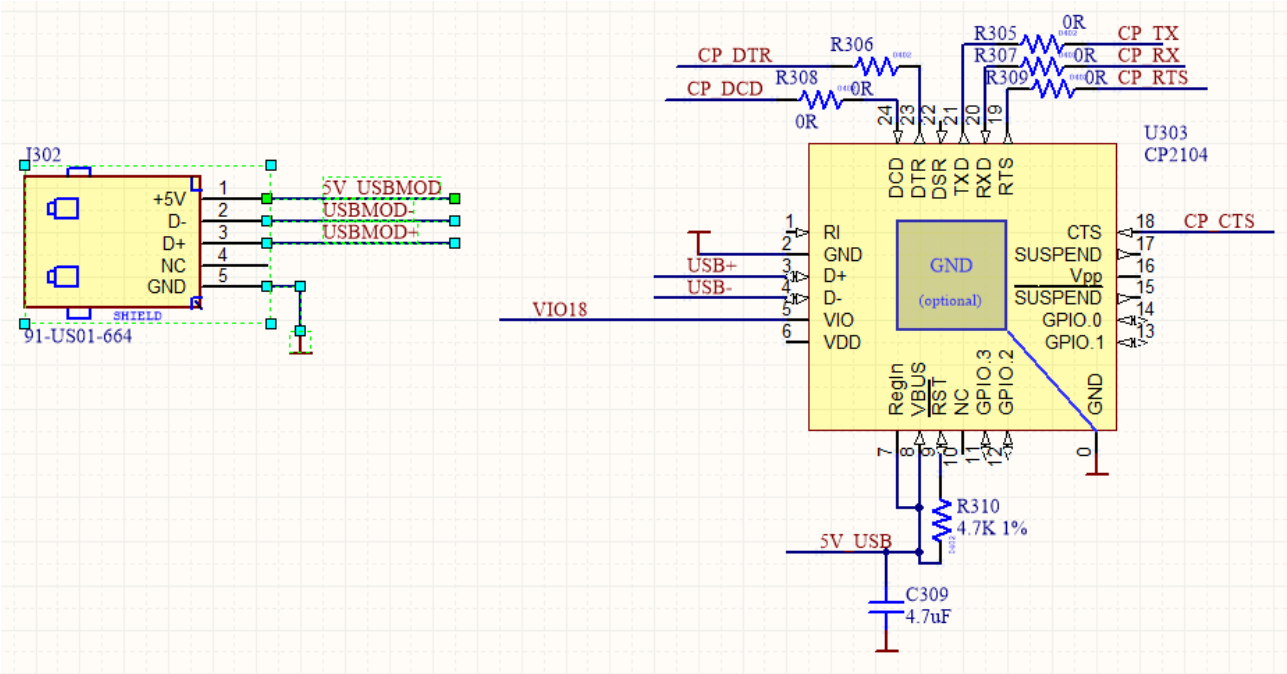
Projektuojamos spausdintinės plokštės bus sudarytos iš tokių sudėtinių dalių: maitinimo šaltinio linijos, USB periferijos, universalaus asinchroninio imtuvo-siųstuvo (UART), SIM modulio, radijo ryšio linijos ir antenos. Projektuojant GSM, LTE ir NB-IoT modulių testavimo plokštes atitinkamai pasirinkti SIM800, SIM7600 ir SIM7020E moduliai. 2.1 lentelėje pateikti pagrindiniai techniniai modulių duomenys.

2.1 lentelė. SIMCOM modulių maitinimo techniniai duomenys

Parametras	**SIM800 techniniai duomenys** (SIMCOM, 2015a)	**SIM7600 techniniai duomenys** (SIMCOM, 2018b)	**SIM7020 techniniai duomenys** (SIMCOM, 2018a)
Maitinimo įtampa	3,4–4,4 V	3,4–4,2 V	2,1–3,6 V
Energijos taupymas	Miego režimas – 1,2 mA	Miego režimas – mažiau nei 5 mA	Miego režimas – 236 uA; Energijos taupymo režimas – 3,4 uA
Maksimali išsiuntimo galia	33 dBm	23 dBm	LTE 23dBm

Projektuojant schemą pradedama projektuoti nuo pagrindinės modulio periferijos, t. y. maitinimo. Pagal modulių duomenų lapus maitinimo įtampa gali svyruoti nuo 2,1 V iki 4,2 V. Maksimali modulio suvartojama srovė trumpu laiko momentu gali siekti 2 A (SIMCOM, 2018a). Svarbu užtikrinti, kad veikimo metu įtampa nenukristų žemiau specifikacijoje nurodytos maitinimo įtampos. Didžiausi įtampos svyravimai, tikėtina, nutiks tuomet, kai modulis iš normalaus režimo,

kai vartojama mažai srovės, staiga pradės siųsti duomenis į serverį ir suvartojimas trumpu laiko momentu pakils iki maksimalaus. Įtampai stabilizuoti naudojami kondensatoriai. Modulio duomenų lape nurodoma, kad turint maitinimo šaltinį pajėgų atlaikyti nuolatinę 2 A srovės apkrovą užtenka 100 µF bendros kondensatorių talpos. Dėl saugumo pasirinkta naudoti tris 47 µF 16 V keraminius kondensatorius, kurių bendra talpa 141 µF. Dėl viršįtampio apsaugos naudotas 5,1 V zenerio diodas (ON Semiconductors, 2019). Pagal duomenų lapą, su tokio lygio maitinimo įtampa modulis neveiktų, bet ir nesudegtų. Papildomai maitinimo grandinėje panaudotas 3 A saugiklis, skirtas apsaugoti grandinei nuo trumpo jungimo sudaromų pasekmių.

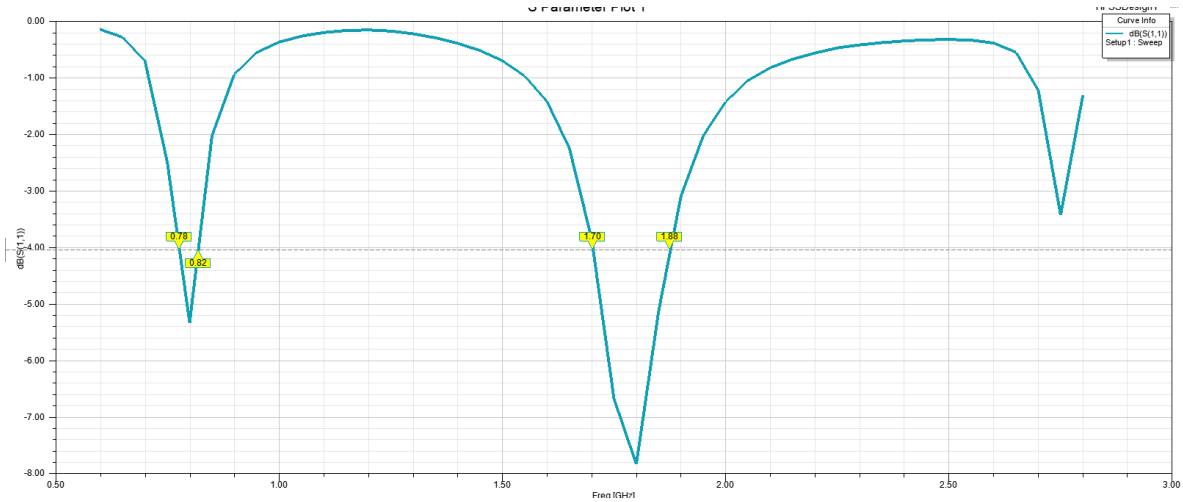


2.1 pav. USB – UART keitiklio schema

Pagrindinis būdas bendrauti ir valdyti modulius yra UART periferija. Su moduliu bendraujama naudojant AT komandas. UART yra prietaisas, verčiantis lygiagrečius duomenų bitus į nuoseklius duomenų bitus, dažniausiai naudojamas kontroliuoti prie kompiuterio prijungtus išorinius prietaisus (Nanda & Pattnaik, 2016). Tam, kad suprojektuotą plokštę būtų patogiau prijungti prie kompiuterio, bus naudojamas USB-UART keitiklis CP2104 (Silicon LABS, 2017). Šis keitiklis turi integruotą įtampos lygių reguliatorių, kuris leidžia paprastai gauti reikiamą įtampos lygį modulio UART periferijai realizuoti. 2.1 paveiksle pavaizduota keitiklio schema. Schemoje matoma, kad iš CP2104 keitiklio išvestos penkios UART periferijos linijos. Tam, kad vyktų bendravimas, nėra būtina naudoti visas penkias linijas, pakanka dviejų TxD (duomenims išsiųsti) ir RxD (duomenims gauti) linijų. Visos kitos linijos yra skirtos patikrinti, ar modulis gavo ir išsiuntė tam tikras komandas per UART periferiją.

2.2. Spausdintinių plokščių projektavimas

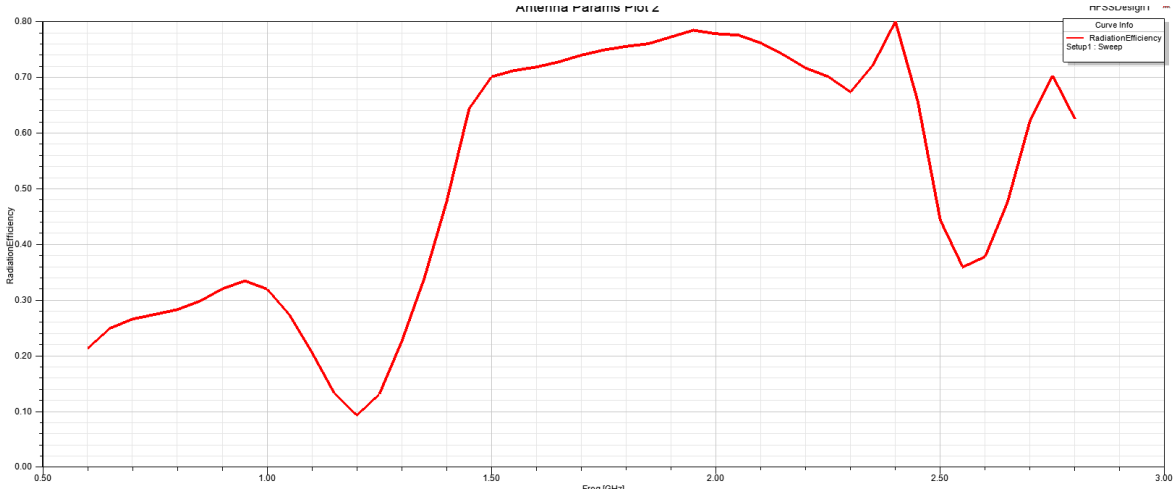
Planuojamos spausdintinės plokštės dydis yra 90 x 45 mm, storis 1 mm. Toks dydis pasirinktas dėl modulio antenos žemo dažnio juostos. Norint gauti efektyvią anteną žemuose perioduose, reikia turėti kiek įmanoma ilgesnę spausdintinę plokštę. Teoriškai visos antenos ilgis turi būti lygus pusei žemiausio dažnio bangos ilgiui, kad būtų įmanoma gauti efektyvią anteną (Lau, 2019).



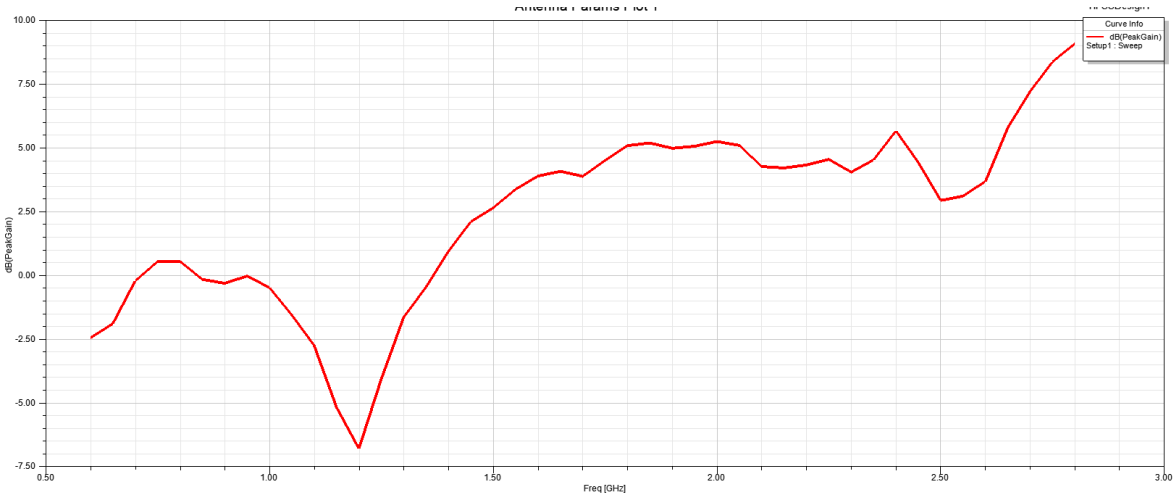
2.2 pav. S11 parametrų priklausomybės nuo dažnio grafikas decibelais

Maitinimo takelių storis 1,5 mm. Tokio storio takeliai gali atlaikyti nuolatinę 3A srovę. Maitinimo takelių storis ir pozicija bus išlaikyti vienodi tarp skirtingų modulių spausdintinių plokščių. USB takeliai turi būti trasuojami pagal diferencialinių takelių taisykles ir tarp USB duomenų takelių bus išlaikyta 90 Ω diferencialinė varža. Geriausia, kad jų nekirstų jokie signaliniai takeliai tam, kad būtų išvengta duomenų interferencijos. Radijo ryšio takelis turi būti ištrasuotas išlaikant 50 Ω banginę varžą. Antenai palikta 45 x 9 mm ploto.

Antena projektuojama ant spausdintinės plokštės iš vario takelių kartu panaudojant iš plieno išlankstytą komponentą. Antena pradedama projektuoti nuo žemojo Europos dažnių ruožo B20 (Frequency check, s.a.). Projektuojama nuo žemesnio dažnių ruožo, nes reikia ilgesnės antenos dedamosios, kad būtų galima išgauti didesnį efektyvumą šiame dažnių ruože. Gavus norimą antenos dažnį, toliau projektuojamos kitos aukšto dažnio dedamosios, B3 ir B7 dažnių juostoms. Antenai simuliuojamos trys parametrų priklausomybės: S11, antenos stiprinimas ir efektyvumas. S11 parametras parodo, kokią dalį modulio spinduliuojamos energijos į anteną yra atspindėta atgal, o likusi energijos dalis iš tiesų gauta antenoje (žr. 2.2 pav.). Antenos efektyvumas tiesiogiai nurodo, kiek procentų energijos antena gali priimti ar išspinduliuoti į aplinką (žr. 2.3 pav.). Antenos stiprinimas nurodo antenos efektyvumą tam tikra kryptimi. Kai kryptis nėra nurodyta, tai šis parametras parodo maksimalų antenos stiprumą tam tikra kryptimi (žr. 2.4 pav.).



2.3 pav. Antenos efektyvumo priklausomybės nuo dažnio grafikas

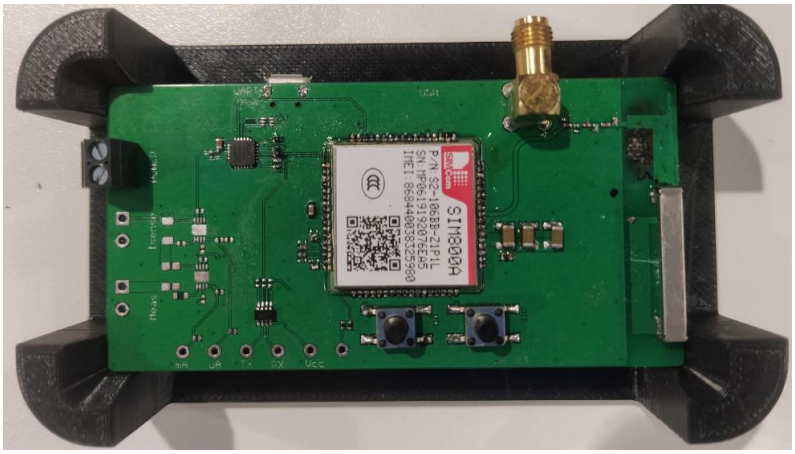


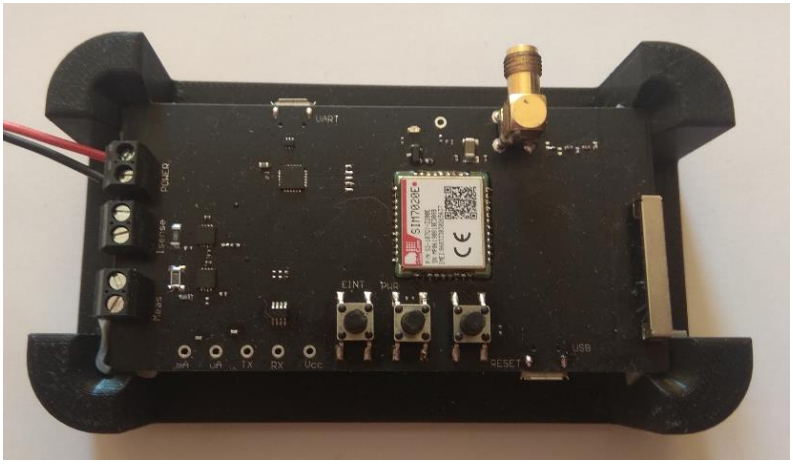
2.4 pav. Antenos stiprinimo priklausomybės nuo dažnio grafikas

Paruošus antenos dizainą galima projektuoti spausdintinės plokštės gamybinę dokumentaciją. Pirma reikia paruošti gamybinę paletę, kurios dydis 100 x 100 mm ir į kurią telpa dvi spausdintinės plokštės. Paruošus paletę generuojami gamybiniai „Gerber“ failai, kurie susideda iš vario sluoksnių, aikštelių atidengimo ir skylių gręžimo failų.

2.3. Pagamintų plokščių patikra

Po spausdintinės plokštės pagaminimo ir komponentų litavimo patikrintas visas plokštės funkcionalumas. Patikrintas modulių funkcionalumas, su moduliais bendrauta naudojantis CP2104 USB-UART konverteriu. Realios gaminių nuotraukos pavaizduotos 2.5 paveiksle.

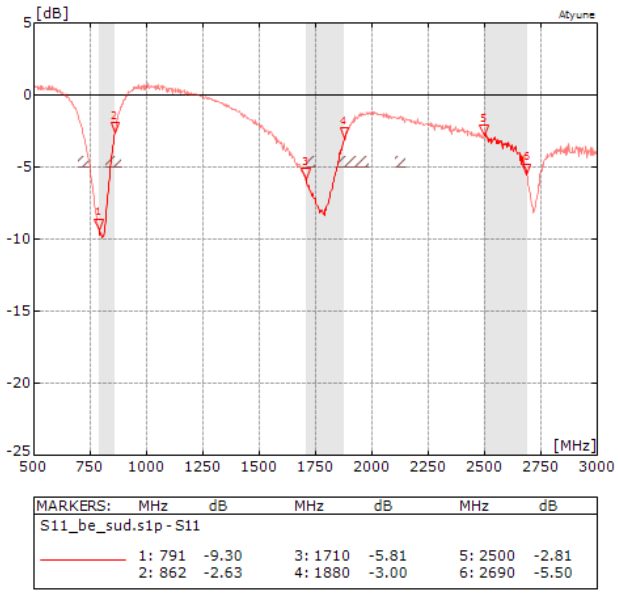




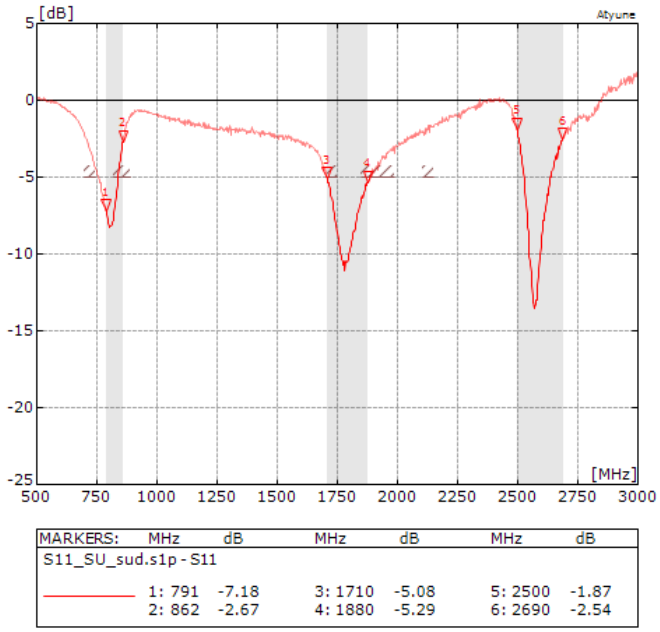
2.5 pav. Realių spausdintinių plokščių nuotraukos

Po to naudojant ZVL vektorinį grandinių analizatorių (Rohde & Schwarz, 2017) išmatuoti projektuotos antenos S11 parametrai, o rezultatai pavaizduoti 2.6 paveiksle. Gauti rezultatai beveik atitinka siektinus rezultatus LTE ir NB-IoT moduliams, bet galima naudoti antenos suderinimo grandinę tam, kad būtų pagerinti antenos S11 parametrai. Tam naudosime taisykles derindami perdavimo grandinių banginę varžą pagal Smito diagramą (Antenna theory, s.a.). Panaudojus

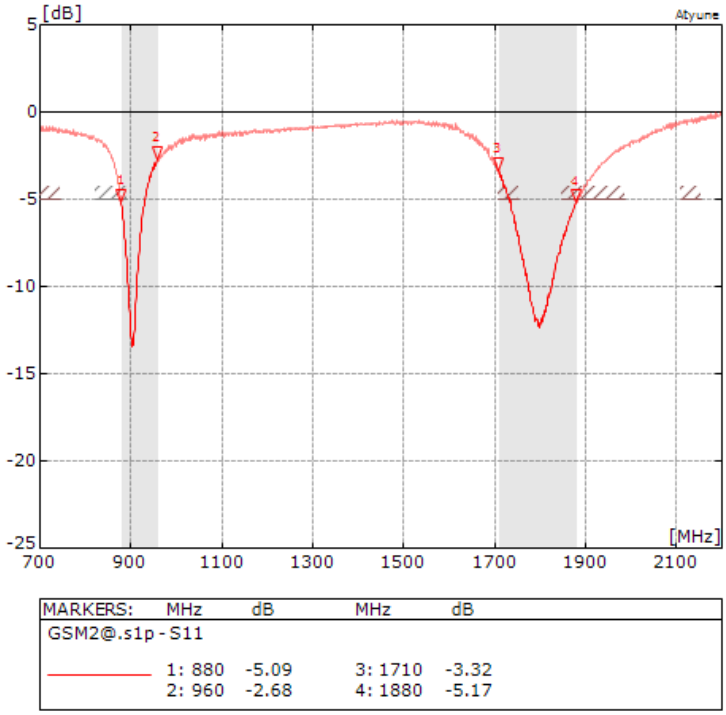
suderinimo grandinę gauti 2.7 paveiksle pavaizduoti antenos parametrai. 2.7 paveiksle pavaizduoti antenos S11 parametrai yra tinkami LTE ar NB-IoT technologijos dažnių juostoms Europoje, bet GSM technologijai žemų dažnių juosta netinkama. GSM technologija Europoje veikia dažnių ruožuose nuo 880 iki 960 MHz ir nuo 1710 iki 1880 MHz. Tam, kad anteną pritaikytume GSM technologijai, ją reikia pakeisti. Viena iš antenos dalių, kuri buvo atsakinga už žemus periodus, sutrumpinta ir taip gauta antena, kurios S11 parametrai pavaizduoti 2.8 paveiksle.



2.6 pav. Antenos S11 parametrai be suderinimo komponentų logaritminėje skalėje



2.7 pav. Antenos S11 parametrai su suderinimo komponentais logaritminėje skalėje



2.8 pav. GSM antenos S11 parametrai su suderinimo komponentais logaritminėje skalėje

2.4. Atliekamų matavimų scenarijai

Norint patikrinti technologijos energetinį efektyvumą, reikia išmatuoti modulių energijos suvartojimą veikiant prie skirtingų darbo režimų. Taigi moduliai bus matuojami veikiantys trijuose darbo režimuose: įprastu darbo režimu, nepastovaus gavimo būsenoje ir miego būsenoje. Tam, kad būtų įvertinta pagrindinė modulių paskirtis, kuri yra gauti ir siųsti duomenis, moduliui veikiant tam tikru režimu bus siunčiami duomenys į TCP tipo serverį. Norint įvertinti siuntimo dažnio įtaką modulio energiniam efektyvumui, bandymai bus atliekami skirtingais siuntimo periodais: kas 10 minučių, kas 30 minučių, kas valandą, kas 4 valandas. Taip pat bus atliekami matavimai, kiek daug energijos kiekviena iš technologijų suvartoja išsiunčiant 1 B duomenų. 2.2 lentelėje pateikti visi šiame tyrime planuojami matavimai. Lentelėje matoma, kad GSM technologija nebus testuojama nepastovaus gavimo režimu. Taip yra, nes GSM technologija nepalaiko šio režimo. Šis veikimo režimas buvo pristatytas ir atsirado kartu su LTE technologija, todėl visos senesnės mobiliojo ryšio technologijos jo nepalaiko (Dahlman et al., 2016).

2.2 lentelė. Atliekamų matavimų scenarijai

	Siuntimo dažnis	GSM	LTE	NB-IoT
Įprastas režimas	10 min.	+	+	+
	30 min.	+	+	+
	1 val.	+	+	+
	4 val.	+	+	+
Nepastovaus gavimo režimas	10 min.	-	+	+
	30 min.	-	+	+
	1 val.	-	+	+
	4 val.	-	+	+
Miego režimas	10 min.	+	+	+
	30 min.	+	+	+
	1 val.	+	+	+
	4 val.	+	+	+
Energijos suvartojimas 1B išsiųsti	-	+	+	+

2.5. Bandymų įrangos pasirinkimas

Energetinio modulio efektyvumo tiesiogiai išmatuoti negalima. Norint išmatuoti energetinį efektyvumą, reikia matuoti modulio vidutinę suvartojamą srovę veikiant tam tikrai įtampai. Suvartota energija yra gaunama atliekant sandaugos operaciją tarp maitinimo įtampos ir suvartotos srovės rodmenų. Norint gauti tikslius matavimų rezultatus, reikia naudoti profesionalų maitinimo šaltinį, kurį naudojant kompiuteryje būtų galima išsaugoti visą informaciją, reikalingą apskaičiuoti modulio suvartojamai energijai.

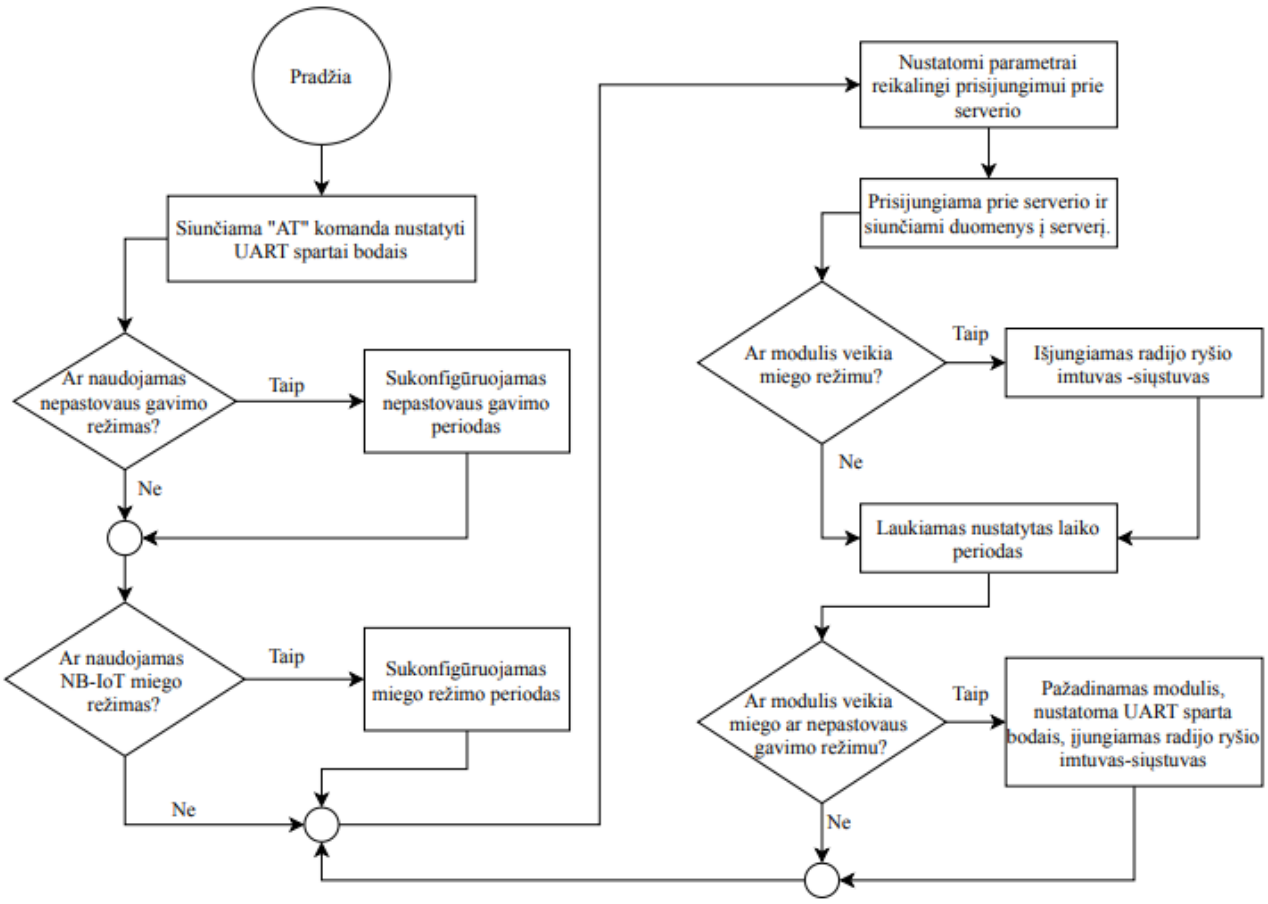
Prieš parenkant maitinimo šaltinį, reikia nustatyti, kokio tikslumo maitinimo šaltinio reikia. Tam reikia išsiaiškinti galimas minimalias ir maksimalias modulių suvartojamas sroves. GSM modulio minimalūs ir maksimalūs srovės suvartojimo rėžiai yra nuo 1 mA iki 2 A (SIMCOM, 2015a). LTE modulio minimalūs ir maksimalūs srovės suvartojimo rėžiai yra nuo 2 mA iki 670 mA (SIMCOM, 2018b). NB-IoT modulio minimalūs ir maksimalūs srovės suvartojimo rėžiai yra nuo 3,4 µA iki 134 mA (SIMCOM, 2018a). Taigi reikalingas maitinimo šaltinis, kuris galėtų atlaikyti 2 A srovę ir taip pat tiksliai matuoti tokią mažą srovę kaip 3,4 µA.

Šiuos reikalavimus atitinka *Rohde&Schwarz NGMO2* maitinimo šaltinis. Tokio šaltinio maksimali maitinimo įtampa 15 V, maksimali maitinimo srovė 2,5 A. Suvartojamos srovės parodymų tikslumas siekia 0,1 µA (Rohde & Schwarz, 2004a). Taip pat šis įrenginys, kaip ir

daugelis *Rohde&Schwarz* gaminių, turi galimybę būti valdomas nuotoliniu būdu naudojant IEEE komandas (Rohde & Schwarz, 2004b). Šias komandas galima siųsti arba naudojant RS485/232 arba IEEE488.2 jungtį. Atsižvelgdami į prieš tai pateiktus parametrus, galime teigti, kad šis prietaisas puikiai tinka modulių energetinių efektyvumų tyrimui atlikti.

2.6. Programų kodai, reikalingi bandymams atlikti

2.4. skyriuje minėtiems matavimų scenarijams įgyvendinti reikia paruošti būdą, kaip bus bendraujama su tiriamos technologijos moduliu. Su mobiliojo ryšio moduliais bendraujama naudojant AT komandas. Šios komandos moduliui gali būti siunčiamos naudojant UART arba USB sąsajas. Šiuo atveju bus naudojama UART sąsaja, nes USB sąsajos naudojimas ženkliai pakeistų modulių suvartojamą srovę.



2.9 pav. Supaprastintas modulių valdymo programos algoritmas

Tam, kad būtų įmanoma įgyvendinti tikslius matavimų scenarijus, komunikavimą su moduliais AT komandomis reikia automatizuoti. Tai gali atlikti programinė įranga *Terminal*. Ši programa prisijungia prie bet kokio nuoseklaus bendravimo prievado (angl. *serial port*) ir siunčia jam užduotas komandas. Terminal automatizuojamo bendravimo su moduliu programinis kodas yra rašomas *Pascal* kalba.

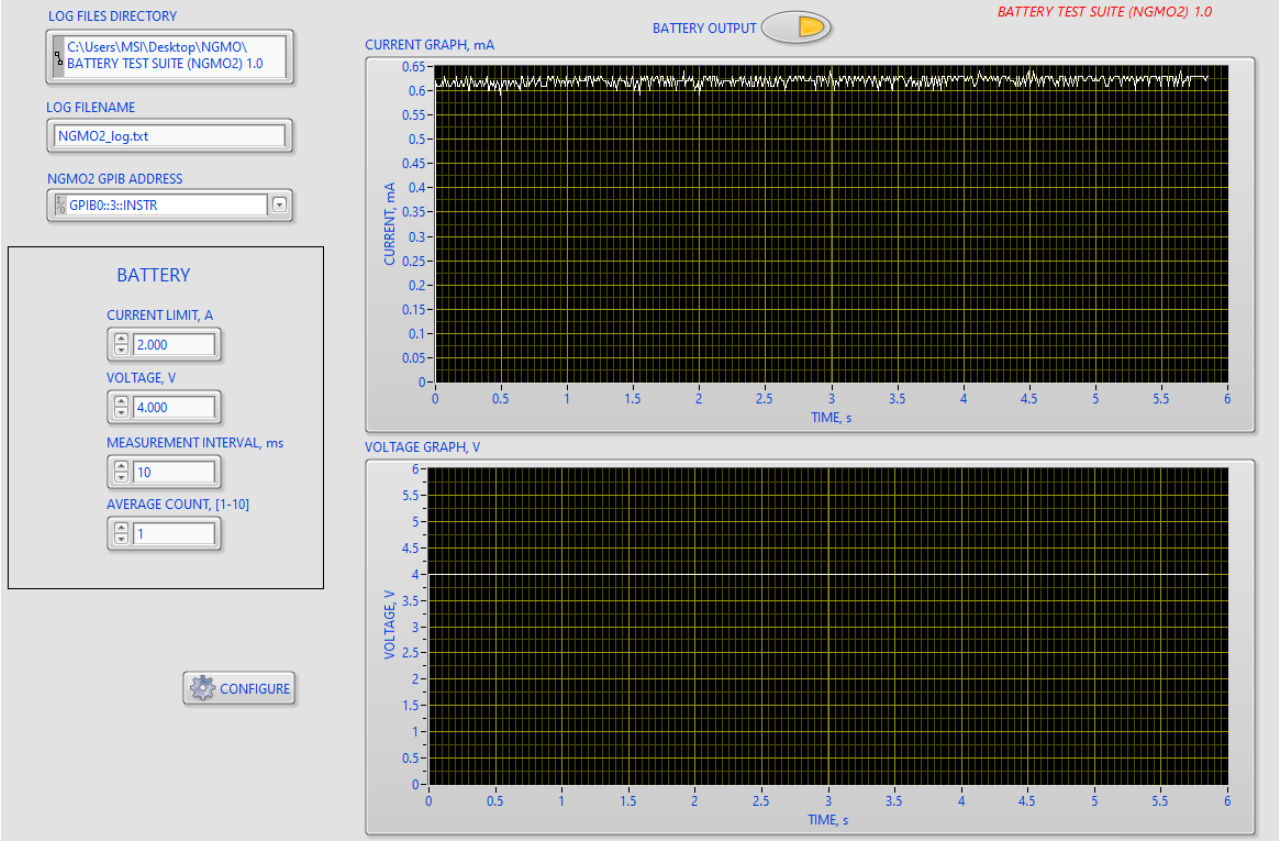
2.3 lentelė. Naudojamų komandų sąrašas bendraujant su moduliais (SIMCOM, 2015b, 2016, 2019a)

Komanda	Paskirtis
AT	Patikrinti, ar bendravimas su moduliu yra užmegztas
AT+CSCLK	Konfigūruoti miego režimą
AT+CFUN	Konfigūruoti modulio siųstuvo-imtuvo būseną
AT+CREG	Patikrinti modulio registracijos prie tinklo būseną ir konfigūruoti leidimą jungtis prie tinklo
AT+CGACT	Aktyvuoti duomenų perdavimo protokolą, kuris yra reikalingas duomenų siuntimui į serverį
AT+CIPSHUT	Nutraukti visus esamus ryšius su serveriais ir pašalinti savo IP adreso rezervaciją mobiliajame tinkle
AT+CGATT	Inicijuoti GPRS aktyvaciją su mobiliojo ryšio stotimi
AT+CSTT	Siųsti operatoriaus nustatymus prisijungti prie interneto tinklo
AT+CIICR	Prisijungti prie interneto tinklo
AT+CIPSTART	Prisijungti prie nurodyto serverio, kuriam bus siunčiami duomenys
AT+CIPSEND	Išsiųsti duomenis į serverį
AT+CIPCLOSE	Atsijungti nuo serverio
AT+CPSMS	Konfigūruoti NB-IoT energijos taupymo režimo nustatymus
AT+CEDRXS	Konfigūruoti NB-IoT prailginto nepastovaus gavimo nustatymus

Automatizuota programa pradės bendrauti su moduliu, inicializuodama pradines užklausas AT komandomis. Po to programa pateks į ciklą, kuriame, priklausomai nuo scenarijaus, tam tikrais laiko tarpais bus siunčiamos komandos pabusti iš miego režimo, prisijungti prie serverio, išsiųsti duomenis ir atsijungti nuo serverio. 2.3 lentelėje yra pateiktos visos AT komandos ir jų paskirtys. Paskutinės dvi komandos bus naudojamos bendraujant tik su NB-IoT technologiją palaikančiu moduliu. 2.1 programos kode pateiktas kodas, įgyvendinantis periodinius testavimo scenarijus. Kode matomos pakomentuotos eilutės, kurios yra naudojamos įgyvendinant tam tikrą scenarijų. Pavyzdžiui, trečioje eilutėje matomas komentaras *{edrx}* ir ši eilutė yra naudojama pailginto nepastovaus gavimo scenarijams įgyvendinti. Taip pat tame pačiame kode matomos funkcijos *comsendstr* ir *delay*, kurios atitinkamai yra skirtos komandoms išsiųsti naudojant nuoseklųjį bendravimo prievadą ir programos pertraukčiai atlikti. Paskutinė pertraukties komanda reguliuoja siuntimo į serverį periodą.

2.7. Programinė įranga matavimams atlikti

2.5 skyriuje buvo pasirinkta bandymams naudojama įranga – NGMO2 maitinimo šaltinis, kuriuo kompiuteryje bus kaupiami duomenys apie modulių suvartojamą energiją. Visgi paruoštos programinės įrangos duomenų kaupimui atmintyje pats gamintojas *Rohde&Schwarz* nesiūlo. Tokią programinę įrangą galima suprojektuoti naudojant *LabView* programinę įrangą.



2.10 pav. NGMO2 programinės įrangos vaizdas

Programinės įrangos tikslas yra sukonfigūruoti ir paleisti maitinimo šaltinį, o po to, kai jis paleistas, gauti informaciją apie suvartojamą srovę ir kaupti ją kompiuterio vidinėje atmintyje. Visa tai bus atlikta siunčiant IEEE komandas NGMO2 maitinimo šaltiniui naudojant *LabView VISA Serial* funkcijų grupę, kuri yra skirta būtent įgyvendinti bendravimui tarp kompiuterio ir testavimo ar matavimo įrenginių. (Wikipedia, 2020b) Programoje galima pasirinkti pavadinimą failo, kuriame bus saugomi duomenys, direktoriją, kur bus saugomas failas, ir prievadą, per kurį bus kreipiamasi į maitinimo šaltinį. Programinė įranga konfigūruos maitinimo įtampos, srovės, matavimų dažnio ir rezultatų vidurkio parametrus. Gautus rezultatus ji grafiko pavidalu pavaizduos programos lange ir taip pat juos išsaugos kompiuteryje. 2.10 paveiksle pavaizduotas šios programinės įrangos langas.

2.8. Trumpas skyriaus apibendrinimas

Šiame skyriuje aptarta, kaip ruoštasi eksperimentiniams tyrimams. Skirtingas technologijas palaikantiems moduliams buvo suprojektuotos beveik identiškos spausdintinės plokštės. Ant tos pačios spausdintinės plokštės buvo suprojektuota mobiliojo ryšio antena, taip išlaikant kiek įmanoma vienodesnes antenas skirtingų technologijų moduliams. Taip pat buvo suplanuoti matavimų scenarijai, kurie bus įgyvendinami tyrimų metu. Aptarta įranga, planuojama naudoti tyrimams, ir programinė matavimų įranga. Paruoštas programinis kodas, kuris kontroliuos modulių darbą tyrimų metu. Eksperimentiniams tyrimams pasiruošta ir galima juos atlikti.

3.SIAURAJUOSČIO DAIKTŲ INTERNETO MODULIŲ ENERGETINIAI EFEKTYVUMO TYRIMAI

3.1. Modulių energijos suvartojimas dirbant skirtingais režimais

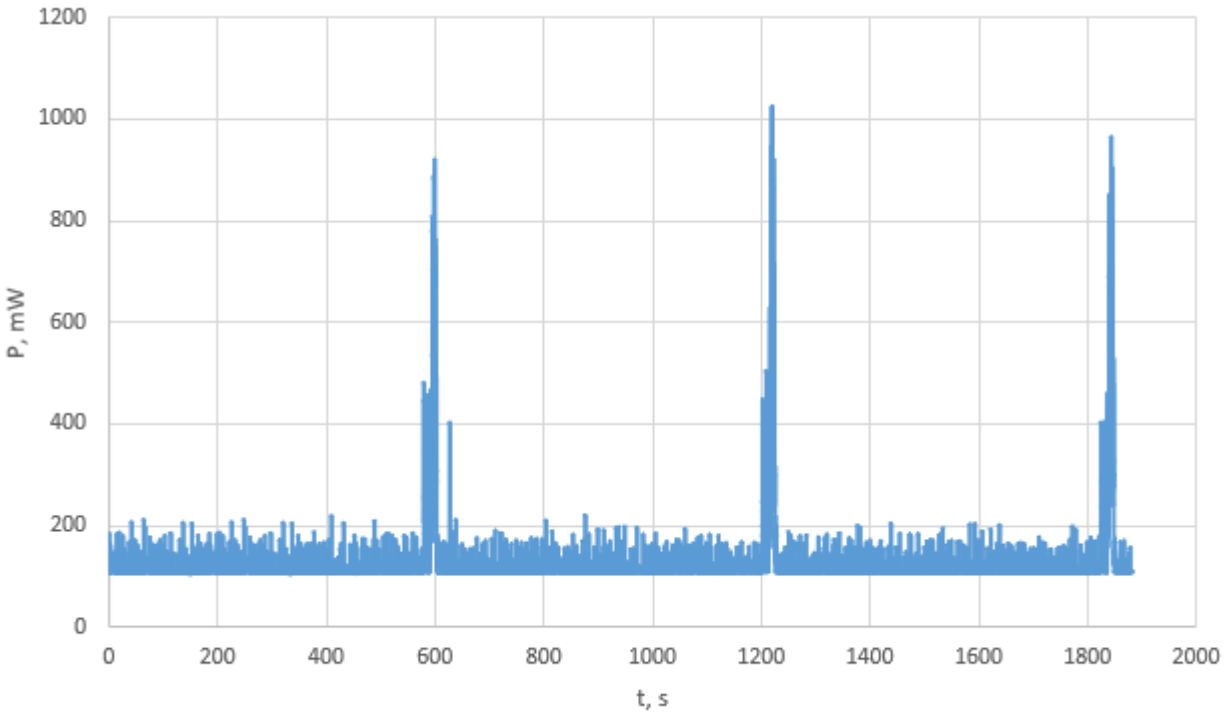
Labai dažnai nagrinėjant modulio energijos suvartojimą yra kalbama apie suvartojamą srovę. Tai nėra labai tikslus sprendimas. Gali būti tokių atvejų, kad vienas gaminys suvartoja mažiau srovės nei kitas, bet jei apskaičiuotume, kiek energijos kiekvienas iš jų suvartoja, tai gautume atvirkščią rezultatą. Taip yra todėl, kad sunaudota energija priklauso ne tik nuo srovės, bet ir nuo įtampos, kuriai pritaikytas gaminys. Pavyzdžiui, turime vieną gaminį, kuris veikdamas vidutiniškai suvartoja 5 mA srovės, ir turime antrą gaminį, kuris veikdamas vidutiniškai suvartoja 10 mA srovės. Atrodo, kad antras gaminys vartoja dvigubai daugiau energijos, bet jei patikslintume, kad pirmas gaminys veikia iš 12 V, o antras gaminys veikia iš 5 V įtampos šaltinio, paskaičiavę vidutinius energijos suvartojimus gauname, kad pirmas gaminys vidutiniškai suvartoja 60 mW, o antras gaminys 50 mW. Pavyzdys rodo, kad srovės suvartojimas negali nusakyti tikslaus gaminio energetinio efektyvumo. Todėl toliau visi modulių suvartojimai bus pateikti kaip energija. Kaip buvo minėta antrame skyriuje, matavimo prietaisas NGMO2 gali išmatuoti suvartotą srovę, o norint apskaičiuoti gaminio suvartotą energiją, bus naudojama 3.1 formulė, kur P reiškia energiją, I – srovę ir U – įtampą.

$$P = I \cdot U. \tag{3.1}$$

Toliau šiame darbe bus analizuojami modulių suvartojimai, dirbant skirtingais darbo režimais. Kiekvieno modulio darbo režimui analizuoti bus pateikiami tyrimo metu išmatuoti rezultatai. Kiekvienu modulio darbo režimu išbandomi 4 skirtingi duomenų siuntimo scenarijai: siunčiama kas dešimt minučių, kas pusvalandį, kas valandą ir kas 4 valandas. Atskirai bus aptarti tik grafikai, gauti iš tyrimų, atliekant duomenų siuntimą kas dešimt minučių. Kiekvieno darbo režimo ir matavimų scenarijaus gautų rezultatų vidurkiai bus pateikti lentelėse, aptarti ir palyginti tarpusavyje.

Matavimams atlikti naudojamas NGMO2 maitinimo šaltinis. Prieš pradedant matavimus reikia tinkamai sukonfigūruoti maitinimo šaltinį. Atliekant šiuos eksperimentus pasirinktas šimto milisekundžių reikšmių nuskaitymo periodas iš maitinimo šaltinio. Taip pat sukonfigūruota, kad kiekviena nuskaityta reikšmė yra dešimties matavimų vidurkis. Tai reiškia, kad kiekvienas gautas rezultatas yra maitinimo šaltinio vidiniame procesoriuje išmatuotų dešimties reikšmių vidurkis ir šiuo atveju maitinimo šaltinis iš tikro atlieka matavimus kas 10 milisekundžių. Taip pat sukonfigūruojamas automatinis matavimo rėžių pasikeitimas. Maitinimo šaltinis turi tris skirtingus matavimų rėžius: iki 5 mA, nuo 5 mA iki 500 mA ir nuo 500mA iki 2,5 A. Keisti matavimo rėžius

reikia tam, kad būtų padidintas matavimų tikslumas, kuris atitinkamai gali būti: 0,1 µA, 10 µA ir 200 µA. (Rohde & Schwarz, 2004a)



3.1 pav. GSM modulio energijos suvartojimo grafikas, veikiant įprastu režimu ir siunčiant duomenis į serverį dešimties minučių periodu

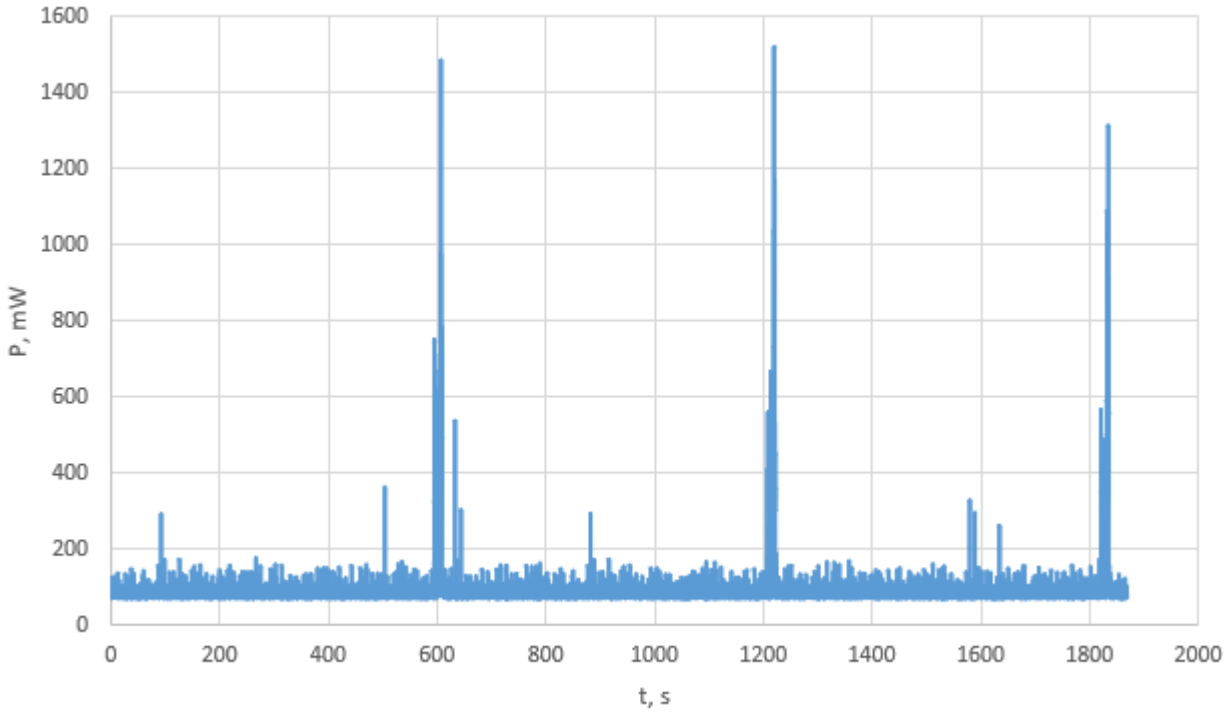
3.1 paveiksle pateiktas GSM modulio energijos suvartojimo grafikas, veikiant įprastu režimu ir siunčiant duomenis į serverį dešimties minučių periodu. Grafike aiškiai matoma, kada modulis veikia siuntimo į serverį ir kada laisvoje būsenoje. Matoma, kad laisvoje būsenoje modulis vidutiniškai suvartoja apie 100 mW. Kuo rečiau bus siunčiami duomenys į serverį, tuo labiau modulio bendras vidutinis suvartojimas turėtų artėti šios vertės link. Siuntimo į serverį būsenoje matoma, kad kol vyksta prisijungimas prie serverio, modulis suvartoja vidutiniškai iki 500 mW, o duomenų išsiuntimo momentu energijos suvartojimas gali siekti net iki 1 W energijos. 3.1 lentelėje pateikti vidutiniai energijos suvartojimai, GSM moduliui veikiant įprastu darbo režimu skirtingais siuntimo į serverį dažniais. Rezultatai tarpusavyje stipriai nesiskiria. Taip yra todėl, kad veikimo laisvoje būsenoje energijos suvartojimas nedaug kartų skiriasi nuo suvartojimo siuntimo būsenoje ir taip pat laikas laisvoje būsenoje, lyginant su laiku siuntimo į serverį būsenoje, yra daug ilgesnis.

Tirdami LTE modulio suvartojimą, veikiant įprastu darbo režimu, turėtume gauti panašią situaciją, kai nuo siuntimo dažnio nestipriai priklauso bendras energijos suvartojimas. 3.2 paveiksle pateiktas LTE modulio energijos suvartojimo grafikas, veikiant įprastu režimu ir siunčiant duomenis į serverį dešimties minučių periodu. Grafike matoma, kad modulio energijos suvartojimas

siuntimo būsenoje siekia 1,5 W, o tai yra 1,5 karto daugiau nei GSM modulio atveju. Žiūrint į veikimo laisvoje modulio būsenoje energijos suvartojimą matoma, kad vidurkis yra žemiau 100 mW, taigi bendras energijos suvartojimas taip pat bus mažesnis nei GSM modulio atveju. 3.2 lentelėje pateikti vidutiniai LTE modulio energijos suvartojimai, veikiant įprastu režimu. Iš rezultatų matoma, kad energijos suvartojimai visais siuntimo dažniais yra kiek daugiau nei 20 mW mažesni nei GSM modulio atveju. Taip pat, kaip ir buvo prognozuojama, energijos suvartojimai smarkiai nesiskiria, keičiant siuntimo į serverį dažnį.

3.1 lentelė. Vidutiniai GSM modulio energijos suvartojimai, veikiant įprastame režimu

Siuntimo periodas	10 minučių	30 minučių	1 valanda	4 valandos
Vidutinis energijos suvartojimas veikiant įprastu darbo režimu	115,8 mW	113 mW	112,4 mW	111 mW

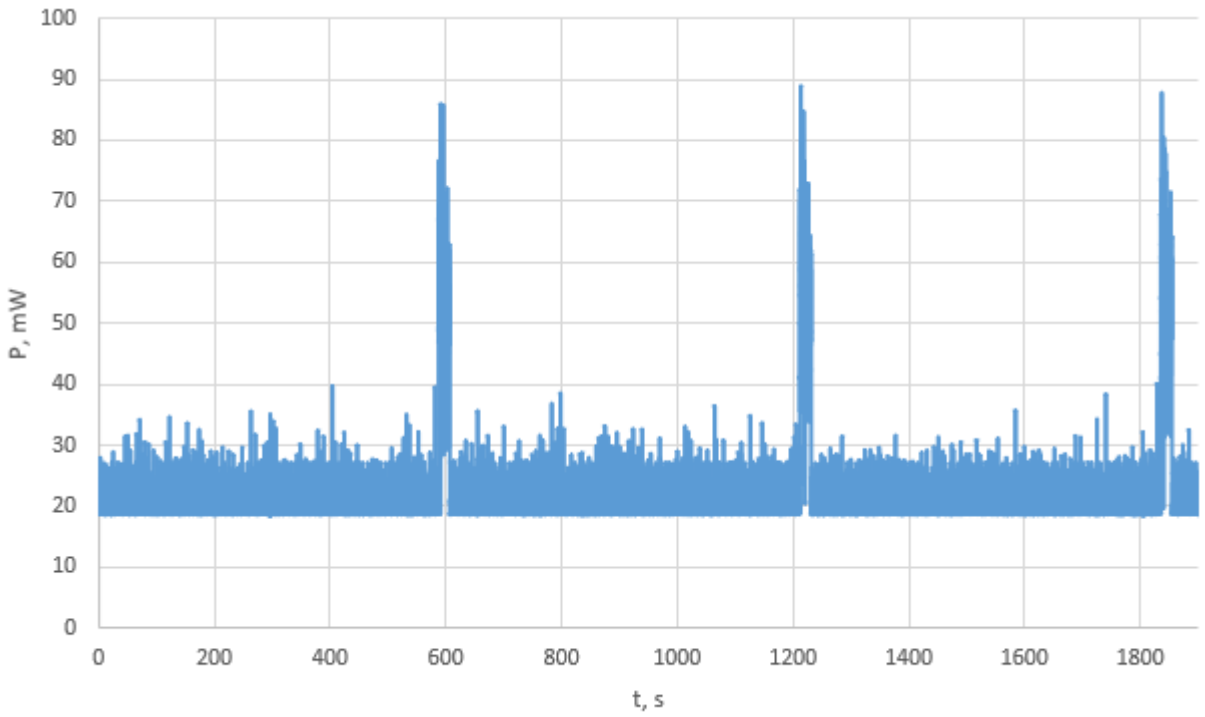


3.2 pav. LTE modulio energijos suvartojimo grafikas, veikiant įprastu režimu ir siunčiant duomenis į serverį dešimties minučių periodu

3.2 lentelė. Vidutiniai LTE modulio energijos suvartojimai, veikiant įprastame režimu

Siuntimo periodas	10 minučių	30 minučių	1 valanda	4 valandos
Vidutinis energijos suvartojimas veikiant įprastu darbo režimu	92 mW	90,1 mW	90 mW	88,9 mW

3.3 paveiksle pateiktas NB-IoT modulio energijos suvartojimo grafikas, veikiant įprastu režimu ir siunčiant duomenis į serverį dešimties minučių periodu. Šiame grafike galima įžvelgti daug efektyvesnį energijos suvartojimą. Modulis, veikiantis laisvoje būsenoje, suvartoja apie 25 mW, o siuntimo į serverį būsenoje energijos suvartojimas nesiekia net 100 mW. Tai yra atitinkamai apie 4 kartus ir nuo 10 iki 15 kartų mažesnis energijos suvartojimas. 3.3 lentelėje pateikti tyrimo rezultatai, moduliui veikiant įprastu režimu. Energijos suvartojimai taip pat nesmarkiai skiriasi keičiant siuntimo dažnį ir siekia apie 20 mW.

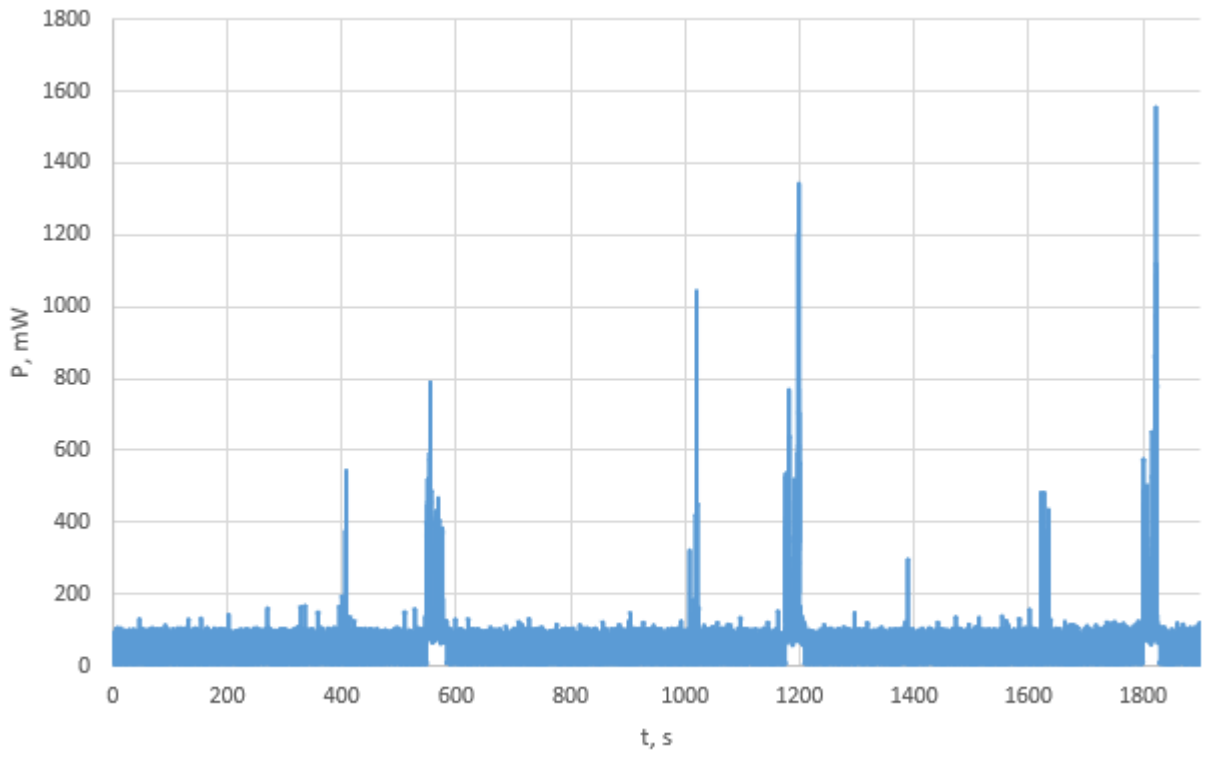


3.3 pav. NB-IoT modulio energijos suvartojimo grafikas, veikiant įprastu režimu ir siunčiant duomenis į serverį dešimties minučių periodu

3.3 lentelė. Vidutiniai NB-IoT modulio energijos suvartojimai, veikiant įprastame režimu

Siuntimo periodas	10 minučių	30 minučių	1 valanda	4 valandos
Vidutinis energijos suvartojimas veikiant įprastu darbo režimu	20,9 mW	20,2 mW	20,1 mW	19,9 mW

Toliau bus tiriamas energijos suvartojimas, moduliams veikiant nepastovaus gavimo režimu. Kaip buvo minėta antrajame skyriuje, GSM technologiją palaikantys moduliai nepalaiko šio režimo, todėl šioje dalyje bus tyrinėjami tik LTE ir NB-IoT technologijas palaikantys moduliai.

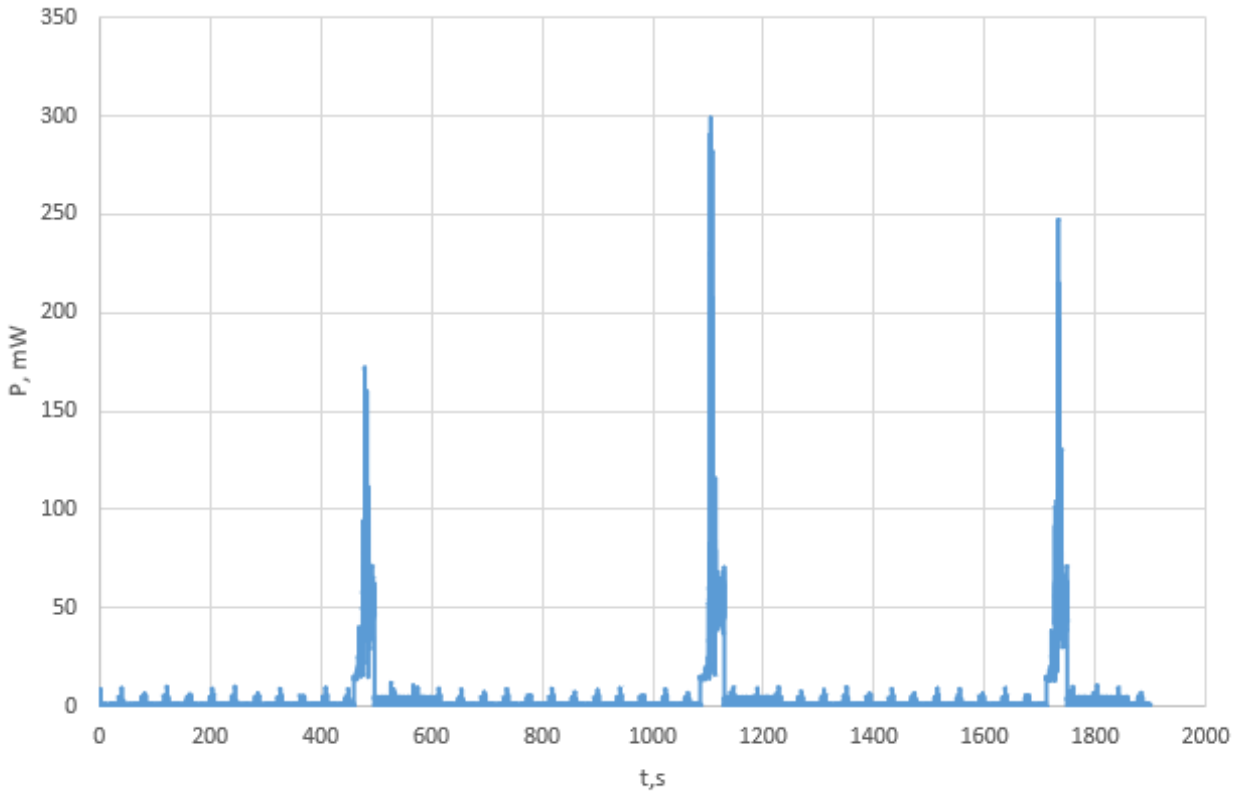


3.4 pav. LTE modulio energijos suvartojimo grafikas, veikiant nepastovaus gavimo režimu ir siunčiant duomenis į serverį dešimties minučių periodu

3.4 paveiksle pavaizduotas LTE modulio energijos suvartojimo grafikas, veikiant nepastovaus gavimo režimu. Lyginant 3.2 ir 3.4 paveiksluose pateiktus grafikus matoma, kad siuntimo būsenoje didelio skirtumo nėra, bet laisvoje būsenoje energijos suvartojimas svyruoja nuo beveik 2 mW iki 100 mW. Iš tiesų beveik visu laisvosios būsenos veikimo metu vidutinis energijos suvartojimas siekia apie 9 mW, bet kai yra įjungiamas modulio radijo ryšio siųstuvas-imtuvas, suvartojimas trumpam šokteli iki 100 mW. Tai pasikartoja kas 1.2 sekundės. 3.4 lentelėje pateikti LTE modulio vidutiniai energijos suvartojimai skirtingu periodu siunčiant duomenis į serverį. Energijos suvartojimas pasiekė beveik identišką rezultatą, lyginant su NB-IoT technologiją palaikančio modulio energijos suvartojimu, veikiant įprastu režimu. Tai reiškia, kad LTE modulio energetinis efektyvumas smarkiai prastesnis. Taip pat šiame režime jau yra pastebimas nedidelis skirtumas tarp energijos suvartojimų, veikiant skirtingais siuntimo dažniais.

3.4 lentelė. Vidutiniai LTE modulio energijos suvartojimai, veikiant nepastovaus gavimo režimu

Siuntimo periodas	10 minučių	30 minučių	1 valanda	4 valandos
Vidutinis energijos suvartojimas veikiant nepastovaus gavimo režimu	27 mW	22,2 mW	20,9 mW	19,6 mW



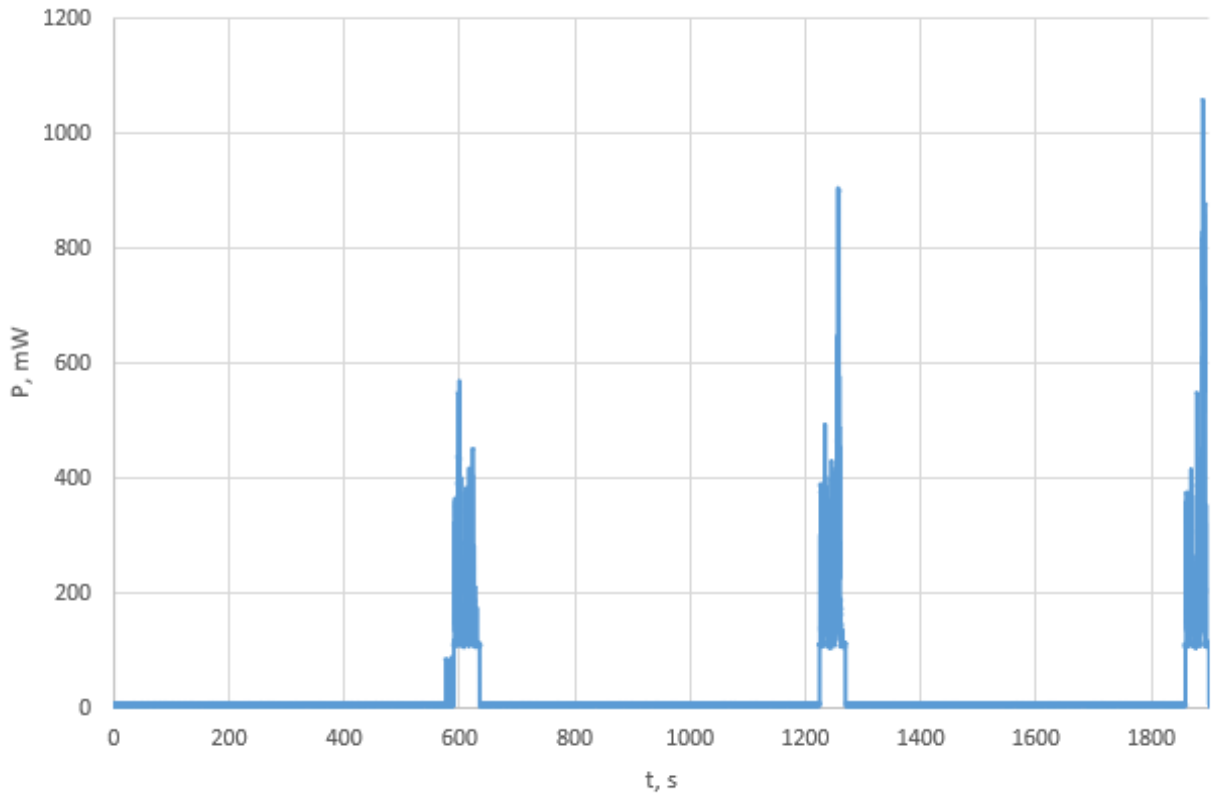
3.5 pav. NB-IoT modulio energijos suvartojimo grafikas, veikiant nepastovaus gavimo režimu ir siunčiant duomenis į serverį dešimties minučių periodu

NB-IoT modulio nepastovaus gavimo režimas nuo LTE modulio nepastovaus gavimo režimo skiriasi tuo, kad NB-IoT modulio atveju laiko tarpas, kurį bus išjungiamas radijo ryšio siųstuvas-imtuvas, yra laisvai konfigūruojamas vartotojo. Naudojant *AT+CEDRX* komandą laiko tarpą galima konfigūruoti nuo penkių sekundžių iki beveik trijų valandų (SIMCOM, 2019b). Reikia paminėti, kad mobiliojo operatoriaus bazinė stotis pasilieka teisę neleisti vartotojui sukonfigūruoti norimos reikšmės. Tyrimai šiuo atveju buvo atlikti naudojant 40 sekundžių laiką išjungto radijo ryšio siųstuvo-imtuvo. Buvo mėginta sukonfigūruoti 20 sekundžių, bet operatoriaus bazinė stotis atšaukdavo šią konfigūraciją. 3.5 paveiksle pavaizduotas NB-IoT modulio energijos suvartojimo grafikas, veikiant nepastovaus gavimo režimu ir siunčiant duomenis į serverį dešimties minučių periodu. Grafike aiškiai matosi 40 sekundžių laiko tarpas, po kurio yra įjungiamas radijo ryšio siųstuvas-imtuvas. Suvartojimas šiame režime beveik visą laiką artimas 0,51 mW. Pastebėta, kad, atliekant bandymus šiame režime, siuntimo į serverį būsenoje suvartojimas siekia beveik 300 mW, ko nė karto nebuvo pastebėta įprasto veikimo režimu, kuriame suvartojimas siuntimo būsenoje nė karto nesiekė 100 mW. 3.5 lentelėje pavaizduoti vidutiniai NB-IoT modulio energijos suvartojimai, veikiant nepastovaus gavimo režimu. Lentelėje matoma, kad energijos suvartojimas skirtingais siuntimo į serverį dažniais siekia nuo 0,66 mW iki 3,17 mW. Atsirado didelis energijos suvartojimo

skirtumas tarp scenarijų skirtingais siuntimo dažniais, pavyzdžiu, tarp siuntimo kas 10 minučių ir siuntimo kas 30 minučių energijos suvartojimai skiriasi 2 kartus. Toks energijos suvartojimų pokytis atsirado, nes yra labai didelis skirtumas tarp energijos suvartojimo siuntimo būsenoje ir laisvoje modulio būsenoje. NB-IoT modulio energijos suvartojimas šiame režime stipriai efektyvesnis už kitas technologijas palaikančius modulius.

3.5 lentelė. Vidutiniai NB-IoT modulio energijos suvartojimai, veikiant nepastovaus gavimo režimu

Siuntimo periodas	10 minučių	30 minučių	1 valanda	4 valandos
Vidutinis energijos suvartojimas veikiant nepastovaus gavimo režimu	3,17 mW	1,51 mW	0,99 mW	0,66 mW



3.6 pav. GSM modulio energijos suvartojimo grafikas, veikiant miego režimu ir siunčiant duomenis į serverį dešimties minučių periodu

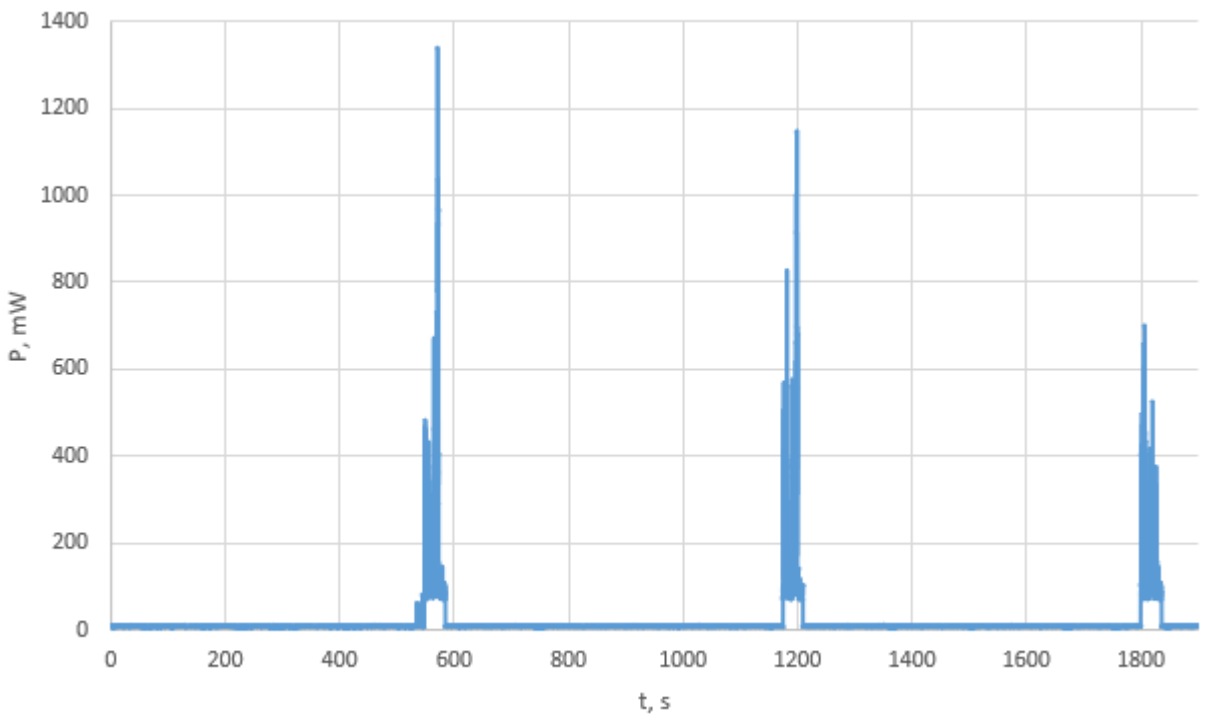
Veikiant miego režimu turėtų būti pasiekiami patys mažiausi energijos suvartojimai, kadangi miego režime yra išjungiamas radijo ryšio imtuvas-siųstuvas, SIM periferija, UART periferija ir kitos modulyje naudojamos periferijos. GSM ir LTE technologijas palaikančius modulius „pažadinti“ galima siunčiant bet kokią komandą per UART periferiją. Modulis tai supranta kaip

pertrauktį ir atsikelia iš miego būsenos, bet siųstos komandos per UART periferiją modulis interpretuoti nesugeba. Taip pat juos „pažadinti“ galima siunčiant žemo lygio loginį signalą į PWRKEY išvadą, tuomet modulyje įvyksta pertrauktis ir modulis atsikelia iš miego būsenos. NB-IoT technologiją palaikantys moduliai UART periferija negali būti pakelti iš miego režimo, nes miego režime visiškai visi loginiai modulio išvadai yra išjungti. Šios technologijos moduliai turi specialų vidinio laikrodžio pertraukties išvadą, kuriuo galima „pažadinti“ modulį iš miego būsenos. Taip pat prieš moduliui pereinant į miego režimą, NB-IoT technologijos moduliai sukonfigūruojami, kokį laiko tarpą modulis veiks miego režimu, ir po šio laiko modulis trumpam prisikelia iš miego režimo tam, kad būtų palaikomas ryšys su mobiliojo ryšio bazine stotimi. Tai leidžia moduliui, pabudusiam iš miego režimo, neatlikti registracijos prie tinko procedūros. LTE ir GSM technologijos moduliai po miego režimo privalo iš naujo prisiregistruoti prie mobiliojo ryšio tinklo.

3.6 paveiksle pavaizduotas GSM modulio energijos suvartojimo grafikas, moduliui veikiant miego režimu ir siunčiant duomenis į serverį dešimties minučių periodu. Grafike matoma, kad modulis miego būsenoje suvartoja apie 6 mW energijos. Energijos suvartojimas siuntimo būsenoje niekuo neišsiskiria nuo įprastu režimu gauto energijos suvartojimo. 3.6 lentelėje pateikti GSM modulio vidutiniai energijos suvartojimai, veikiant miego režimu ir siunčiant duomenis į serverį skirtingais siuntimo dažniais. Lentelėje matoma, kad pasiektas energijos suvartojimas nuo 19,6 mW iki 6,8 mW. Vėl matoma siuntimo dažnio daroma įtaka energijos suvartojimui, bet esant siuntimo periodui kas 4 valandas energijos suvartojimas priartėja prie 6mW, tai reiškia, jog toliau didinant siuntimo dažnį energijos suvartojimas labai nebesikeis. Toliau lygindami rezultatus su prieš tai buvusiais, matome, kad tai yra geriausias energijos suvartojimo rezultatas neskaitant NB-IoT modulio rezultatų, veikiant nepastovaus gavimo režimu.

3.6 lentelė. Vidutiniai GSM modulio energijos suvartojimai, veikiant miego režimu

Siuntimo periodas	**10 minučių**	**30 minučių**	**1 valanda**	**4 valandos**
Vidutinis energijos suvartojimas veikiant miego režimu	19,6 mW	11,1 mW	8,77 mW	6,8 mW

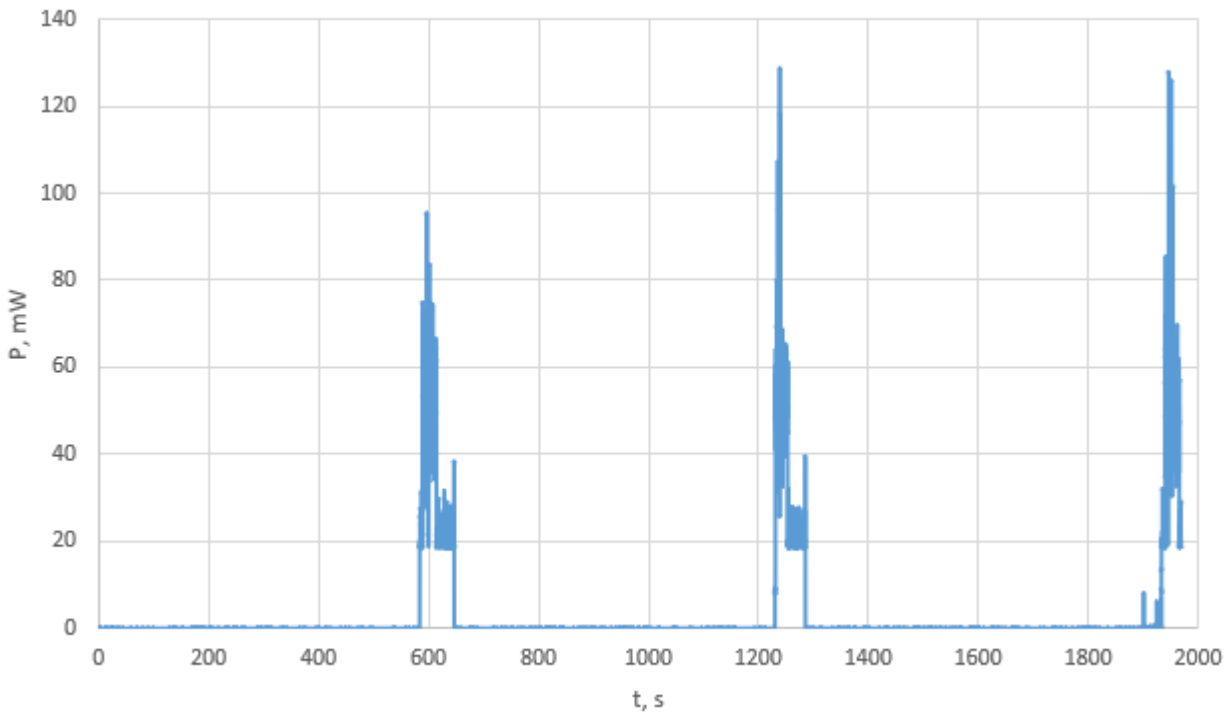


3.7 pav. LTE modulio energijos suvartojimo grafikas, veikiant miego režimu ir siunčiant duomenis į serverį dešimties minučių periodu

3.7 paveiksle pateiktas LTE modulio energijos suvartojimo grafikas., veikiant miego režimu ir siunčiant duomenis į serverį dešimties minučių periodu. Energijos suvartojimo grafikas beveik niekuo nesiskiria nuo GSM modulio suvartojimo grafiko. Modulis miego būsenoje suvartoja apie 8 mW energijos, taigi jau galima teigti, kad LTE modulio energijos suvartojimas miego režimu neaplenks GSM modulio energijos suvartojimo. 3.7 lentelėje pateikti vidutiniai LTE modulio energijos suvartojimai, veikiant miego režimu ir siunčiant duomenis į serverį skirtingu periodu. Siunčiant duomenis į serverį 10 minučių periodu pasiektas 17,1 mW energijos suvartojimas, kuris yra mažesnis už gautą energijos suvartojimą su GSM moduliu, nors miego būsenoje ir siuntimo būsenoje LTE modulis suvartoja daugiau energijos, bet LTE modulis greičiau išsiunčia duomenis, todėl bendras suvartojimas siunčiant dažniau yra mažesnis už suvartojimą su GSM moduliu. Mažinant siuntimo dažnį LTE modulio energijos suvartojimas tampa didesnis nei GSM modulio suvartojimas.

3.7 lentelė. Vidutiniai LTE modulio energijos suvartojimai, veikiant miego režimu

Siuntimo periodas	10 minučių	30 minučių	1 valanda	4 valandos
Vidutinis energijos suvartojimas veikiant miego režimu	17,1 mW	11,4 mW	10,1 mW	8,9 mW



3.8 pav. NB-IoT modulio energijos suvartojimo grafikas, veikiant miego režimu ir siunčiant duomenis į serverį dešimties minučių periodu

3.8 lentelė. Vidutiniai NB-IoT modulio energijos suvartojimai, veikiant miego režimu

Siuntimo periodas	10 minučių	30 minučių	1 valanda	4 valandos
Vidutinis energijos suvartojimas veikiant miego režimu	2,88 mW	1,18 mW	0.67 mW	0,34 mW

NB-IoT technologijos modulio miego režimo sukonfigūravimas skiriasi nuo kitų modulių tuo, kad reikia sukonfigūruoti, kiek laiko modulis veiks miego režimu. Tuomet modulis išsiunčia šią informaciją mobiliojo ryšio bazinei stočiai ir bazinė stotis arba patvirtina tokį laiko tarpą, arba nesutinka su tokiu miego laiku ir atsiunčia moduliui savo nustatytą konfigūracijos laiką. Tokiu atveju modulis užmigs tokiam laiko tarpui, kurį nustatys mobiliojo ryšio bazinė stotis. Šio tyrimo metu bazinė stotis neleido moduliui miegoti ilgiau nei vieną valandą, taigi siuntimo kas 4 valandas atveju modulis trumpam atsikelia kiekvieną valandą, bet siuntimas vyksta tik kas 4 valandas. 3.8 paveiksle pateiktas NB-IoT modulio energijos suvartojimo grafikas, veikiant miego režimu ir siunčiant duomenis į serverį dešimties minučių periodu. Matoma, kad miego būsenoje modulio suvartojimas yra 9 µW, tai yra labai mažas energijos suvartojimas, kuris lenkia daugiau nei 500 kartus kitų technologijų modulių energijos suvartojimus miego būsenoje. 3.8 lentelėje pateikti vidutiniai NB-IoT modulio energijos suvartojimai, veikiant miego režimu ir siunčiant duomenis į serverį skirtingu periodu. Iš lentelėje pateiktų duomenų matoma, kad pasirinkti siuntimo dažniai

daro didelę įtaką energijos suvartojimui. Pasirinkus siuntimo dažnį kas 10 minučių energijos suvartojimas išauga 2 kartus lyginant su energijos suvartojimu, gautu pasirinkus siuntimo dažnį kas 30 minučių, o lyginant su energijos suvartojimu, gautu pasirinkus siuntimo dažnį kas 4 valandas, energijos suvartojimas yra didesnis net 9 kartus.

3.9 lentelė. Vidutiniai LTE modulio energijos suvartojimai veikiant miego režimu

	Siuntimo dažnis	**GSM**	**LTE**	**NB-IoT**
Įprastas režimas	10 min.	115,8 mW	92 mW	20,9 mW
	30 min.	113 mW	90,1 mW	20,2 mW
	1 val.	112,4 mW	90 mW	20,1 mW
	4 val.	111 mW	88,9 mW	19,9 mW
Nepastovaus gavimo režimas	10 min.	-	27 mW	3,17 mW
	30 min.	-	22,2 mW	1,51 mW
	1 val.	-	20,9 mW	0,99 mW
	4 val.	-	19,6 mW	0,66 mW
Miego režimas	10 min.	19,6 mW	17,1 mW	2,88 mW
	30 min.	11,1 mW	11,4 mW	1,18 mW
	1 val.	8,77 mW	10,1 mW	0,67 mW
	4 val.	6,8 mW	8,9 mW	0,34 mW

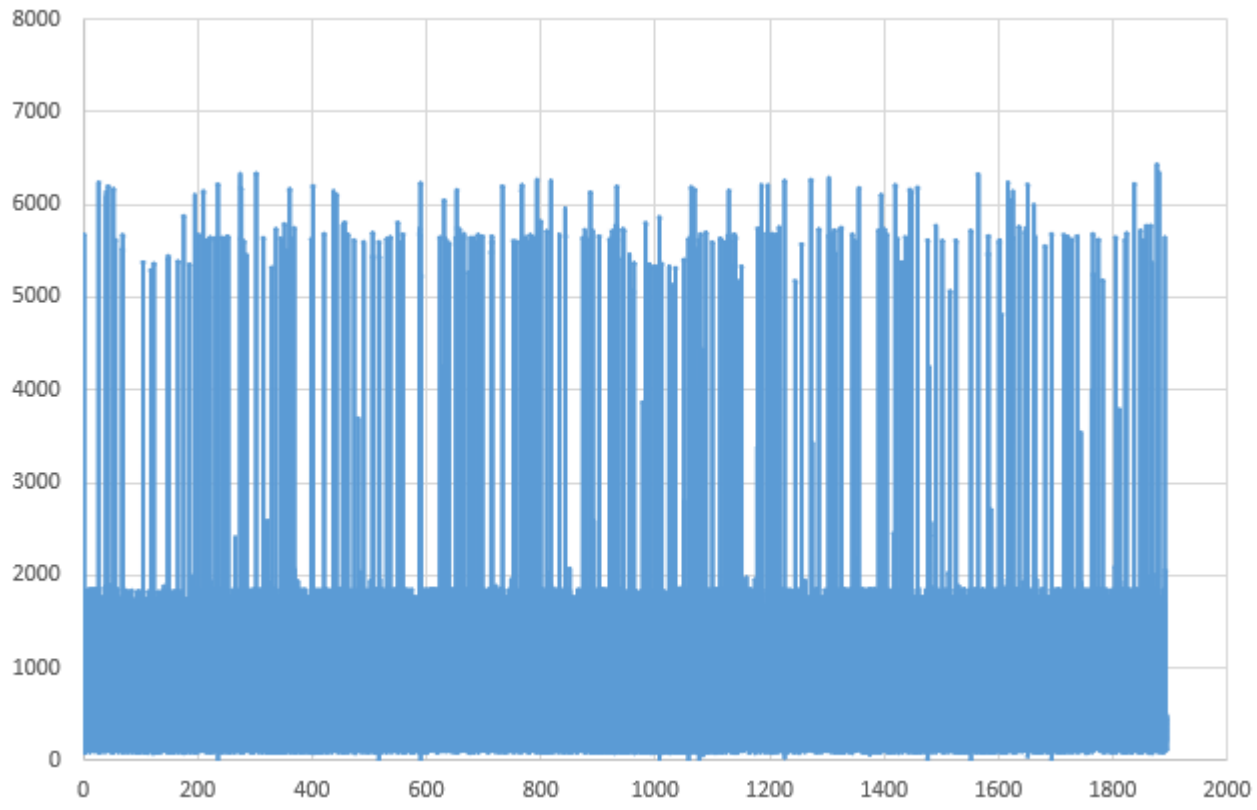
Atlikti visi tyrimų scenarijai, kurių metu gauti skirtingas technologijas palaikančių modulių vidutiniai energijos suvartojimai, veikiant skirtingais darbo režimais ir siunčiant duomenis į serverį skirtingu periodu. 3.9 lentelėje pateikti visų tyrimų scenarijų metu gauti rezultatai. Visais atvejais matoma, kad NB-IoT technologijos modulis yra efektyvesnis energijos suvartojimo atžvilgiu. NB-IoT modulio suvartojimas net keletą kartų lenkia kitų modulių suvartojimus. Net NB-IoT modulio energijos suvartojimas nepastovaus gavimo režimu, kurio metu modulis yra pasiekiamas mobiliuoju ryšiu, lenkia kitus modulius veikiant miego režimu, kurio metu jie yra nepasiekiami mobiliuoju ryšiu. Geriausias rezultatas gautas miego režime, siunčiant duomenis kas 4 valandas, tuo metu gautas vidutinis 0,34 mW energijos suvartojimas.

3.2. Skirtingų technologijų energetinis efektyvumas siunčiant duomenis

Ištyrus moduliu energetinius suvartojimus, veikiant įvairiais modulių darbo režimais, matoma, kad NB-IoT technologiją palaikantis modulis yra efektyvesnis visais darbo režimais. Tokį modulio efektyvumą labiausiai lemia energijos suvartojimas laisvoje modulio būsenoje ar miego būsenoje. Galima teigti, kad vienas iš pagrindinių tikslų, kuriant NB-IoT technologiją, pasiekti aukštą energetinį efektyvumą, yra įgyvendintas. Tai yra išspręsta įgyvendinus ypač efektyvius energijos

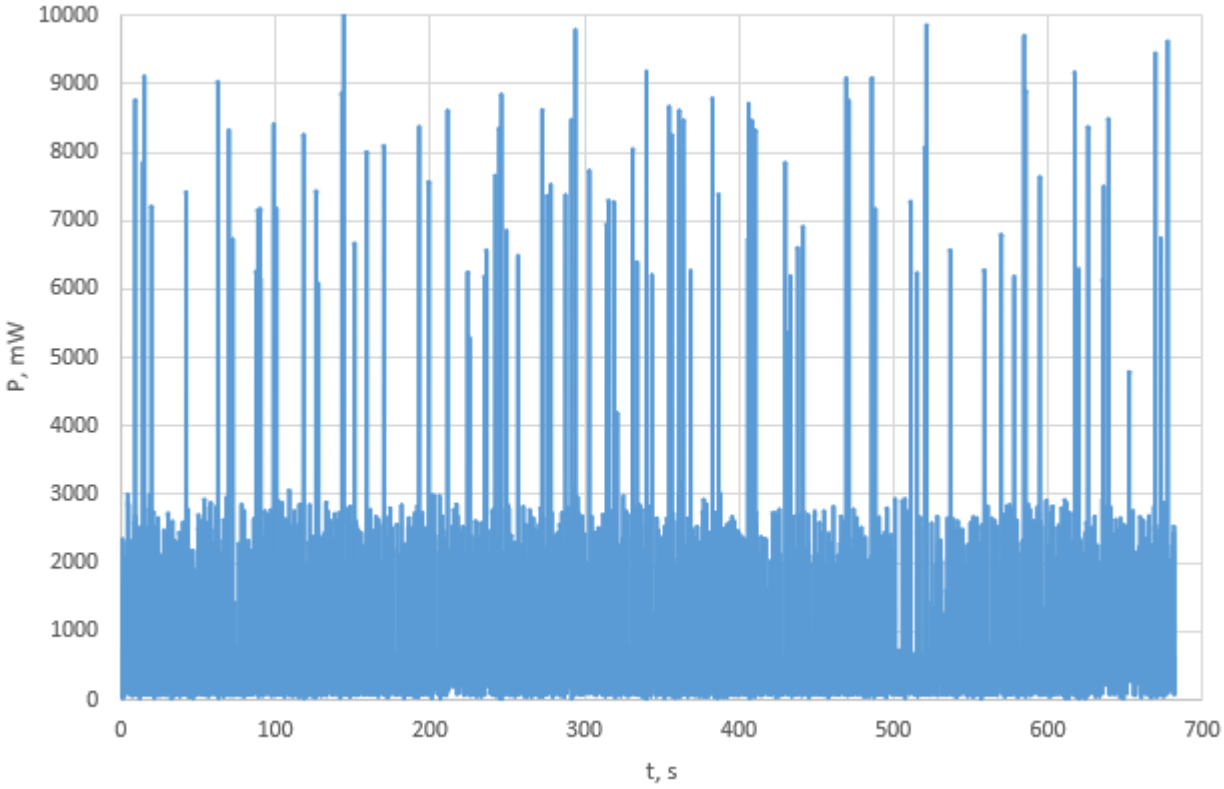
taupymo režimus, t. y. nepastovaus gavimo ir miego režimus. Tačiau, jei gaminys nuolat siųstų duomenis į serverį ir beveik niekada nebūtų laisvoje modulio būsenoje ar miego būsenoje, tada beveik visą energijos suvartojimą sudarytų energija, suvartota duomenų siuntimo į serverį būsenoje. Toliau bus ištirtas modulių energetinis efektyvumas būtent tokiu atveju – nuolat siunčiant duomenis į serverį.

Tyrimo metu bus siunčiami iš viso 0,5 MB duomenų į TCP tipo serverį. Siuntimui naudojamas tik vienas kanalas. Vieno siuntimo metu siunčiamas paketas užims 0,5 kB, dėl modulio ribojimų. 3.9 paveiksle pateiktas energijos suvartojimo grafikas šio tyrimo metu naudojant GSM technologiją palaikantį modulį. Grafike matome, kad momentinis energijos suvartojimas tam tikrais atvejais siekia 6 W. Viso tyrimo metu gautas 555 mW vidutinis suvartojimas, bet tai tiksliai nenusako siuntimo energetinio efektyvumo. Norint palyginti modulių energetinius suvartojimus, reikia apskaičiuoti, kiek energijos suvartojama išsiųsti vienam baitui informacijos. 3.10 lentelėje pateikti skaičiavimų rezultatai ir matoma, kad vienam baitui informacijos išsiųsti modulis vidutiniškai suvartojo 21 mW energijos.



3.9 pav. Energijos suvartojimo grafikas nuolatinio siuntimo į serverį metu, naudojant GSM technologijos modulį

3.9 paveiksle pateiktas energijos suvartojimo grafikas siuntimo į serverį metu naudojant LTE modulį. Tuo pačiu scenarijumi siunčiant duomenis į serverį tyrimas truko trumpiau, nes LTE modulis greičiau reagavo į komandas duomenų išsiuntimui ir taip pat greičiau atliko duomenų išsiuntimą į serverį. Momentinis energijos suvartojimas pasiekė net 10 W. Vidutinis energijos suvartojimas viso tyrimo metu yra 742 mW. Žiūrint į šiuos rezultatus atrodo, kad LTE modulis ne taip efektyviai siunčia duomenis į serverį, bet reikia prisiminti, kad pats tyrimas truko trumpiau. 3.10 lentelėje pateiktas LTE modulio energijos suvartojimo rezultatas vienam baitui išsiųsti, jis yra du kartus mažesnis nei gautas rezultatas atliekant tyrimą su GSM moduliu. Taip turbūt yra todėl, kad GSM modulis ilgiau siunčia duomenis ir ilgiau reaguoja į komandas, o per tą laiko tarpą yra suvartojama papildomai energijos, kuri šiuo atveju gali būti laikoma papildomu energijos nuostoliu.

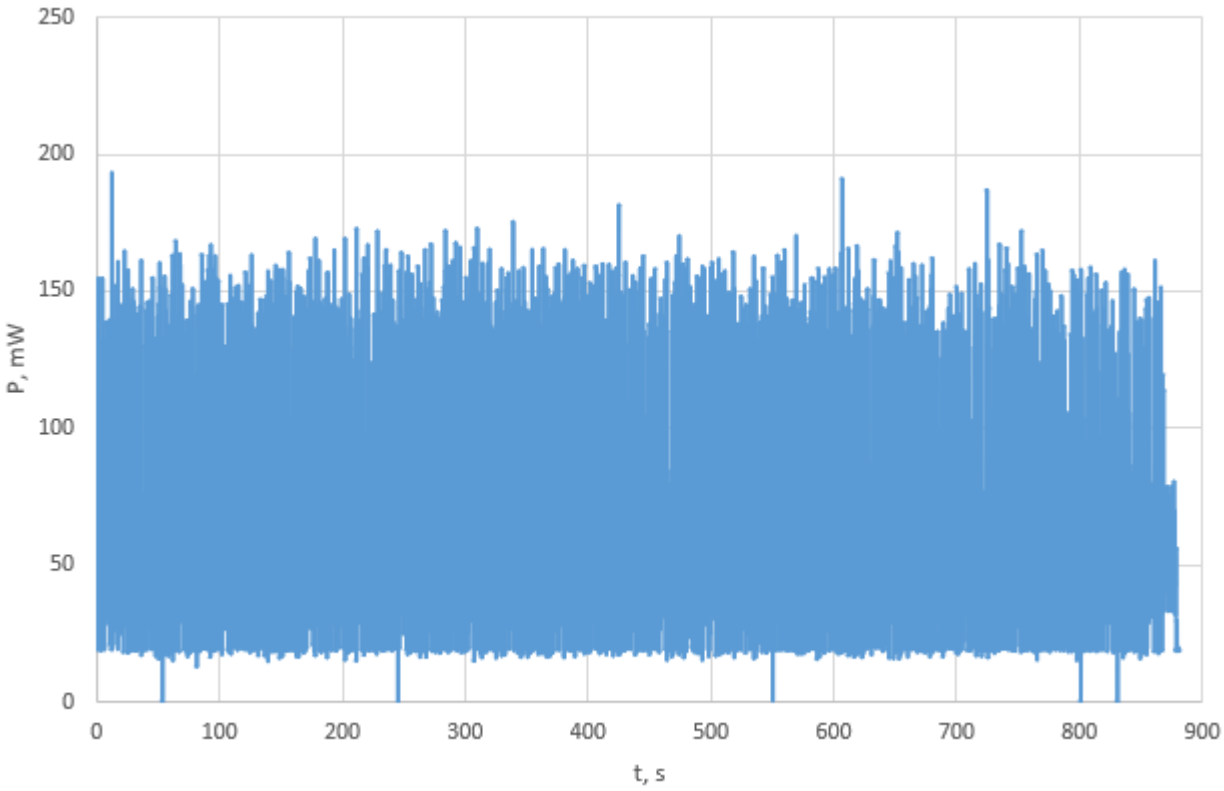


3.10 pav. Energijos suvartojimo grafikas nuolatinio siuntimo į serverį metu, naudojant LTE technologijos modulį

3.11 paveiksle pateiktas energijos suvartojimo grafikas, siuntimo į serverį metu naudojantis NB-IoT technologijos modulį. Grafike aiškiai galima pastebėti, kad šios technologijos modulis bus smarkiai efektyvesnis siunčiant duomenis į serverį. Energijos suvartojimas niekada neviršija 200 mW energijos. Vidutinis energijos suvartojamas siekia 61,7 mW, o vidutinis energijos suvartojimas 1 B duomenų išsiųsti yra 1,1 mW.

3.10 lentelė. Modulių suvartojama energija vienam baitui informacijos išsiųsti

Mobiliojo ryšio technologija	GSM	LTE	NB-IoT
Suvartotas energijos kiekis 1 B duomenų išsiųsti	21 mW	10,1 mW	1,1 mW



3.11 pav. Energijos suvartojimo grafikas nuolatinio siuntimo į serverį metu, naudojant NB-IoT technologijos modulį

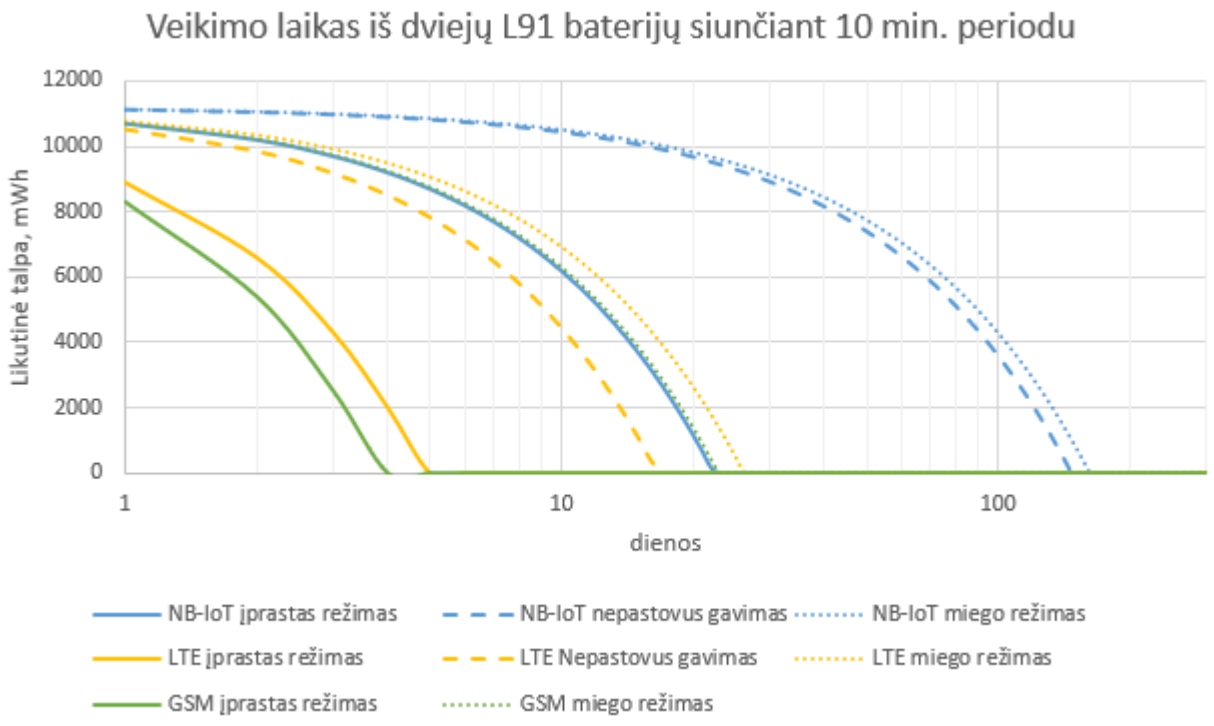
Taigi iš rezultatų matome, kad siaurajuosčio daiktų interneto technologiją palaikantis modulis stipriai efektyvesnis siunčiant duomenis į serverį. Siaurajuosčio daiktų interneto technologiją palaikantis modulis energijos suvartojimo atžvilgiu net 20 kartų lenkė GSM technologiją palaikantį modulį ir net 10 kartų lenkė LTE technologiją palaikantį modulį.

3.3. Technologijos panaudojimo galimybės

Atliktuose tyrimuose buvo gauti vidutiniai energijos suvartojimai skirtinguose veikimo režimuose ir skirtingais scenarijais. Turint šiuos rezultatus galima toliau ištirti būdus, kaip galima būtų panaudoti šią naująją technologiją. Taip pat galima aptarti GSM ir LTE technologijų panaudojimo galimybes vienodose situacijose. Pagrindiniai tyrinėjimo aspektai yra veikimo laikas naudojant baterijos energiją, suderinamumas su įvairiais daiktų internete naudojamais sensoriais ir galimas programinis tokių prietaisų įgyvendinimas.

3.11 lentelė. Modulių veikimo laikai naudojant L91 baterijų energiją

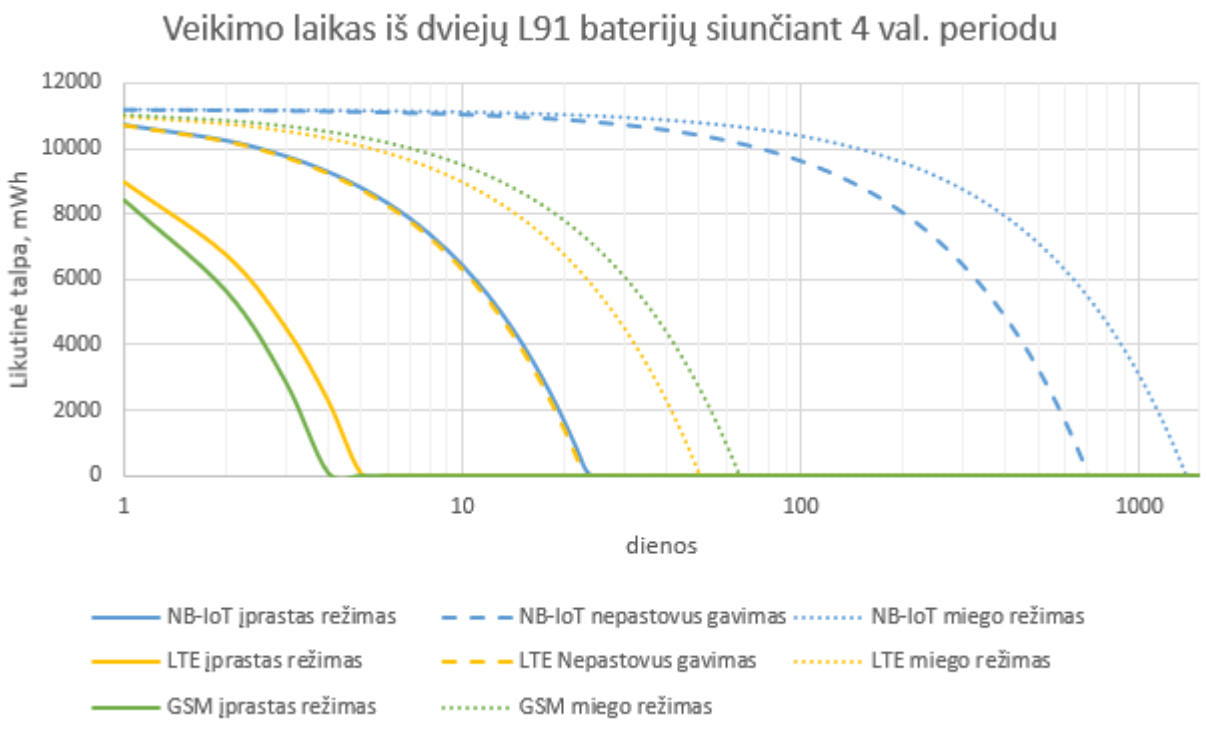
	Siuntimo dažnis	GSM	LTE	NB-IoT
Įprastas režimas	10 min.	3 dienos	4 dienos	22 dienos
	30 min.	3 dienos	4 dienos	23 dienos
	1 val.	3 dienos	5 dienos	23 dienos
	4 val.	4 dienos	5 dienos	23 dienos
Nepastovaus gavimo režimas	10 min.	-	16 dienų	147 dienos
	30 min.	-	20 dienų	309 dienos
	1 val.	-	21 diena	1 metai ir 109 dienos
	4 val.	-	22 dienos	1 metai ir 342 dienos
Miego režimas	10 min.	22 dienos	26 dienos	161 dieną
	30 min.	40 dienų	38 dienos	1 metai ir 30 dienų
	1 val.	51 diena	44 dienos	1 metai ir 331 diena
	4 val.	65 dienos	50 dienų	3 metai ir 277 dienos



3.12 pav. Tirtų technologijų veikimo laikas naudojant dviejų L91 baterijų energiją siunčiant duomenis į serverį 10 minučių periodu

Pagrindinis siaurajuosčio daiktų interneto technologijos privalumas yra energijos suvartojimas, kuris turėtų leisti gaminiui ilgą laikotarpį veikti naudojant tik baterijos energiją. Todėl toliau bus atlikti skaičiavimai, kiek ilgai galėtų veikti prietaisas, naudojantis tik baterijos energiją, pasirinkus

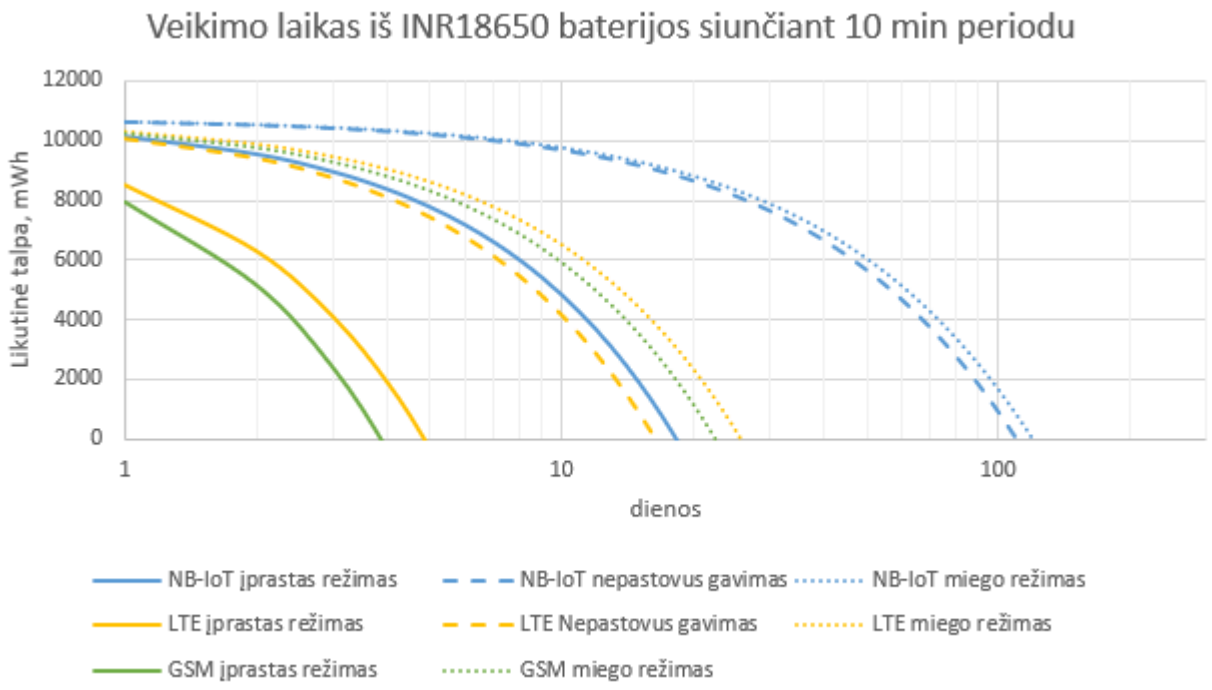
keletą skirtingų baterijų. Pirmas pasirinktas baterijos variantas yra AA tipo vienkartinė baterija, pavyzdžiui, *Energizer* gamintojo baterija L91 (Energizer, 2014). Šios baterijos pagrindiniai pliusai yra didelė talpa – 3500 mAh, tai pavertę energija gauname – 5600 mWh, didelis atsparumas šalčiui, baterija gali veikti esant -40 laipsnių pagal Celsijų temperatūrai, ir labai mažas savaiminio išsikrovimo greitis. Vienos baterijos įtampa yra 1.6 V, todėl vienam gaminiui reiktų bent dviejų baterijų, kad užtikrintume reikalingą įtampą modulio maitinimui, taip gaunama bendra baterijų talpa – 11200 mWh. Kitas pasirinktas baterijų tipas yra ličio įkraunamos baterijos, pavyzdžiui, parinkta standartinio dydžio 18650 ličio baterija INR18650-30Q, kuri yra gaminama *Samsung* gamintojo (Samsung SDI, 2014). Šios baterijos talpa yra 2900 mAh, paskaičiavus kaupiamą energiją gaunama 10730 mWh talpa. Baterija gali veikti iki -25 laipsnių pagal Celsijų temperatūros, bet pakraunamos ličio baterijos pasižymi gana greitu savaiminiu išsikrovimu apie 4 % likutinės talpos per mėnesį, todėl atliekant tolimesnius skaičiavimus būtina tai įvertinti (University, 2018).



3.13 pav. Tirtų technologijų veikimo laikas, naudojant dviejų L91 baterijų energiją, siunčiant duomenis į serverį 4 valandų periodu

Taigi panaudoję gautą informaciją iš prieš tai atliktų tyrimų apie energijos suvartojimą įvairiuose modulių režimuose ir panaudoję turimą informaciją apie pasirinktų baterijų energetinę talpą, galime atlikti skaičiavimus, kurie parodytų numatomą veikimo laikotarpį, naudojant tik baterijos energiją. Pirma skaičiavimai atliekami naudojant *Energizer* L91 baterijas. Dvi tokios baterijos, sujungtos nuosekliai, turi 3,2 V įtampą. Tokia įtampa yra nepakankama stabiliam GSM ir

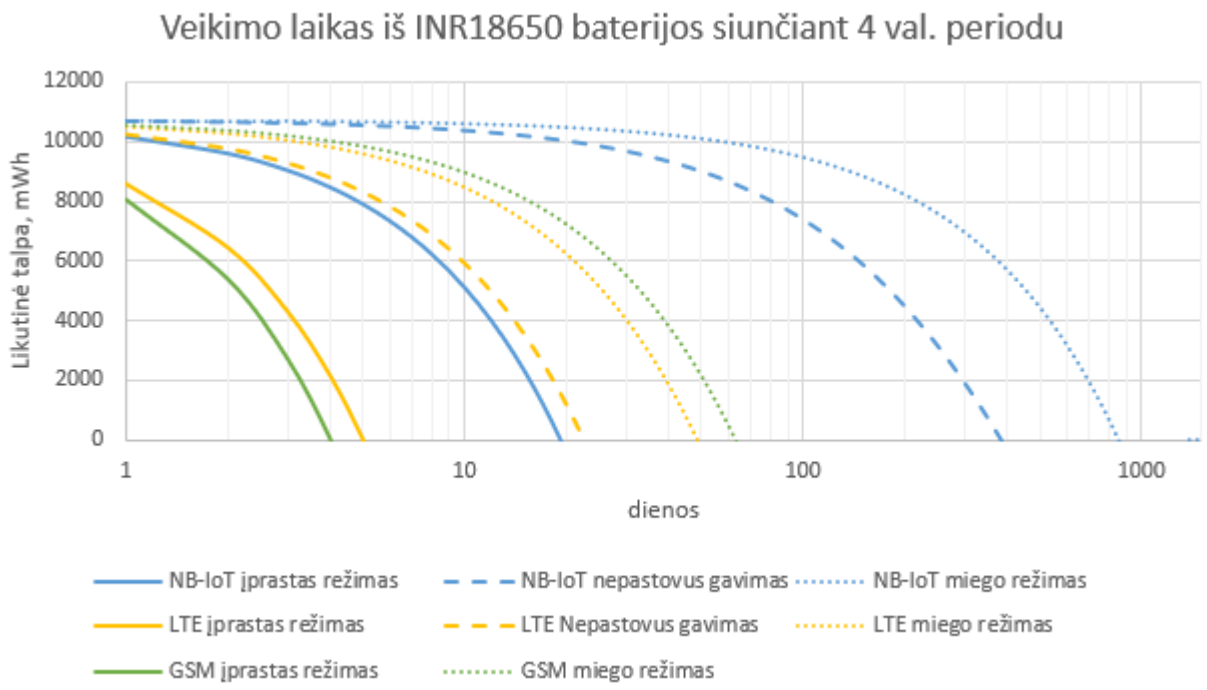
LTE modulių maitinimui, todėl šią įtampą reikia pakelti iki nominalios 4 V maitinimo įtampos. Tai atlikti galima naudojant nelinijinį nuolatinės įtampos keitiklį. Keitiklis leis papildomą energijos suvartojimą, todėl skaičiuojant reikia įvertinti ir tai. Tam, kad būtų kuo mažiau nereikalingo energijos suvartojimo, pasirinktas efektyvus *Texas Instruments* TPS61022 keitiklis, kuris pagal prieš tai pateiktas specifikacijas ir keitiklio duomenų lapą palaikys 96 % efektyvumą (Texas Instruments, 2020b). 3.12 paveiksle ir 3.13 paveiksluose pateikti grafikai, kiek ilgai galėtų veikti tirtų technologijų moduliai, siunčiant duomenis į serverį atitinkamai 10 minučių ir 4 valandų periodu. Siunčiant duomenis į serverį 10 minučių periodu iki 10 dienų neveiktų prietaisai, kurie naudotų GSM ir LTE technologijų modulius, veikiančius įprastu darbo režimu, daugiau nei 100 dienų veiktų tik prietaisai, kurie naudotų NB-IoT technologiją palaikančius modulius, veikiančius nepastovaus gavimo ir miego režimais. Siunčiant duomenis į serverį 4 valandų periodu gauti rezultatai labai panašūs, išsiskyrė tik prietaisas, naudojantis NB-IoT technologijos modulį, veikiantį miego režimu. 3.11 lentelėje pateikti patikslinti šių skaičiavimų rezultatai, iš kurių aiškiai matomas siaurajuosčio daiktų interneto technologiją palaikančio modulio pranašumas.



3.14 pav. Tirtų technologijų veikimo laikas naudojant INR18650 baterijos energiją siunčiant duomenis į serverį 10 minučių periodu

Toliau pagal tą pačia metodiką atliekami skaičiavimai veikimo laikui, naudojant INR18650-30Q baterijos energiją. Šios baterijos įtampa svyruoja nuo 3 iki 4.2 V, ji viršija NB-IoT technologiją palaikančio modulio įtampą. Šią įtampą reikia žeminti iki 2.8 V įtampos. Tam galima panaudoti įtampą žeminantį nelinijinį nuolatinės įtampos keitiklį. Skaičiavimams atlikti naudojamas

Texas Instruments TLV62568 keitiklis (Texas Instruments, 2020a), kurio efektyvumas gali siekti 95 %, bet esant mažai apkrovai krenta iki 87 %. NB-IoT modulis, kaip parodė tyrimai, vartoja mažai energijos, todėl skaičiavimams atlikti bus naudojamas 87 % keitiklio efektyvumas. Taip pat ličio įkraunamos baterijos pasižymi iki 4 % per mėnesį savaiminiu išsikrovimu, tai reiškia, kad, net nesant apkrovai, baterijos likutinė energija mažėja po 4 % likusios energijos per mėnesį. Tai bus taip pat įvertinta skaičiavimuose. 3.14 ir 3.15 paveiksluose pateikti grafikai, kiek ilgai galėtų veikti tirtų technologijų moduliai siunčiant duomenis į serverį atitinkamai 10 minučių periodu ir 4 valandų periodu. Rezultatai smarkiai nesiskiria lyginant su rezultatais, skaičiuotais L91 baterijai. Visgi rezultatuose matome, kad kuo ilgesnį laiko tarpą gaminys veiktų naudojant vienkartinės baterijos energiją, tuo labiau veikimo laikas sutrumpėtų. Tai parodo, kokią įtaką daro savaiminis baterijos išsikrovimas ilgu laikotarpiu ir kad šias baterijas naudoti su energetiškai efektyviomis technologijomis yra neverta. 3.12 lentelėje pateikti patikslinti skaičiavimų rezultatai, kurie dar kartą aiškiai parodo NB-IoT technologiją palaikančio modulio pranašumą.



3.15 pav. Tirtų technologijų veikimo laikas naudojant INR18650 baterijos energiją siunčiant duomenis į serverį 4 valandų periodu

Dažnai praktikoje norint suprojektuoti kiek įmanoma pigesnį prietaisą, prietaiso programinį kodą vykdo ne išorinis procesorius, o modulyje integruotas procesorius. Prieš tai gauti rezultatai parodo, kad, norint turėti ilgai veikiantį prietaisą, naudojantį tik baterijos energiją, GSM ir LTE technologiją palaikantys moduliai nėra tinkami tokiam naudojimui dėl savo nemažo energijos suvartojimo. Esant situacijai, kai nėra reikalingas pastovus mobilusis ryšys, naudojant GSM ir LTE

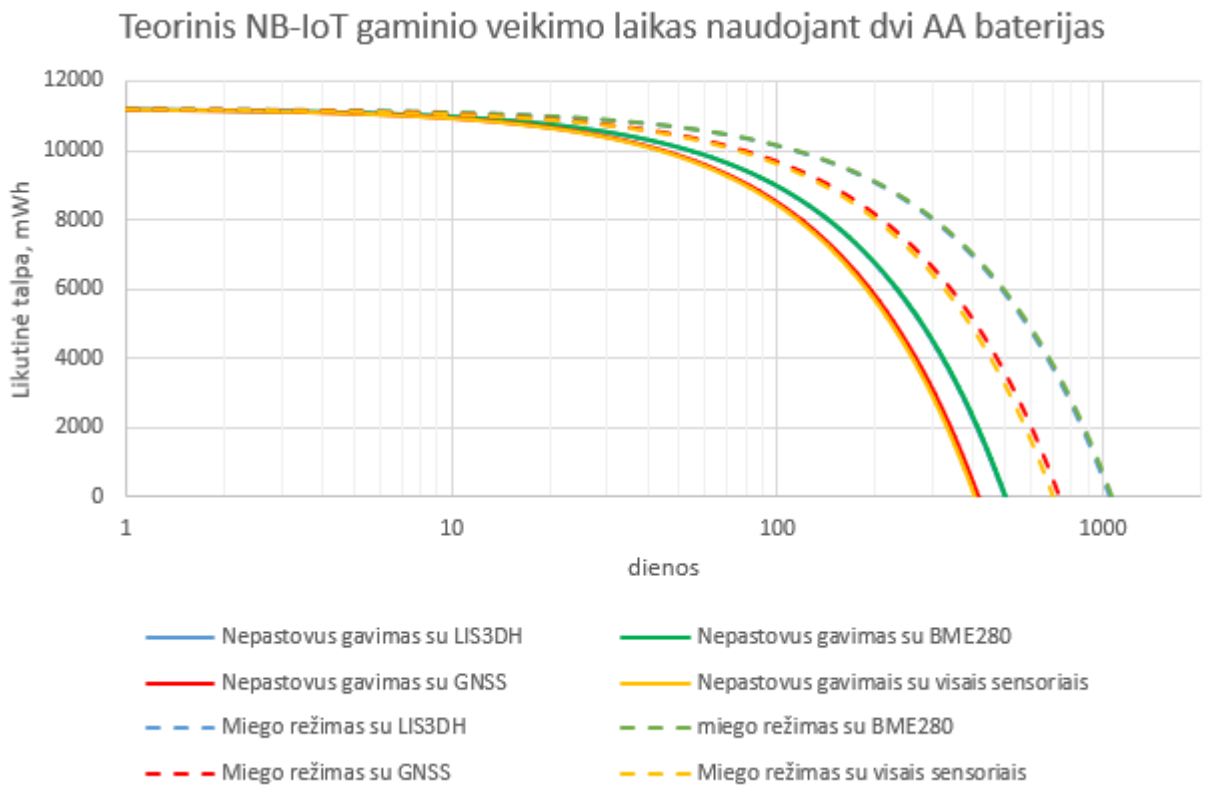
technologijas palaikančius modulius, galima naudoti mikroprocesorius, kurie pasižymi dideliu energetiniu efektyvumu. Naudojant tokius procesorius galima nutraukti šiems moduliams maitinimą užuot juos įvedus į miego režimą. Bet taip šiek tiek pakeliama gaminio savikaina. Kitu atveju, kai reikia palaikyti mobilųjį ryšį, šios technologijos atsilieka prieš NB-IoT technologiją.

3.12 lentelė. Modulių veikimo laikai naudojant INR18650 baterijos energiją

	Siuntimo dažnis	**GSM**	**LTE**	**NB-IoT**
Įprastas režimas	10 min.	3 dienos	4 dienos	18 dienų
	30 min.	3 dienos	4 dienos	18 dienų
	1 val.	3 dienos	5 dienos	19 dienų
	4 val.	4 dienos	5 dienos	19 dienos
Nepastovaus gavimo režimas	10 min.	-	16 dienų	109 dienos
	30 min.	-	19 dienų	207 dienos
	1 val.	-	21 dieną	288 dienos
	4 val.	-	22 dienos	1 metai ir 19 dienų
Miego režimas	10 min.	22 dienos	25 dienos	119 dienų
	30 min.	39 dienų	38 dienos	252 dienos
	1 val.	49 dienos	43 dienos	1 metai ir 15 dienų
	4 val.	63 dienos	48 dienos	2 metai ir 123 dienos

Toliau darant prielaidą, kad NB-IoT technologiją palaikančio modulio vidinis mikroprocesorius vykdo programos kodą, reikia išsiaiškinti, kokius tipinius daiktų internete naudojamus sensorius galima būtų naudoti su tyrime naudotu moduliu. Pagal SIMCOM modulio laisvus išvadus matoma, kad galima naudoti du įėjimo-išėjimo išvadus, vieną ADC kanalą ir vieną UART periferiją. (SIMCOM, 2018a) Vienas iš galimų panaudojimo variantų yra modulį naudoti kartu su pasyviuoju infraraudonųjų spindulių jutikliu. Toks sensorius gali naudoti tokią pačią įtampą kaip ir modulio maitinimas. Šiuo atveju naudodamiesi *Texas Instruments* pateikta informacija galime apskaičiuoti, kad tokio sensoriaus suvartojama energija yra 6,5 µW, ji praktiškai nedarytų įtakos gaminio veikimo laikui. Taip pat galima būtų naudoti temperatūros sensorių, kurio išėjimas grąžina analoginį signalą, pavyzdžiui, STLM20, kurio suvartojama energija yra 24 µW. Panaudojant UART sąsają galima būtų naudoti kartu su GNSS moduliu, kurį būtų galima įjungti tik gavus užklausą iš vartotojo. 2019 metais įmonė „Kolmostar“ pristatė GNSS modulį, kurio maksimalus energijos suvartojimas yra 10 mW. Jis buvo specialiai sukurtas ypač mažam energijos suvartojimui pasiekti (Kolmostar, 2020). Šį GNSS modulį būtų galima naudoti periodiškai įjungiant tam gaminio buvimo koordinačių nustatymui. Po to, kai koordinatės yra nustatomos, modulis turi būti išjungiamas, kitu

atveju tokio modulio energijos suvartojimas labai stipriai darytų įtaką bendram gaminio veikimo laikotarpiui, naudojant tik baterijos energiją.



3.16 pav. Teorinis NB-IoT gaminio su įvairiais jutikliais veikimo laikas naudojant dvi AA baterijas

SIM7020 modulis, kuris šiame darbe buvo naudotas energetiniam efektyvumui tirti, neturi populiarių I2C ir SPI sąsajų, kurios labai dažnai reikalingos norint naudoti įvairius sensorius. Galima naudoti kitus modulius, kurie palaikytų šias periferijas, pavyzdžiui, moduliai NK6010 ir LBAD0YW1SS. (Murata, s.a.; Nurlink, 2019) Šie moduliai palaiko I2C ir SPI periferijas ir pagal specifikacijas išlaiko analogišką energijos suvartojimą kaip ir SIM7020 modulis. Naudojant šias periferijas galima panaudoti tokius jutiklius kaip akselerometras, temperatūros, drėgmės ir slėgio. Toliau galima apskaičiuoti, kiek ilgai gaminys, naudojantis vieną iš paminėtų jutiklių ar modulių, galėtų veikti, naudodamas nepakraunamos baterijos energiją. Modulio vidutiniam energijos suvartojimui naudojami rezultatai, gauti atliktame energijos suvartojimo tyrime, neįskaitant suvartojimo, gauto siuntimo metu, t. y nepastovaus gavimo režimu – 0,51 mW ir miego režimu – 9 µW . Toliau skaičiavimams atlikti daroma prielaida, kad gaminys penkias minutes per keturias valandas veiks įprastu darbo režimu ir tuo metu dar vieną kartą išsiųs duomenis į serverį, tokiam režimui taikomas 20 mW energijos suvartojimas. Bus skaičiuojami keturių skirtingų gaminio variantų energijos suvartojimai: modulis su akselerometru, modulis su temperatūros, drėgmės ir

slėgio jutikliu, modulis su GNSS moduliu, kuris taip pat bus įjungiamas penkioms minutėms per keturias valandą, ir visi šie paminėti variantai viename gaminyje. Akselerometro suvartojamai energijai suskaičiuoti naudojama LIS3DH akselerometro specifikacija, o temperatūros, drėgmės ir slėgio jutiklio suvartojamai energijai suskaičiuoti naudojama BME280 jutiklio specifikacija. (BOSCH, 2018; STMicroelectronics, 2015) 3.16 paveiksle pateikti šių skaičiavimų rezultatai, kuriuose matoma, kad tokie gaminiai su tokiu scenarijumi gali veikti nuo vienerių iki trejų metų.

Taigi iš rezultatų matome, kad NB-IoT technologiją palaikantys moduliai stipriai pralenkia iki šiol naudotų technologijų modulius. Naudojant nedidelio dydžio baterijas, gaminiai su šiais moduliais gali veikti iki 4 metų. Taip pat šią technologiją palaikantys moduliai puikiai suderinami su įvairiais sensoriais, nėra jokių veikimo įtampos diapazonų skirtumų ir moduliai turi atitinkamą periferijų rinkinį, kuris leidžia modulių ir sensorių tarpusavio suderinamumą. Atlikti skaičiavimai, kokį laiko tarpą galėtų veikti gaminys su NB-IoT moduliu ir įvairiais sensoriais, kurių rezultatas parodo, kad tokie gaminiai galėtų veikti mažiausiai vienerius metus, naudojant tik dvi AA dydžio baterijas.

3.4. Trumpas skyriaus apibendrinimas

Šiame skyriuje pateikti tyrimo metu atliktų matavimų rezultatai. Palyginti GSM, LTE ir NB-IoT technologijas palaikančių modulių energijos suvartojimai, kurie buvo gauti moduliams veikiant įprastu darbo, nepastovaus gavimo ir miego režimais. Taip pat tyrimai buvo atlikti esant skirtingiems duomenų siuntimo į serverį dažniams ir parodyta, kokiais darbo režimais siuntimo dažnumas daro didesnę įtaką bendram energijos suvartojimui. NB-IoT technologiją palaikantis modulis parodė stipriai geresnius rezultatus visais režimais energetinio efektyvumo atžvilgiu.

Taip pat atliktas energijos suvartojimo tyrimas nuolat siunčiant duomenis į serverį. Apskaičiuota, kiek vidutiniškai energijos moduliai suvartoja išsiųsti vienam baitui duomenų, ir gautas rezultatas parodė, kad siaurajuosčio daiktų interneto technologiją palaikantis modulis siunčia duomenis daugiau nei 10 kartų efektyviau.

Su tyrimo metu gautais rezultatais atlikti skaičiavimai, kiek ilgai galėtų veikti tokius modulius turintys gaminiai naudodami tik baterijų energiją. Skaičiavimams naudotos dvi standartinio tipo baterijos: ličio vienkartinė AA dydžio baterija ir ličio įkraunama 18650 dydžio baterija. Rezultatai parodė, kad NB-IoT technologiją palaikančio modulio veikimo laikas iš tokių baterijų gali siekti beveik iki ketverių metų, o GSM ir LTE technologijas palaikantys moduliai galėtų veikti iki 65 dienų. Ištirtas NB-IoT modulių suderinamumas su keletu mažai energijos vartojančių jutiklių ir apskaičiuotas teorinis veikimo laikas NB-IoT gaminių su šiais jutikliais, naudojant baterijų

energiją,. Gauti rezultatai parodė, kad tokie gaminiai galėtų veikti iki trejų metų, bet galima šį laikotarpį padidinti, naudojant daugiau baterijų ar rečiau siunčiant duomenis į serverį.

APIBENDRINIMAS. IŠVADOS

Atlikti tyrimai parodė, kad siaurajuosčio daiktų interneto technologija gali būti įgyvendinama veikiant atskirai, šalia jau naudojamų dažnių ruožų ir LTE dažnių ruože. Išsiaiškinta, kad ši technologija pasižymi geresniu ryšio pralaidumu per 20 dB. Tyrimo metu atlikta energijos taupymo ir nepastovaus gavimo funkcijų analizė parodė, kas sumažina modulio energijos suvartojimą.

Eksperimentams atlikti suprojektuotos spausdintinės plokštės ir mobiliojo ryšio antena, kurios garantuoja vienodas testavimo sąlygas. Parinktas atliekamų eksperimentų planas, kurio metu moduliai veikė skirtingais darbo režimais. Eksperimentų matavimams pasirinkta naudoti *NGMO2* maitinimo šaltinį, kuris pasižymi aukštu matavimų tikslumu. Paruoštas programinis kodas, kuris leidžia automatizuoti modulio veikimą tyrimų metu.

Energetinio efektyvumo tyrimo metu gauti rezultatai parodė, kad siaurajuosčio daiktų interneto technologiją palaikantis modulis energijos suvartojimo atžvilgiu lenkia kitus tirtus mobiliojo ryšio modulius: veikiant įprasto darbo režimu lenkia nuo 4 iki 6 kartų, nepastovaus gavimo režimu – nuo 9 iki 30 kartų, o miego režimu nuo 6 iki 30 kartų. Pasiektas mažiausias vidutinis energijos suvartojimas buvo lygus 0,34 mW, o vidutinis energijos suvartojimas tik miego režime siekia 9 µW. Tyrimo metu apskaičiuota, kad NB-IoT technologija galima pasiekti iki 20 kartų energetiškai efektyvesnį duomenų siuntimą į serverį. Remiantis gautais rezultatais apskaičiuota, kad, naudojant dvi standartines AA dydžio ličio baterijas, gaminys galėtų veikti iki 4 metų esant siuntimo į serverį periodui kas 4 valandas.

Tyrimo išvados:

1) Siaurajuosčio daiktų interneto technologija yra lengvai įdiegiama į mobiliojo ryšio bazines stotis, užtenka atnaujinti programinę įrangą.

2) Siaurajuosčio daiktų interneto technologijos energijos taupymo funkcijos efektyvesnės negu kitų mobiliojo ryšio technologijų energijos taupymo funkcijos.

3) Siaurajuosčio daiktų interneto technologijos energetinis efektyvumas yra geresnis net siunčiant duomenis į serverį, kai nėra naudojamos jokios energijos taupymo funkcijos.

4) Su siaurajuosčio daiktų interneto technologija galima suprojektuoti gaminį, kuris veiktų apie 4 metus, naudojant dvi AA dydžio ličio baterijas ir siunčiant duomenis į serverį kas keturias valandas. Mažinant siuntimo dažnį, galima būtų pasiekti „3GPP“ užsibrėžtą tikslą – dešimties metų veikimo laiką, naudojant tik baterijos energiją.

LITERATŪRA

Antenna theory. (n. d.). *Impedance matching*. Prieiga per internetą: http://www.antenna-theory.com/tutorial/smith/smithchart5.php

BOSCH. (2018). *BME280 Combined humidity and pressure sensor*. BOSCH.

Dahlman, E., Parkvall, S., & Sköld, J. (2016). *4G, LTE-Advanced Pro and The Road to 5G: Third Edition*. Amsterdam: Elsevier.

Degutis, G. (2020). „Telia“ pradeda tiekti siaurajuostį daiktų interneto ryšį. *Verslo žinios*.

Energizer. (2014). *Product Datasheet Energizer L91*. Energizer.

Frequency check. (n. d.). *Lithuania frequency bands*. Gauta 2019 m. balandžio 20 d., https://www.frequencycheck.com/countries/lithuania

GSMA. (2016). *3GPP Low Power Wide Area Technologies*. GSMA.

GSMA. (2017). *NB-IoT Deployment Guide to Basic Feature set Requirements*. GSMA.

Huawei Technologies. (2016). *NB-IOT-Enabling New Business Opportunities*. Huawei.

Kolmostar. (2020). *JEDI-200*. Prieiga per internetą: https://uploads-ssl.webflow.com/5c6355cc44c19c6e2c2a1079/5e98d8ea4a1b90f117b29818_JEDI200 spec sheet_final.pdf

Lau, H. (2019). *Practical Antenna Design for Wireless Products*. Artech house. Boston.

Mangalvedhe, N., Ratasuk, R., & Ghosh, A. (2016). NB-IoT deployment study for low power wide area cellular IoT. *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC*.

Murata. (n. d.). *Type 1SS*. Prieiga per internetą: https://wireless.murata.com/type-1ss.html

Nanda, U., & Pattnaik, S. K. (2016). Universal Asynchronous Receiver and Transmitter (UART). *ICACCS 2016 - 3rd International Conference on Advanced Computing and Communication Systems: Bringing to the Table, Futuristic Technologies from Arround the Globe*.

Nurlink. (2019). *NK6010*. Nurlink.

ON Semiconductors. (2019). *Zener Voltage Regulators MMSZ52xxxT1G Series, SZMMSZ52xxxT1G Series*. ON Semiconductors.

Rohde & Schwarz. (2004a). *Dual-Channel Analyzer / Power Supply NGMO2 Precise power supply and measurements under critical test conditions Dual-Channel Analyzer / Power Supply NGMO2* ... (T. 5, Numeris 5). Rohde & SCHwarz. Munchen.

Rohde & Schwarz. (2004b). *Operating Manual Power Supply NGMO1 and Power Supply NGMO2*. Rohde & SCHwarz. Munchen.

Rohde & Schwarz. (2017). *R & S ® ZVL Vector Network Analyzer Specifications*. Rohde & SCHwarz. Munchen.

Samsung SDI. (2014). *Specification of product INR18650-30Q* (Numeris 0). Samsung.

Silicon LABS. (2017). Singlechip Usb-UART bridge CP2104. *Singlechip Usb-UART bridge CP2104*. Silicon LABS.

SIMCOM. (2015a). *SIM800 Hardware Design V1.08*. SimCom.

SIMCOM. (2015b). *SIM800 Series_AT Command Document Title: SIM800 Series AT Command Manual*. SimCom.

SIMCOM. (2016). *SIM7500_SIM7600 Series_AT Command Manual_V1.01*. SimCom.

SIMCOM. (2018a). *SIM7020 _Hardware Design_V1.02*. SimCom.

SIMCOM. (2018b). *SIM7600_series_hardware_design_v1.02*. SimCom.

SIMCOM. (2019a). *SIM7020 Series_AT Command Manual_V1.03*. SimCom.

SIMCOM. (2019b). *SIM7020 Series_Low Power Mode_Application Note*. SimCom.

STMicroelectronics. (2015). *LIS3DH* (Numeris May). STMicroelectronics.

Texas Instruments. (2020a). *TLV62568 1-A High Efficiency Synchronous Buck Converter in SOT Package*. Texas Instruments.

Texas Instruments. (2020b). *TPS61022 8-A Boost converter with 0.5-V ultra-low input voltage.* Texas Instruments.

University, B. (2018). *What does elevated discharge*. Prieiga per internetą: https://batteryuniversity.com/learn/article/elevating_self_discharge

VIAVI Solutions. (2017). *Narrowband – Internet of Things (NB-IoT) | Internet of Things*. Prieiga per internetą: https://www.gsma.com/iot/narrow-band-internet-of-things-nb-iot/

Wikipedia. (2020a). *NarrowBand IoT*. Prieiga per internetą: https://en.wikipedia.org/wiki/Narrowband_IoT

Wikipedia. (2020b). *Virtual instrument software architecture*. Prieiga per internetą: https://en.wikipedia.org/wiki/Virtual_instrument_software_architecture

Wu, J. H. (2017). *CAT-M & NB-IoT Design and Conformance Test*. Keysight.

PRIEDAI

A priedas. Magistro baigiamasis darbas įkeltas į mano.vgtu.lt sistemą

B priedas. Pranešimo XXIII-oje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje medžiaga

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

XXIII-toji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija
„MOKSLAS – LIETUVOS ATEITIS“

ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA

PAŽYMA

Ernestas Ročys

Elektronikos (T170), Mikroelektronikos (T171) ir Telekomunikacijų inžinerijos (T180) jungtinėje sekcijoje perskaitė pranešimą

SIAURAJUOSTĖ DAIKTŲ TECHNOLOGIJA

Mokslo komiteto pirmininkas prof. habil. dr. Romanas Martavičius

Sekcijos pirmininkas doc. dr. Nerijus Paulauskas

2020 m. balandžio 30 d.
Vilnius

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

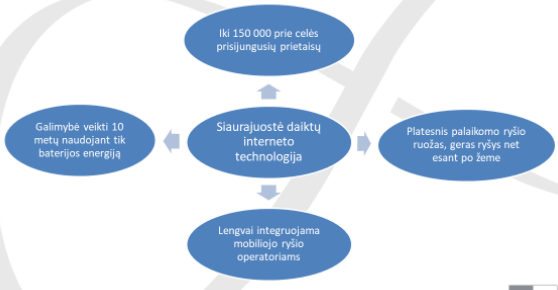
SIAURAJUOSČIO DAIKTŲ INTERNETO TECHNOLOGIJA

23-OJI JAUNŲJŲ MOKSLININKŲ KONFERENCIJA
„MOKSLAS – LIETUVOS ATEITIS: ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA“

Ernestas ROČYS, ernestas.rocys@stud.vgtu.lt
Vadovas: doc. dr. Andrius Katkevičius
Elektroninių sistemų katedra

Vilnius, 2020

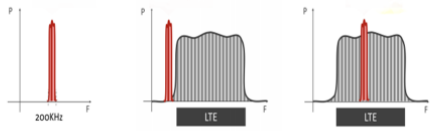
Siaurajuosčio daiktų interneto technologija



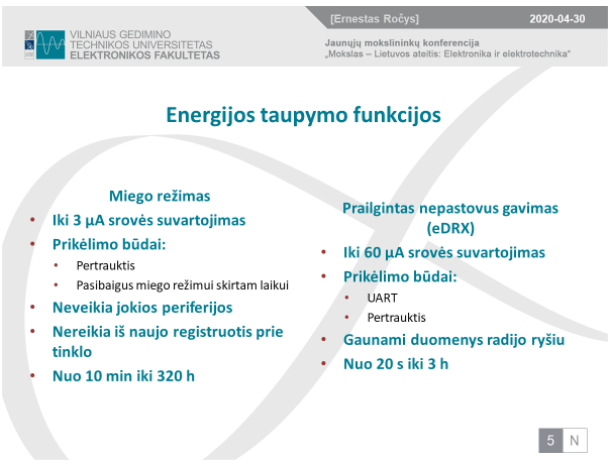
Siaurajuostė daiktų interneto technologija (angl.: *NarrowBand – Internet of things, NB-IoT)*

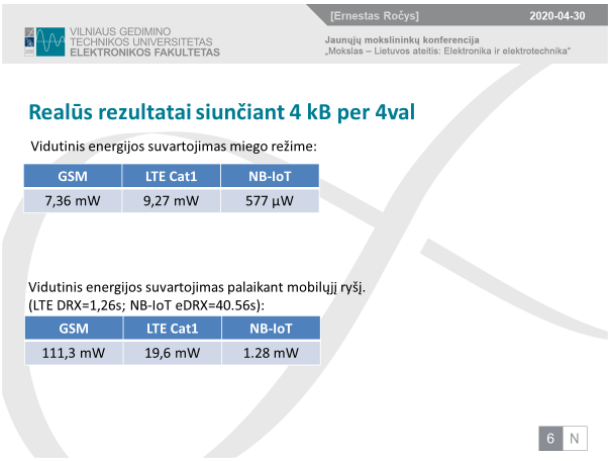
	GSM	LTE Cat1	NB-IoT
MCL	-144(164) dB	-144 dB	-164 dB
Greitis	140 kbps	5-10 Mbps	170-250 kbps
Modulio kaina	<5 EUR	>10 EUR	<5 EUR
Preliminarus veikimo laikas naudojant baterijos energiją	3 metai	3 metai	10 metų

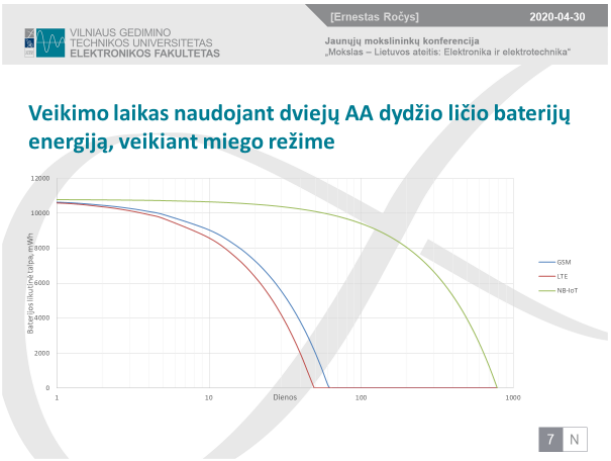
Lengvai integruojama mobiliojo ryšio operatoriams

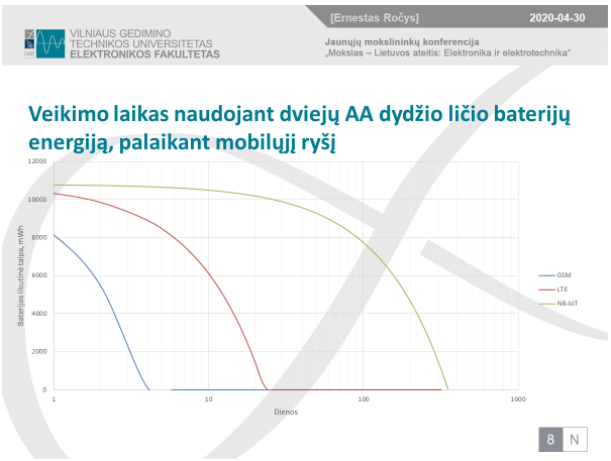


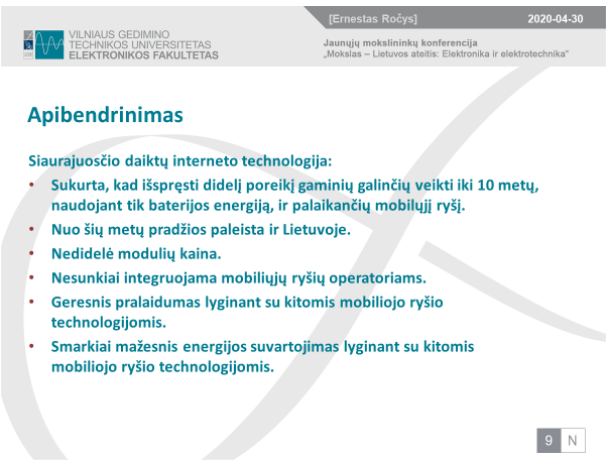
Atskirai | Šalia LTE juostos | LTE juostoje


VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
[Ernestas Ročys]
2020-04-30
Jaunųjų mokslininkų konferencija
„Mokslas – Lietuvos ateitis: Elektronika ir elektrotechnika"
Energijos taupymo funkcijos
Miego režimas
Iki 3 µA srovės suvartojimas
Prikėlimo būdai:
Pertrauktis
Pasibaigus miego režimui skirtam laikui
Neveikia jokios periferijos
Nereikia iš naujo registruotis prie tinklo
Nuo 10 min iki 320 h
Prailgintas nepastovus gavimas (eDRX)
Iki 60 µA srovės suvartojimas
Prikėlimo būdai:
UART
Pertrauktis
Gaunami duomenys radijo ryšiu
Nuo 20 s iki 3 h
5 N


VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
[Ernestas Ročys]
2020-04-30
Jaunųjų mokslininkų konferencija
„Mokslas – Lietuvos ateitis: Elektronika ir elektrotechnika"
Realūs rezultatai siunčiant 4 kB per 4val
Vidutinis energijos suvartojimas miego režime:
GSM | LTE Cat1 | NB-IoT
7,36 mW | 9,27 mW | 577 µW
Vidutinis energijos suvartojimas palaikant mobilųjį ryšį.
(LTE DRX=1,26s; NB-IoT eDRX=40.56s):
GSM | LTE Cat1 | NB-IoT
111,3 mW | 19,6 mW | 1.28 mW
6 N


VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
[Ernestas Ročys]
2020-04-30
Jaunųjų mokslininkų konferencija
„Mokslas – Lietuvos ateitis: Elektronika ir elektrotechnika"
Veikimo laikas naudojant dviejų AA dydžio ličio baterijų energiją, veikiant miego režime
12000
10000
8000
6000
4000
2000
0
1
10
Dienos
100
1000
GSM
LTE
NB-IoT
7 N


VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
[Ernestas Ročys]
2020-04-30
Jaunųjų mokslininkų konferencija
„Mokslas – Lietuvos ateitis: Elektronika ir elektrotechnika"
Veikimo laikas naudojant dviejų AA dydžio ličio baterijų energiją, palaikant mobilųjį ryšį
12000
10000
8000
6000
4000
2000
0
1
10
Dienos
100
1000
GSM
LTE
NB-IoT
8 N


VILNIAUS GEDIMINO
TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
[Ernestas Ročys]
2020-04-30
Jaunųjų mokslininkų konferencija
„Mokslas – Lietuvos ateitis: Elektronika ir elektrotechnika"
Apibendrinimas
Siaurajuosčio daiktų interneto technologija:
• Sukurta, kad išspręsti didelį poreikį gaminių galinčių veikti iki 10 metų, naudojant tik baterijos energiją, ir palaikančių mobilųjį ryšį.
• Nuo šių metų pradžios paleista ir Lietuvoje.
• Nedidelė modulių kaina.
• Nesunkiai integruojama mobiliųjų ryšių operatoriams.
• Geresnis pralaidumas lyginant su kitomis mobiliojo ryšio technologijomis.
• Smarkiai mažesnis energijos suvartojimas lyginant su kitomis mobiliojo ryšio technologijomis.
9 N

VILNIAUS GEDIMINO
TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
[Ernestas Ročys]
2020-04-30
Jaunųjų mokslininkų konferencija
„Mokslas – Lietuvos ateitis: Elektronika ir elektrotechnika"
Ačiū už dėmesį
10 N