



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Egidijus Kareiva

MAŽOS GALIOS BEVIELIŲ JUTIKLIŲ TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas
Doc. dr. Mindaugas Žilys

KAUNAS, 2015

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTRONIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

MAŽOS GALIOS BEVIELIŲ JUTIKLIŲ TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas
Elektronikos inžinerija (kodas 621H61002)

Vadovas

(parašas) Doc. dr. Mindaugas Žilys
(data)

Recenzentas

(parašas) Doc. dr. Saulius Japertas
(data)

Projektą atliko

(parašas) Egidijus Kareiva
(data)

KAUNAS, 2015



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos

(Fakultetas)

Egidijus Kareiva

(Studento vardas, pavardė)

Elektronikos inžinerija, 621H61002

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Mažos galios bevielių jutiklių tyrimas

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 15 m. gegužės 27 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Egidijaus Kareivos** baigiamasis projektas tema „Mažos galios bevielių jutiklių tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Kareiva E. Mažos galios bevielių jutiklių tyrimas: *Magistro baigiamasis darbas / vadovas*
doc. dr. Mindaugas Žilys; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas,
Elektronikos inžinerijos katedra.

Kaunas, 2015. – 59 psl.

S A N T R A U K A

Darbo tikslas – išanalizuoti mažos galios bevielių jutiklių tinklus, įvertinti šių tinklų privalumus bei trūkumus bei suprojektuoti veikiančią sistemą, kuri siųstų duomenis bevieliu būdu naudodama suprojektuotą energijos taupymo algoritmą.

Analitinėje dalyje yra nagrinėjami mažos galios bevielių jutiklių tinklai, tarpusavyje lyginami jų parametrai. Apžvelgiami įvairūs pritaikymo būdai ir jų paplitimas. Analizuojami energijos regeneracijos iš aplinkos būdai, kurie gali būti naudojami nagrinėjamiesiems mažos galios jutikliams maitinti.

Projektinėje dalyje yra modifikuojamos mažos galios sistemos, tam kad būtų galima išmatuoti suvartojamą srovę. Atliekamas energijos taupymo algoritmo kūrimas ir sukuriama programa įrenginiui. Išbandžius visus energijos taupymo sukurtus algoritmus pateikiami gauti rezultatai.

Rezultatai apibendrinami ir daromos išvados, kuriomis remiantis galima tinkamai tarpusavyje palyginti sirtingų bevielių jutiklių sunaudojamą srovę.

Kareiva E. Ultra low power wireless sensors research: *Master's work* / supervisor doc. dr. Mindaugas Žilys; Kaunas University of Technology, Faculty of electrical and Electronics Engineering, department of Electronics Engineering.

Kaunas, 2015. – 59 psl.

S U M M A R Y

The aim - to analyze low-power wireless sensor networks, these networks to assess the strengths and weaknesses, and to design a system in which to send data wirelessly using the designed energy-saving algorithm.

The analytical part is analyzed existing low-power wireless sensor networks, their parameters are compared with each other. An overview of various applications using their prevalence. Analyzing the energy recovery from the way in which can be used in low-power sensors at issue to power up.

The project is part of a modification of already existing low power nRF51288 system in order to measure current consumption. Carry out energy-saving algorithm and creates an installation program. Tried all the energy-saving algorithms designed to get the results.

The results are summarized and conclusions are drawn. Results tested algorithm adapted to fasten the actual management of the system. Evaluating the new system versatility and energy savings on a large scale.

Turinys

ĮVADAS	8
1. Energijos regeneracijos iš aplinkos bei MGRP apžvalga	9
1.1 Energijos regeneravimo sistemų architektūros ir algoritmai	12
1.2 Energijos regeneracija iš radijo dažnio	15
1.3 Energijos regeneracija iš NFC	17
1.4 Aktyvūs ir pasyvūs RFID	20
1.5 ANT tinklo savybės	22
1.6 Bluetooth 4.0 (LE – low energy)	23
2. Mažos galios radijo perdavimo sistemų architektūra	25
2.1 Neapibrėžties būsena atiduodant regeneruotą energiją į apkrovą.....	28
2.2 Būdai mažinantys suvartojamą energiją Bluetooth Low Energy luste	30
3. MGBJ lusto struktūra	32
3.1 BLE suvartojamos energijos etapai	34
3.2 MGBJ BLE lusto srovės matavimas	36
4. Rezultatai ir jų analizė	53
Išvados.....	58

Santrumpų (ir terminų) žodynas

EH – Energijos regeneracija iš aplinkos (ang. „Energy harvesting“)

RF – Radijo dažnis (ang. „Radio frequency“)

IC - (angl. „integrated circuit“)

RFID – Radijo dažnio atpažinimas (ang. „Radio-frequency identification“)

TAG – žymelė

PWM – Pulso pločio moduliacija (ang. „Pulse width modulation“)

RX – Išsiųsti (ang. „Receive“)

TX – Gauti (ang. „Transmit“)

PPM – Milijoninė dalis(ang. „Parts per million“)

RTC – Realus laiko taimeris (ang. „Real time clock“)

BLE – („ang. Bluetooth Low Energy“)

Master – Imtuvas/siųstuvas

Slave – Siųstuvas

IoT – Daiktų internetas (angl. „Internet of things“)

MGBJ – mažos galios bevieliai jutikliai

MGRP – mažos galios radijo perdavimas

ĮVADAS

2014-aisiais metais „IoT“ tyrimo duomenimis, preliminariais skaičiavimais prie tinklo buvo prijungta milžiniškas kiekis įvairiausių įrenginių – 1,2 milijardo. Tačiau labiau dominantis dalykas yra ne įrenginių kiekis, bet prasidėjęs karas tarp konsorciūmų, kurie susiformavo įtakoti standartus.

Atsižvelgdami į tai, jog „Internet Of Things“ yra dar pakankamai nauja technologijų kryptis, o konkurencija itin intensyvi, būtina įvertinti šiandien rinkoje siūlomus sprendimus ir atlikti jų analizę. Esami konkurentai vysto technologijas įvairiomis kryptimis, tokiomis kaip privatumo politika, saugumas, suderinamumas, tačiau neaplenkiama ir mažos galios vystymo sritis.

Iš esmės egzistuoja tik du galimi scenarijai: bevielis jutiklis turi neišsenkamą maitinimo šaltinį, tokį kaip akumulatorius, kuris periodiškai privalo būti pakeistas nauju, arba bevielis jutiklis neturi baterijos, todėl energija privalo būti regeneruota, o energijos regeneracijos būdas turi būti palankiausias jutiklio aplinkai. Antruoju atveju, kai energijos resursai yra itin riboti, iškyla tokios problemos kaip neįveikiamas įtampos barjeras, o turint ribotos talpos energijos šaltinį iškyla klausimų kaip ilgai šis šaltinis tarnaus ir kaip būtų galima sumažinti naudojamą energiją nedidinant energijos šaltinio.

Darbo tikslas: Atlikti bevielių itin mažos galios bevielių tinklų analizę, pasiūlyti sprendimus kurie mažintų energijos sąnaudas duomenų perdavimui.

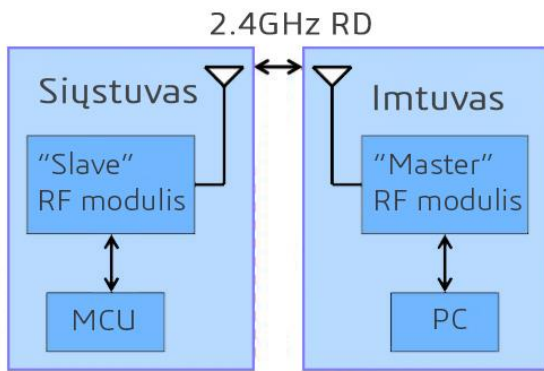
Uždaviniai: Išanalizuoti mažos galios bevielių jutiklių tinklus, įvertinti šių tinklų privalumus bei trūkumus bei suprojektuoti veikiančią sistemą, kuri siųstų duomenis bevieliu būdu naudodama suprojektuotą energijos taupymo algoritmą.

1. Energijos regeneracijos iš aplinkos bei MGRP apžvalga

Šiandieninėje elektronikoje pastebima sparčiai besivystanti vartotojų ekoelektronikos šaka, kurią sudaro bevieliai, tarpusavyje komunikuojantys, skaitmeniniai įtaisai. Šių bevielių įrenginių architektūra pasižymi turinti trumpą veikimo nuotolį, žemą duomenų perdavimo spartą ir itin žemą jutiklio energijos suvartojimą, kuris periodiškai siunčia duomenis į nutolusį įrenginį, pavyzdžiui išmanųjį telefoną ar specialiai tam suprojektuotą įrenginį. Kaip pavyzdys gali būti sveikatingumui naudojami įrenginiai, tokie kaip „FitBit“, „WiThings“ ar „Nike+“, išmaniųjų įrenginių priedai, tokie kaip „Pebble Watch“. Šios architektūros įrenginiai dažnai kombinuojami su įrenginiais, kurie regeneruoja energiją iš aplinkos, kaip pavyzdžiui iš radijo dažnio, kurį skleidžia mobiliųjų tinklų operatorių bokštai.

Bevielių įrenginių kūrėjai turi didžiulį pasirinkimą iš radijo komunikacijos protokolų, kuriuos gali naudoti naujiems įrenginiams. Kai kurių protokolų pagrindas ir yra optimizuoti siuntimą taip, jog būtų sunaudota kuo mažiau energijos, atsako laikas būtų greitas, o susijungimo laikas būtų trumpas. Paskutiniu laikotarpiu rinkoje yra nusistovėję keletas itin žemas energijos sąnaudas turintys protokolai, kurie atitinka daugumą aukščiau minėtų kriterijų. Vieni labiausiai žinomų standartų išlieka „Bluetooth Low Energy - BLE“, ZigBee ir ANT, kurie turi neabejotinų privalumų, dėl kurių šie protokolai yra palaikomi išmaniųjų telefonų rinkoje.

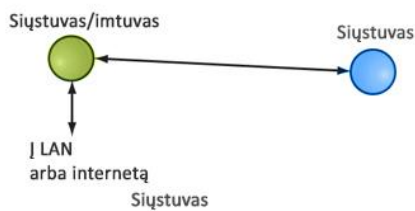
Susijungimo momentas tarp MGBJ ir imtuvo, turi labai didelį poveikį energijos suvartojimo požiūriu. Deja dauguma literatūroje lyginamų skirtingų siųstuvų energijos suvartojimas tėra labiau teorinis ir kokybinis arba pateikiami apibendrinti eksperimento duomenys, iš kurių nėra įmanoma daryti praktinių išvadų apie energijos suvartojimą norimu scenarijumi. Be to, techniniai siųstuvų aprašymai nepateikia išsamių specifinių parametrų, kurie galėtų padėti įvertinti santykį tarp energijos suvartojimo ir duomenų perdavimo spartos, kai norima išsirinkti siųstuvą taikomajai programai, kuris cikliškaireitų į miego režimą. Žemiau pateikiame dažniausiu atveju naudojamą principinę schemą:



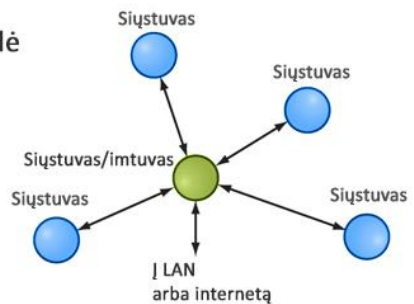
Pav. 1 Dažniausiu atveju naudojama MGBJ principinė schema

Bevielių jutiklių tinklą realizuoti galima keletu būdų, priklausomai nuo to, koks yra uždavinys. Sakykime, jog žemiau pateiktame paveikslėlyje esantys mėlyni apskritimai yra bevielio tinklo mazgai. Siųstuvas mėlyni, o siųstuvas ir imtuvas viename - žali. Kaip matome vieni mazgai yra tik stebimi ir jie yra valdomi, o kiti veikia kaip duomenų kaupikliai apklausinėdami valdomuosius mazgus arba reikalingi kad būtų kaip tarpininkai su išoriniu ryšio kanalu. Dar vienu atveju mazgai gali tarnauti kaip duomenų kartotuvai. Pagrindinės bevielių tinklų topologijos pateiktos žemiau[2]:

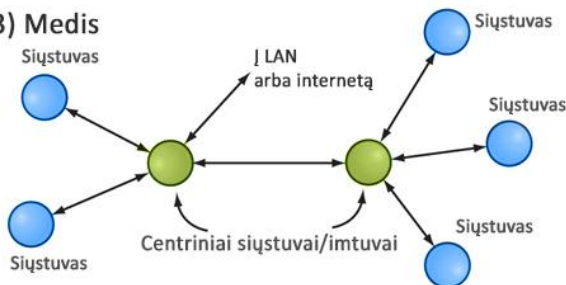
1) P2P (ang. "Point to point")



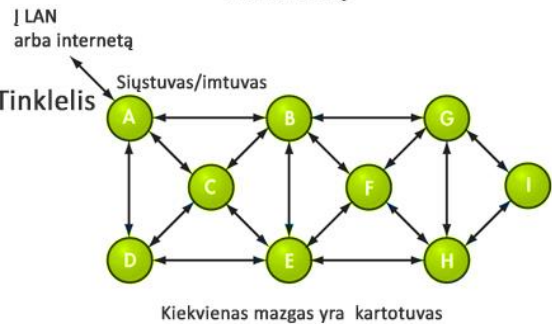
2) Žvaigždė



3) Medis



4) Tinklelis



Pav. 2 Dažniausiai naudojami bevielių tinklų tipai

Iš aukščiau esančio paveikslėlio galime pastebėti, jog kiekvienu atveju tinklas turi bent vieną pagrindinį mazgą, kuris surenka arba išsiunčia duomenis, visi likę mazgai skirti tik gražinti arba atkartoti duomenis.

Pirmasis atvejis(P2P) yra pats paprasčiausias ir dažniausiai sutinkamas(angl. „Point to point“). Tokioje sistemoje užtenka vieno siųstuvo ir vieno imtuvo arba abu mazgai yra lygiaverčiai: abu yra ir siųstuvai ir imtuvai.

Kitas žinomas tinklo tipas yra vadinamas žvaigždės(angl. „Star“). Keletas mazgų yra siųstuvai, o imtuvas tik vienas. Kartais šis tinklo metodas žymimas M2P(angl. „multipoint to point“). siųstuvo mazgai komunikuoja tik su centriniu mazgu – imtuvu, tarpusavyje nekomunikuoja. Arba gali būti ir priešingas tinklo veikimas, kai centrinis mazgas transliuoja duomenis į visus imtuvus, tokiu būdu tai vadinsis P2M tinklu (angl. „point to multipoint“).

„Medžio“ tipo atveju, tinklas gali turėti daug atsišakojimų, tai tarsi „žvaigždės“ tipo tinklas komunuota su kitu „žvaigždės“ tipo tinklu, per tų tinklų centinius mazgus.

Dar vienas tinklo tipas yra gana populiarus kuriant bevielį jutiklių tinklą. Šis tinklas vadinamas tinklelio tipo(angl. „Mesh“). Tinklas gali turėti daug įvairių paskirčių, bet pagrindinė tinklo idėja ta, jog kiekvienas tinklo mazgas gali komunikuoti su kiekvienu šalia esančiu mazgu. Tai reiškia, jog kiekvienas tinklo mazgas negali komunikuoti su visais mazgais, o tik su tais, kurie pasiekiami dėl galios apribojimo. Be viso to, šis tinklo tipas dar patikimas ir tuo, jog pasibaigus vieno mazgo maitinimo elementui ar įvykus kitokiam nors gedimui, kai mazgas yra laikinai nepasiekiamas, yra randamas kitas aplinkinis kelias duomenis siųsti tolyn, nestabdant siuntimo. Iš pažiūros šis tinklo tipas yra gana painus, tačiau įvertinus tai, jog jis gali aprėpti plačias erdves ir užtikrinti duomenų siuntimo patikimumą, tuomet šie kriterijai atperka didesnes išlaidas.

Apibendrinant tinklų tipus pastebime, jog visi tinklų tipai turi centinį mazgą, kuriuo realizuojant nesudėtingą tinklą gali būti tiek nešiojamas kompiuteris, išmanusis telefonas ar maršrutizatorius, kuris sukuria LAN(angl. „local area network“) ar internetas. Centrinis mazgas – imtuvas, surenka informaciją iš siųstuvų ir persiunčia juos į galutinę duomenų surinkimo vietą, kur jie bus apdoroti.

Energijos regeneracija iš aplinkos yra toks procesas, kurio metu iš aplinkos yra regeneruojami maži energijos kiekiai, kurie, jeigu jų niekas neregeneruos, bus prarasti natūraliai. Tai tokie energijos šaltiniai kaip šiluma, šviesa, garsas, vibracijos, ar bet koks kitas judėjimas. Energijos regeneracija iš aplinkos gali būti skirstoma į dvi pagrindines grupes:

- Efektyvumo didinimas – pavyzdžiui integruotų grandinių perkaitimas būtų regeneruotas ir gauta energija panaudota tai pačiai grandinei maitinti.
- Naujų technologijų – pavyzdžiui bevielų sensorių tinklai

Energijos regeneracija iš aplinkos turi potencialų sprendimą pakeisti kai kurių įrenginių sudedamąsias dalis. Tai gali būti atlikta įrenginiuose, kurie vartoja mažai elektros energijos, pakeičiant jų baterijas. Tai įrodanti nauda:

- Nereikia priežiūros – nereikia keisti baterijos
- Aplinkai saugus sprendimas – senomis baterijomis turi būti tinkamai pasirūpinta, jos turi daug cheminių elementų, kurie labai žalingi žmogaus sveikatai bei aplinkai, todėl baterijų priežiūra tampa labai atsakingu etapu.
- Atveria naujų įrenginių galimybes – pavyzdžiui energijos regeneracijos jutiklių diegimas nutolusias vietas stebėti.

Sėkmingas energijos regeneracijos iš aplinkos jutiklių diegimas nėra paprasta operacija, po kurios garantuotai seka sėkmė, šis procesas reikalauja išankstinio pasiruošimo įvairiose srityse tokiose kaip:

1. Energijos regeneracija (atsitiktinis, nereguliarus, ne sinusoidinis)
2. Energijos saugojimas
3. Metrologija
4. Medžiagų mokslas
5. Sistemų projektavimas

1.1 Energijos regeneravimo sistemų architektūros ir algoritmai

Kaip pavyzdį galima pateikti dvi pagrindines sritis, kuriose prarandama daugiausiai energijos:

- Elektrinės – beveik visos pasaulyje egzistuojančios elektrinės naudoja tą patį elektros energijos gavimo būdą, tai yra šiluma verčiama elektros energija. Nesvarbu koks kuras yra naudojamas, tai gali būti ir dujomis ar garais veikiančios turbinos, kurios konvertuoja karštį į mechaninę energiją, kuri savo ruožtu gamina elektros energiją. Tokiu būdu gauta elektros energija apytiksliai praranda 2/3 visos įeinamos galios, nes ši energija prarandama šilumos pavidalu.
- Kompiuterija ir mikrobangos (iš principo visi įrenginiai naudojantys elektros energiją) – energija prarandama šilumos pavidalu arba vibracijų.

Iš principo visos skirtingo tipo energijos rūšys gali būti absorbuojamos ir paverčiamos į elektros energiją, tereikia skirtingiems energijos šaltiniams naudoti tam skirtas medžiagas. Pagrindiniai yra du energijos šaltiniai, kurie yra sutinkami dažniausiai ir praktiškai visur:

- Vibracijos, judėjimas ir garsas gali būti aptinkami ir pakeičiami į elektros energiją, naudojant pjezoelektronines medžiagas
- Šiluma gali būti aptinkama ir paverčiama į elektros energiją naudojant termoelektronines ir piroelektronines medžiagas.

Pastaruju metu yra juntamas itin didžiulis susidomėjimas itin plonų organinių plėvelių panaudojimo galimybe, nes jos turi itin didžiulę technologinę naudą optoelektronikoje. Plonytes organines plėveles yra gana paprasta užauginti tiek dideliais, tiek mažais ploteliais. Jau pakankamai gerai visiems yra žinomos tokios organinių medžiagų funkcionalumo panaudojimo galimybės kaip organiniai šviesos diodai, kurie pastaruju metu yra itin atpigę, fotodetektoriai naudojantys organines medžiagas, optiniai elementai, aktyvūs elektronikos loginiai komponentai ir daugybė kitų pagrindinių elektronikos įrenginių, tačiau optinės savybės dar nėra taip gerai išnagrinėtos ir suprastos.

Tyrimai parodė, jog galima išvystyti tiek aktyvų tiek pasyvų organinių medžiagų įrenginių naudojimą. Šių atradimų taikymas ne tik įrodė, jog fundamentalieji procesai vyksta organiniuose junginiuose, bet juos galima pritaikyti didžiulei eilei praktinių įrenginių, tokių kaip permatomiems organiniams šviesą išspinduliuojantiems įrenginiams (angl. „OLEDs“), organiniams itin didelės galios lazeriams su itin mažu energijos vartojimu, invertuotiems OLED, organinėms saulės elementams, daugiasluoksniams fotodetektoriams.

Organinių saulės elementų technologija, turi specialaus dizaino ląsteles, kurios konvertuoja šviesą į elektros energiją. Šis konvertavimas atliekamas lygiai tokiu pačiu principu, kaip ir augalai atlieka energijos išgavimą iš saulės šviesos fotosintezės metodu. Energijos išgavimo produktyvumas dar negali prilygti augalų įsisavinamos energijos kiekiui, tačiau tai vis tiek didžiulis postūmis link didesnio energijos kiekio išgavimo ir panašu, jog šiuo metu pasiektas lygis žada daug potencialios naudos nebrangiems ir plačiai naudojamiems įrenginiams.

Ilgą laiką saulės energijos konvertavimo efektyvumas į elektros energiją buvo žemas. Tipiniai silicio pagrindu sukurti saulės elementai šiai dienai gali išgauti viso labo tik 20 – 25 procentus energijos konvertavimo efektyvumo, o tik ką pasirodžiusios organinės saulės elementų karta iškart pasiekė 12% konvertavimo efektyvumą.

Kai buvo išsiaiškinta kaip elektronai elgiasi organiniuose saulės elementuose, sekė, jog elektrono sukimasis gali būti pakeistas, tam kad būtų pagerintas konvertavimo efektyvumas. Išrikiuojant elektronus viena kryptimi, galima išvengti rekombinacijos proceso, o tai leistų organinėms saulės elementams tapti itin gyvybingiems.

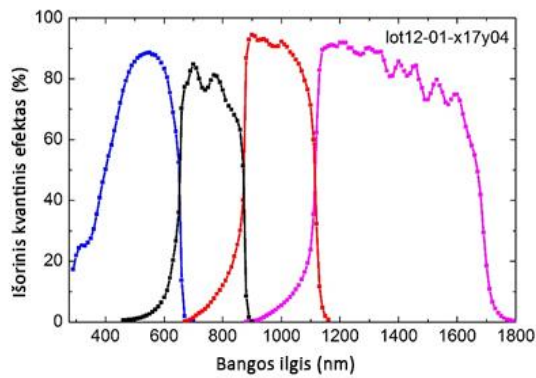
Ši technologija negali apsieiti be sintetinių aukštų savybių turinčių sintetinių medžiagų, naudojamų pagauti ir konvertuoti šviesą į kitą energijos formą. Gerai yra tai, jog šios medžiagos, kurių reikia naujosioms saulės elementų gamybai, yra sąlyginai nebrangios ir išgaunamos greitai, o tai reiškia, jog šio tipo saulės elementai galėtų tapti prieinama preke visiems norintiems juos naudoti, vidutines pajamas gaunantiems asmenims.

Šie organiniai elementai gali būti spausdinami kaip laikraščiai ir susukami į rulonus kaip vyniojamas plastikas, todėl jie gali turėti labai didelį pranašumą vien tik gamybos atžvilgiu, nes tai kur kas spartesnis gamybos procesas nei tipinio silicio pagrindu gaminamo saulės elemento.

2013-aisiais metais buvo pasiektas naujas pasaulio rekordą saulės energijos konvertavime į elektros energiją naujųjų saulės elementų pagalba. Konvertavimo efektyvumas siekė 44,7%. Tai reiškia, jog 44,7% saulės spektro energijos, pradedant ultravioletine, baigiant infraraudonąja šviesa, yra konvertuojama į elektros energiją. Tai milžiniškas žingsnis link to, jog būtų mažinama saulės elementų kainą ir didinamas elementų efektyvumas.

Šie nauji organiniai saulės elementai pasiekia daugiau nei dvigubą efektyvumą lyginant su tradiciniais silicio saulės elementais, kurie naudojami energijai regeneruoti dideliais plotais, saulės šviesa ilgą laiką pasižyminčiuose regionuose. Šiai daugiasluoksniai elementai yra taip vadinami dėl to, jog jie yra pagaminti iš 3-5 skirtingų sluoksnių, visi jie sukrauti vienas ant kito ir kiekvienas iš jų absorbuoja skirtingo ilgio saulės spektro šviesos bangas.

Efektyvumo rekordą pasiekęs saulės elementas buvo sudarytas iš 4- ū sluoksnių. Taigi pritaikius šį naują metodą buvo išgauta optimali puslaidininkų kombinacija, kuri ir pasiekė aukščiausią konvertavimo efektyvumą.



Pav. 3 Išorinis kvantinis efektyvumas 4-ių junginių saulės elemente

Iš aukščiau pateiktos iliustracijos galime matyti, jog kiekvienas saulės elemento sluoksnis gali absorbuoti skirtingų bangos ilgių saulės šviesą.

Apibendrinant galime pastebėti, jog seno tipo silicio saulės elementai gali prarasti rinką, nes naujos organinės, kelių sluoksnių celės turi kur kas geresnį konvertavimo koeficientą, kuris ir yra pagrindinis argumentas konkuruojant šioje rinkoje. Išnaudojant organinės chemijos privalumus galima lipdyti iki 5 skirtingų sluoksnių celes, kurios regeneruos skirtingo bangos ilgio saulės šviesą, kas ir padidina konvertavimo efektyvumą viename elemente.

1.2 Energijos regeneracija iš radijo dažnio

Radijo dažnis paprastai yra išspinduliuojamas kokio nors galingo šaltinio, kuris generuoja stiprias elektromagnetines bangas, aukšto elektromagnetinio lygio signalai gali būti TV signalai, bevielių radijo stočių ir telefono ryšio operatorių bokštai. Taigi, jeigu galime su koku nors įrenginiu aptikti šias elektromagnetines bangas, vadinasi ši nemokama energija atsklinda iki mūsų, belieka tik regeneruoti ją.

Šiam tikslui yra naudojamos tam tikros energijos regeneravimo grandinės, kurios yra sujungtos su antena, kuri ir aptinka norimą radijo signalą ir konvertuoja jį į DC įtampą. Dažniausiai toks principas panaudojamas kaip radijo dažnio identifikavimas, kurio metu įtaisas atpažįsta dažnį ir išsiunčia identifikacijos duomenis į norimą įrenginį, o siuntimui panaudojama ta pati radijo dažnio energija. Sistema, kuri atpažįsta radijo dažnį gaunamą iš antenos yra pagaminta mikrometrų lygmenyje ir gali konvertuoti sklaidžiamas elektromagnetines bangas į žemą nuolatinę įtampą netgi 100m spinduliu. Priklausomai nuo elektromagnetinės energijos spinduliavimo lygmes, kuris kinta dienos bėgyje, energijos konvertavimo grandinė gali būti

prijungta prie kondensatorių, kurie gali išduoti vienodo lygio įtampą sensoriui ir likusiai grandinės daliai, kai tuo tarpu pats sensorius negauna pakankamai energijos iš aplinkos.

Dauguma grandinių naudoja plaukiojančios užtūros tranzistorius kaip diodus, kurie konvertuoja gaunamą signalą į kitos rūšies energiją, bet kai kuriais atvejais tokio būdo gali ir neužtekti, kai kuriems įrenginiams, kurie naudoja aukštesnę įtampą.

Pagrindinis technologinis pranašumas, leidžiantis šį energijos konvertavimo būdą padaryti užtektinu yra šių sensorių platus vystymas leidžiantis išgauti energiją iš plataus dažnių diapazono, ne tik apsiribojant televizijos dažnių juostomis (angl. „UHF“), bet priimant ir labai aukšto dažnio signalus. Kadangi bangos sklaidymas yra išsklaidomas didėjant atstumui nuo bangos skleidžiamo šaltinio, tuomet sensoriai išdėstyti toli nuo šaltinio privalo išgauti energiją iš labai išsisklaidžiusios bangos, kurios energijos tankis yra labai išretėjęs. Šis energijos tankis turi ne tiesinę priklausomybę nuo atstumo.

Tipinė televizijos antena, prijungta prie energijos konvertavimo grandinės ir pastatyta už 4 metrų nuo radijo dažnio bangų šaltinio, kuris generuoja 677MHz dažnio bangas, o galingumas yra 960kW, gali generuoti 0,7V įtampą per 8K omų apkrovą, kuri vartoja apytiksliai 60μW ir to viso labo užtenka tik užmaitinti nedidelį LCD ekranėlį turintį termometrą[4].

Dauguma grandinių reikalauja daugiau nei 0,3V įtampos, tam, kad galėtų pradėti vykdyti elektromagnetinių bangų konvertavimą į kitą energijos rūšį, o tai reiškia, jog atsklindanti elektromagnetinė banga privalo būti bent jau 1mW. Šita riba buvo visai nesunkiai pasiekta „Nokia“ inžinierių, o visai netrukus jų konvertavimas padidėjo 5 kartus. Konvertuojamos energijos pakanka, kad lėtai būtų iškraunama ličio jonų baterija, kai telefonu yra nesinaudojama ir tik tuo atveju, kai konvertavimo grandinė yra itin arti telefono antenos.

Apibendrinant energijos regeneraciją iš radijo dažnio galime pastebėti, jog regeneruojamos energijos tankis turi netiesioginę priklausomybę nuo atstumo, todėl galima daryti išvadą, jog didėjant atstumui regeneruoti energiją iš radijo darosi nebeįmanoma, nes energijos tankis mažėja ne tiesiniu dėsniu. Radijo dažnis pasiekiamas praktiškai visur, tačiau tai nėra geriausias sprendimas įrenginiuose, kurie reikalauja daugiau energijos sąnaudų. Kol kas šis regeneracijos koeficientas yra labai mažas, todėl retai kur naudojamas dėl mažo konvertavimo efektyvumo.

1.3 Energijos regeneracija iš NFC

Prieš kelis metus rinkoje pasirodė nauji atminties lustai, kurie regeneruoja energiją iš NFC(angl. „Near Field Communication“) ir RFID, o su išgauta energija galima užmaitinti mažai energijos reikalaujančius įrenginius, o tai reiškia, jog baterijų ir kitų su maitinimo elementu susijusių elementų būtų galima atsisakyti.

Rinkoje galima rasti keletą puslaidininkinės elektronikos komponentų gamintojų, kurie į rinką išleido NFC lustus, kurie regeneruoja energiją iš aplinkos ir užmaitina tame pačiame luste esantį įrenginį, tokiu būdu yra atsisakomas bet koks išorinis maitinimo šaltinis.

Toliau analizuojamas ST lusto[8] pagrindinės savybės yra mažos galios I²C sąsaja ir 13,56MHz RD(angl. „Radio Frequency“) sąsaja ir būtent ši RD sąsaja regeneruoja aplinkoje esančias radijo bangas, kurias skleidžia RFID skaitytuvai/imtuvai(turintys ISO 15693 protokolą) ir konvertuoja šią energiją į elektros energiją, kuri gali būti panaudojama maitinti kitus elektronikos komponentus.

M24R16E lustai yra dalis ST dvigubos sąsajos bevielės atminties grupė. Šie lustai yra sąsaja tarp išmaniųjų telefonų, turinčių NFC (ISO 15693) ir kitų elektroninių įrenginių. Šis ryšys leidžia tiesiogiai perduoti duomenis iš elektroninio įrenginio į išmanųjį telefoną ar kitą RFID įrenginį. Lustas elgiasi kaip įprastas skaitytuvas, tačiau turi ir laidinę sąsają. Dažnu atveju tokio tipo lustai integruojami į vartotojiškus įrenginius bei sveikatos priežiūros įrenginius. Vartotojas gali surinkti duomenis tiesiogiai naudodamas tik išmanųjį telefoną, turintį NFC sąsają. Tai gali būti kraujo spaudimo parodymai ar temperatūriniai parodymai.

Šitoks energijos šaltinio pasirinkimas išsprendžia didelę projektuotojų problemą baterijos klausimais dėl baterijos dydžio, mažos vietos įkomponavimui, padidėjusių išlaidų, didelio svorio. Mažinant projektuojamojo įrenginio svorį atsisakant laidų, panaikinant krovimo grandines ar baterijos keitimo būtinybę, šis naujas energijos išgavimo būdas garantuoja visapusišką naudą naujai kuriamam įrenginiui.

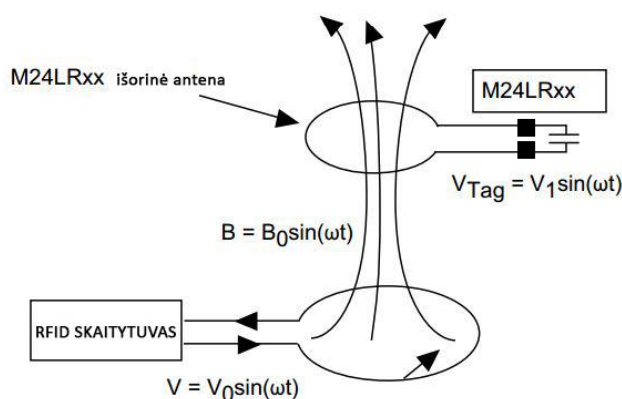
Į M24LR lusto duomenys gali būti įrašomi arba nuskaityti naudojant RFID skaitytuvą ar NFC sąsają turintį išmanųjį telefoną ir turi būti integruota papildoma galios valdymo grandinė, kad išgauta energija būtų pasiekama kitiems įrenginiams ant tos pačios plokštės. Nominalus tos grandinės išėjimas yra nuo 1,7 iki 2,3 volto, kas leidžia turint tokią įtampą maitinti daugumą įrenginių, kurie naudoja žemos įtampos KMOP (angl. CMOS) lustus.

Bevielis ryšys bet kokių atveju reikalauja antenos, kuri gali būti nesunkiai realizuota ant spausdinto montažo plokštės. Gaunama energija iš išorinio įrenginio tiesiogiai priklauso nuo RD skaitytuvo atiduodamos energijos, kuri priklauso nuo atstumo tarp skaitytuvo ir atminties lusto antenos. Atminties lusto (angl. „EEPROM“) režimas gali būti įjungtas arba išjungtas, o atiduodama maksimali srovė išėjime siekia nuo $300\mu\text{A}$ iki 6mA , kurią galima apriboti nustatant atitinkamus registrus.

Integruojant M24LR lustą į naujai kuriamą įrenginį nėra jokių papildomų reikalavimų susijusių su I²C sąsaja, ji naudojama kai įprastinė sąsaja visuose EEPROM lustuose, tačiau norint naudoti RD sąsają, privalu prie lusto prijungti išorinę induktyvinę anteną. RD sąsajos pagalba yra perduodami įvairūs duomenys, tokie kaip kodo duomenys, parametrai, ID ir kiti. Šio lusto antenos projektavimas yra pagrįstas viena pagrindine sąlyga: antenos induktyvumo suderinimas su lusto viduje esančiu paderinamo kondensatoriaus talpa taip, jog būtų gautas 13,56MHz rezonansinis dažnis.

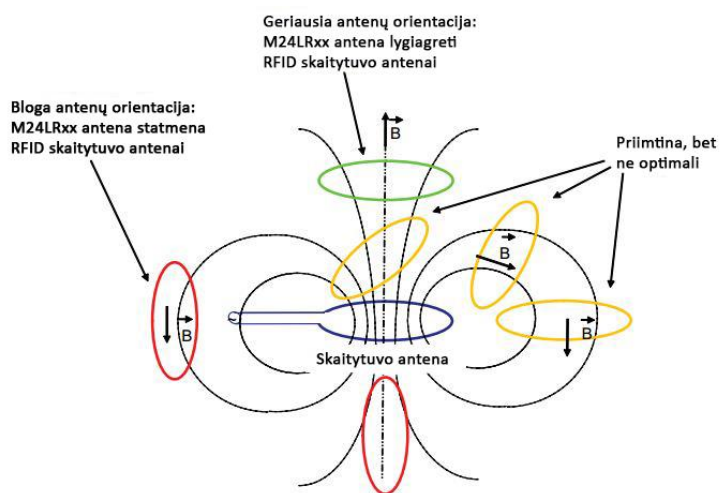
RFID skaitytuvas veikia kaip pirminė transformatoriaus apvija, kuri indukuoja antrinę apviją, kuri šiuo atveju yra M24LR04E lusto antena. Šių dviejų apvijų santykis turi tokį patį ryšio koeficientą kaip ir transformatoriuje esančios apvijos. Šis ryšys susideda iš kelių faktorių:

- Tinkamas M24LR04E antenos suderinimas nešlio dažniui (13,56MHz)
- Atstumas tarp skaitytuvo ir PCB antenos
- Skaitytuvo antenos ir PCB antenos dydžio
- Skaitytuvo galia
- PCB antenos padėtis su skaitytuvo antena



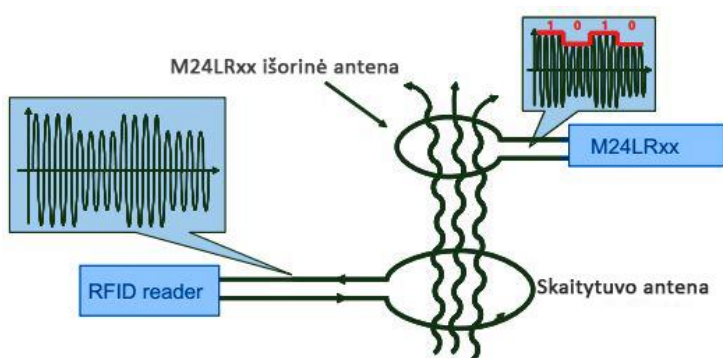
Pav. 4 RFID skaitytuvo atiduodama galia į M24LRXX [7]

Kai M24LRXX atsiduria RFID skaitytuvo elektromagnetiniame lauke, galios perdavimo kiekis tiesiogiai priklauso nuo M24LRXX antenos padėties su RFID skaitytuvo antena. Iš principo ši energija priklauso nuo to, kaip skaitytuvo kuriamos elektromagnetinio lauko linijos sklinda per M24LRXX anteną, o nuo to priklauso skaitymo atstumas. Geriausias antenų suderinamumas pasiekiamas kai antenos yra lygiagrečiai ir viena priešais kitą. Skaitymas gali visiškai nutrūkti, kai abi antenos yra statmenos viena kitai. Bet kokia kita antenų orientacija tarpusavyje gali lemti skirtingą veikimo atstumą.



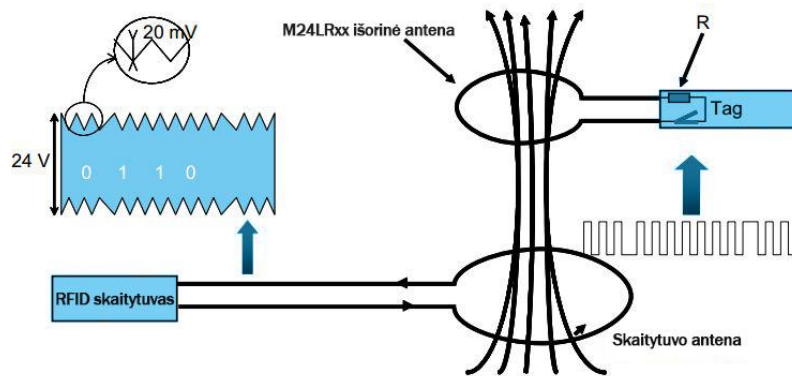
Pav. 5 Energijos perdavimo priklausomybė nuo RFID skaitytuvo ir M24LRxx antenų orientacijos

M24LRxx integruota grandinė, padėta į RFID skaitytuvo elektromagnetinį lauką demoduliuoja skaitytuvo siunčiamą informaciją.



Pav. 6 Duomenų siuntimas iš RFID skaitytuvo į M24LRxx

Tam, kad skaitytuvas gautų atsaką, M24LRxx atgal siunčia duomenis, keisdamas išėjimo impedansą (didindamas ir mažindamas), kuris yra aptinkamas skaitytuvo.



Pav. 7 Duomenų siuntimas iš į M24LRxx į RFID skaitytuvą



Pav. 8 M24LR duomenų gavimas iš RF siųstuvo

Įvertinę energijos regeneraciją NFC pagrindu galime pastebėti, jog duomenų perdavimui labai didelę įtaką turi antenų suderinamumas, kitaip tariant, jei antenos bus netinkamai orientuotos viena į kitą, duomenų perdavimas gali iš viso neįvykti, nes regeneruotos energijos kiekis bus tiesiog per mažas. Nors šis energijos regeneravimo sprendimas atrodo palankus maitinti grandines, tačiau šis atvejis tinkamas tik NFC sistemoms, skirtingose aplinkose šis sprendimas nepriimtinas. Regeneruota energija taipogi yra gana maža, vos 6mA, lyginant su Bluetooth 4.0 duomenų paketo siuntimui naudojama energija.

1.4 Aktyvūs ir pasyvūs RFID

Aktyvūs ir pasyvūs RFID yra visiškai skirtingu pagrindu veikiančios technologijos, kurios kartais, yra vertinamos kaip lygiavertės. Nors abi technologijos ir naudoja radijo dažnio energiją komunikavimui tarp siųstuvo ir imtuvo, tačiau siųstuvo maitinimo metodas yra visiškai skirtingas. Aktyvūs RFID naudoja vidinį energijos šaltinį, dažniausiai bateriją, kuris nuolat

maitina siųstuvą ir siųstuvo komunikavimo grandinę. Tuo tarpu pasyvūs RFID priklauso nuo RD energijos perduodamos pačio siųstuvo maitinimui.

Pasyvūs RFID reikalauja kur kas stipresnio signalo iš skaitytuvo, o grąžinamas signalas iš siųstuvo paprastai būna labai silpnas. Aktyvūs RFID leidžia labai žemo lygio signalams pasiekti RFID'ą nes skaitytuvas neturi maitinti siųstuvo, o pats siųstuvai gali generuoti aukšto lygio signalus atgal į skaitytuvą. Aktyvūs RFID'ai visada būna užmaitinti nepriklausomai nuo to ar jie yra skaitytuvo matymo lauke ar ne, taip pat aktyvūs RFID'ai gali veikti kaip „švyturėliai“ arba gali inicijuoti skaitytuvą arba aktyvuoti kitus siųstuvus esančius jų matymo lauke. Siųstuvai ima siųsti duomenis įvykus tam tikriems pasikeitimams susijusiems su grandine prijungta prie siųstuvo. Prie aktyvaus siųstuvo gali būti prijungtas išorinis temperatūros sensorius, drėgmės, judesio ar bet koks kitas skirtingas būsenas aptinkantis sensorius.

Žemiau pateikiame pagrindinius aktyvaus ir pasyvaus RFID siųstuvo palyginimus[5]:

Lentelė 1 Aktyvaus ir pasyvaus RFID palyginimai

	Aktyvus RFID	Pasyvus RFID
Maitinimas	Baterija	Nėra vidinio maitinimo
Reikiamas signalo lygis	Žemas	Aukštas
Ryšio nuotolis	Ilgas nuotolis (100m+)	Trumpas nuotolis (3m)
Vieno siųstuvo kaina	15-100 €	0,15 – 5€
Siųstuvo dydis	Priklauso nuo įrenginio	Dažnai kredito kortelės dydžio
Pritaikymas industrijoje	Automobilių prekyba, gamyba, ligoninėse - įrangos sekimui, statybos darbų stebėjimui, laboratorijose, nuotoliniam stebėjimui, IT sistemų valdymas	Tiekimo grandinėse, didelės apimties gamyboje, bibliotekose/knygynuose, farmacija, pasai, elektroninėse rinkliavos punktuose, lygio stebėjimui

Kadangi visi aktyvūs siųstuvai reikalauja vidinės baterijos, iškyla poreikis, jog ši baterija būtų pakraunama nuo išorinių šaltinių, nes aktyvūs siųstuvai laikui bėgant išsikrauna ir to pasakoje reikia keisti bateriją. Todėl toks metodas nelabai tinkamas kai reikia sunkiai prieinamose vietose matuoti norimus parametrus, pavyzdžiui kelio temperatūrą gilesniuose sluoksniuose.

Iš esmės aktyvieji RFID siųstuvai yra skirstomi į dvi pagrindines grupes: siųstuvai ir imtuvai. Aktyvieji RFID atsakikliai bendrauja su imtuvu tik tada, kai yra tiesioginiame imtuvo lauke ir gauna imtuvo signalą, jog reikia atsakyti. Tokiu būdu taupoma baterija kai atsakiklis yra

ne skaitytuvo lauke. Aktyvieji RFID atsakikliai dažniausiai yra naudojami saugios prieigos sistemose valdymui ir įvairiuose atsiskaitymo taškuose.

Apibendrinant energijos regeneracijos iš aplinkos būdus galime pastebėti, jog visi paminėti būdai reikalauja specifinių žinių norint realizuoti sistemą, kuri regeneruos ir naudos šią energiją. Vienais atvejais energija yra išgaunama mažesniais kiekiais, kitu didesniais, tačiau kombinuojant jau žinomus būdus galima pasiekti naują energijos regeneravimo efektyvumą kaip pavyzdžiui regeneruojant saulės energiją panaudojant kelių skirtingų sluoksnių organines medžiagas, kurios regeneruoja energiją iš skirtingų saulės šviesos spektro bangų ilgio. NFC regeneravimo atveju pastebėjome, jog regeneruojamas energijos kiekis priklauso nuo antenų tarpusavio padėties. Svarbiausia žinoti kiek projektuojama sistema sunaudos energijos, tik tai įvertinus galima rinktis energijos regeneracijos būdą, be abejo, reikia įvertinti aplinką, kurioje vyks regeneracija.

1.5 ANT tinklo savybės

ANT tinklo technologija yra labai žemos galios(angl. „ultra low power“), nedideliu atstumu veikianti bevielė technologija, skirta daviklių tinklams ir panašioms tikslams. Ši technologija taip pat naudoja 2,4GHz ISM dažnių juostą, o patentuotas protokolas yra sukurtas Kanadoje „Dynastream Innovations Inc.“ kompanijos, tai yra dukterinė „Garmin“ įmonė. Iki šiol pirminis taikymas buvo sporto ir fitneso srityse, įgyvendinant kūno erdvės tinklą, atliekant sveikatos stebėseną.

ANT naudoja labai trumpų ciklų technologiją ir gilus miego režimus, tam, kad užtikrintų itin žemą energijos suvartojimą. Tokiu būdu įtaisas gali veikti kelis metus naudodamas tik monetos tipo bateriją. Kiekvienas ANT tinklo mazgas gali veikti kaip siųstuvai arba kaip koordinatorius – siųstuvai/imtuvai, taip pat gali atlikti kartotuvo funkciją.

ANT protokolas yra pritaikytas naudoti vienintelį 1MHz kanalą keliems mazgams, panaudojant laiko dalijimo(sutankinimo) principą. Kiekvienas mazgas siunčia duomenis tik savo nustatytu laiko momentu. Paprastai siunčiamos žinutės ilgis trunka vos 150 μ s, kai tuo tarpu tarpai tarp siunčiamų pranešimų trunka nuo 0,5Hz iki 200Hz su 8 bitų naudingąją apkrova pranešimui. Taipogi yra naudojamas 16 bitų CRC klaidų aptikimui. Teoriškai įmanoma turėti 65 536 laiko plyšius viename kanale. Jeigu yra pastebimi triukšmai, galimas siųstuvų kanalų perjungimas panaudojant GFSK moduliaciją.

Pastarųjų metų bėgyje atsirado ir naujas ANT papildymas – „ANT+“. Tai programinis papildymas suteikiantis sąveiką valdomiems tinklams. Jis palengvina duomenų rinkimą, atsiranda automatinis duomenų perdavimas, jutiklių duomenų stebėjimas, visų tinklo mazgų stebėjimas. Dar viena ANT tinklo ypatybė yra „SensRcore“, padedanti naujiems kūrėjams kurti itin mažos galios jutiklių tinklus.

1.6 Bluetooth 4.0 (LE – low energy)

„Bluetooth“ technologija šiuo metu yra globalus bevielio ryšio standartas, suteikiantis patogų greitą ir saugų duomenų perdavimą tarp gausybės besivystančių elektroninių įrenginių. Dar 1994 metais ši technologija buvo sukurta Ericsson kompanijos ir pradėta naudoti kaip pakaitalas RS-232 duomenų kabeliams. Paprastai kalbant, tai technologija, kuri keičiasi duomenimis trumpu atstumu, naudodama radijo bangas. „Bluetooth“ technologija veikia nelicencijuotoje, industrinėje, mokslinėje ir medicininėje (IMM) dažnių juostoje nuo 2,4GHz iki 2,485GHz, naudodama paskirstytą dažnį, dažnio šokinėjimą, pilno „duplekso“ signalą prie nominalaus lygio, kuris yra 1600 šuolių per sekundę. Daugelyje šalių 2,4GHz IMM(ISM) dažnių juosta yra nelicencijuojama.

Technologija veikdama šiame radijo dažnio diapazone gali būti realizuota tik nedideliu atstumu iki 100 metrų, todėl skirta labiau naudoti kuriant individualų ryšio tinklą pvz. namuose.

Ši „bluetooth „ karta yra suskirstyta į dvi grupes:

- Bluetooth Smart Ready
- Bluetooth Smart

Tam, kad lengviau suprastume kodėl 4-os kartos „Bluetooth“ technologija buvo atskirta į dvi dalis, pirmiausia reikia prisiminti kuo pirmosios „Bluetooth“ kartos buvo nedėkingos. Kone pati didžiausia problema buvo didžiulis baterijos eikvojimas ir nuolatinis įrenginių susiejimas bei atsiejimas. Paskutinės kartos „Bluetooth“ 4.0 suprojektuota atsižvelgiant į labai dažną įrenginių susiejimų skaičių, todėl iškilo poreikis kurti išmanesnę įrenginių susiejimo būdą, nes tokių būdų būtų galima sutaupyti didelę dalį energijos. Naujoji karta pabrėžiama kaip technologija išlaikanti pastovų duomenų srautą, vietoje to, jog siųstų didelius kiekius duomenų, duomenys siunčiami mažomis dalimis tam tikru momentu kai to reikia, o kai duomenys nebesiunčiami, yra pereinama į miego režimą.

Kai yra susiejami du įrenginiai, turintys „Bluetooth“ 4.0 technologiją, abu kartu jie suvartoja kur kas mažiau energijos, nes susietieji įrenginiai yra perėję į miego režimą, išskyrus tuos atvejus, kai yra persiunčiamos svarbios duomenų dalys. Ankstesnėse „Bluetooth“ versijose paprastesnis sprendimas būdavo išjungti šį modulį, kad jis nenaudotų energijos. Šiuo metu atskira šios technologijos grupė yra pasiekusi 1-2 metų standartinės išmaniojo telefono baterijos tarnavimo trukmę, naudojant „Bluetooth“ 4.0 modulį.

„Bluetooth Smart Ready“

„Smart Ready“ įrenginiai yra „Bluetooth“ įrenginių grupė, kuriai priklauso tokie įrenginiai kaip išmanieji telefonai, nešiojami kompiuteriai ir planšetiniai kompiuteriai, kurie gali priimti ir dalytis duomenimis „Bluetooth“ srautu, tokie kaip garsiakalbiai, ausinės, sporto inventorius, širdies dažnio matuokliai, elektroniniai termometrai ir kita. „Bluetooth Smart Ready“ reiktų įsivaizduoti kaip „master“ įrenginį, kuris siunčia ir gauna duomenis iš aplink esančių „slave“ įrenginių.

„Bluetooth Smart“

Naudojantis ta pačia imtuvų ir siųstuvų analogija, būtų galima šiuos įrenginius vadinti siųstuvų įrenginiais. Šie periferiniai įrenginiai jungiasi prie imtuvų, „Bluetooth Smart Ready“ ir siunčia jiems duomenis. Šie periferiniai įrenginiai gali likti prisijungę prie „master“ įrenginių visą laiką, nes kol nevysta joks duomenų perdavimas, tol įrenginys nenaudoja energijos, todėl gali likti prisijungęs ištisas valandas ar net dienas. Kadangi technologija suprojektuota taip, jog nesant duomenų srautui, įrenginys būna miego režime, tai šiame režime jis gali išbūti neribotą laiką. Taipogi iš miego režimo įrenginys pabunda momentaliai, yra susietas ir pasiruošęs dalytis duomenimis su „Bluetooth Smart Ready“ įrenginiu [12]. Tokie įrenginiai kaip širdies dažnio matuoklis gali būti paruošti taip, jog tik pasiekus tam tikrą širdies plakimo dažnį, įrenginys ims siųsti duomenis į „master“ įrenginį, analogiškai tą patį gali daryti ir temperatūros davikliai, kurie gali siųsti duomenis tik nuo tam tikros nustatytos ribos, bet prisijungę bus ištisas dienas.

Kadangi abi technologijos naudojamos panašiems tinklams realizuoti, galime jas palyginti.

Lentelė 2 ANT ir BLE palyginimas pagal pagrindinius parametrus

Technologija	ANT	Bluetooth Low Energy
Dažnis	2,4 – 2,483 GHz	2,4 – 2,483 GHz
Topologijos	P2P, žvaigždės, medžio, tinklelio	P2P, žvaigždės
Moduliacija	GFSK	GFSK

Kanalo plotis	1 MHz	2 MHz
Protokolas	Paprastas	Komplikuotas
Duomenų srautas	1 Mbit/s	1 Mbit/s
Veikimo atstumas	50 metrų	50 metrų
Saugumas	64 bitų raktas	128 bitų AES

Apibendrinant šį skyrių galime pastebėti, jog ne visais atvejais yra tokios pat sąlygos, kad energijos yra daug ir galime jos netaupyti, neatsižvelgti kiek jos sunaudojama, todėl iškyla problema dėl energijos šaltinio, jeigu kuriamai sistemai bus naudojamas neatsinaujinantis energijos šaltinis, tai kiek laiko toks šaltinis tarnaus, o jei bus naudojamas atsinaujinantis energijos šaltinis, energijos regeneracija iš aplinkos, tai ar bus užtikrintas neapibrėžties momento anuliuavimas. Ši problema nėra nauja ir nežinoma, tai problema, kuri egzistuoja nuo pat puslaidininkinės elektronikos gyvavimo pradžios, kurios sprendimai tik dabar atrodo tinkami.

Apžvelgus bevielių jutiklių struktūras galime pastebėti, jog patys paprasčiausi ir dažniausiai naudojami išlieka „P2P“ tinklai, kai yra jungiami tik du jutikliai tarpusavyje. Palyginus šių tinklų savybes pastebimas panašus veikimo scenarijus, kai protokolas cikliška pereiną į miego režimą, todėl abu protokolai tarpusavyje gali būti lyginami išsamiau.

2. Mažos galios radijo perdavimo sistemų architektūra

Bevielių tinklų pasiūla rinkoje yra pakankamai didelė, tačiau ne visi tinklai yra projektuoti naudoti kuo mažiau energijos. Žemiau pateikiami dažniausiai naudojami bevieliai tinklai[13]:

- Wi-Fi 802.11
- ZigBee
- Z-Wave
- ANT
- Bluetooth
- WirelessHART/Dust Networks
- ISA 100a
- Keletas versijų 802.15.4
- Keletas mišrių ISB (angl. „Industrial, scientific and medical“) juostoje veikiančių patentuotų versijų.

Tačiau ne visi tinklai gali būti toliau nagrinėjami dėl savo didelio galios suvartojimo, tik visai nedidelė dalis gali būti pritaikomi bevielių jutiklių tinklams.

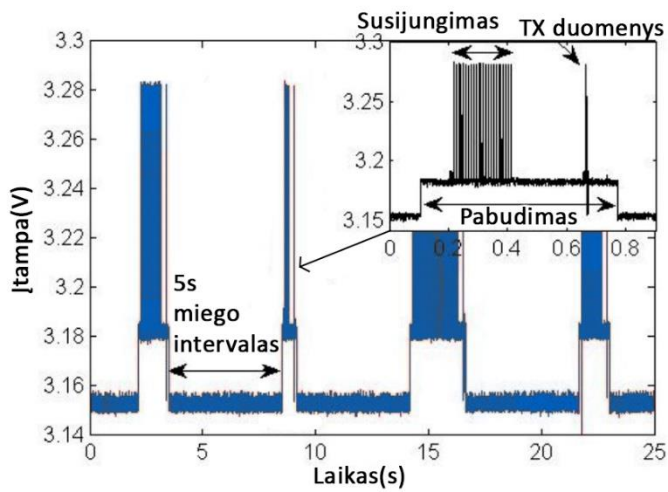
Toliau nagrinėsime tris gana dažnai visur sutinkamus bevielius mažos galios protokolus tokius kaip Bluetooth Low Energy(BLE), ZigBee ir ANT, kurie cikliška pereiną į miego režimą, kurio metu trumpo veikimo nuotolio ir mažos galios bevielis jutiklis periodiškai siunčia duomenų paketus į nutolusį bendrą imtuvą, kuris sutrikdo miego režimą. Dažnu atveju toks įrenginys kaip nešiojamas širdies veiklos matuoklis, naudoja tokio tipo scenarijų, kuris surišamas su mobiliajame telefone esančiu BLE moduliui, kuris veikia kaip imtuvas. Didžiausias srovės suvartojimo skirtumas pastebimas kai įrenginys yra susiejamas su kitu įrenginiu, centriniu įrenginiu – imtuvu, o taip būna pereinant iš miego režimo į duomenų siuntimo režimą. Taigi visiems trimis protokolams svarbiausias dalykas yra nustatyti miego režimo intervalus taip, kad būtų rastas optimalus taškas, kurio metu duomenų siuntimo srautas ir galios suvartojimas būtų optimizuoti.

Atliksime eksperimentą su trimis žemos galios standartais: ANT, BLE ir ZigBee. Visų trijų standartų vertinimas pagrįstas tuo, jog visais trimis atvejais duomenų paketų siuntimas vyksta cikliška, kaip ir perėjimas į miego režimą. Toliau yra vykdomi eksperimentiniai nustatymai ir ieškomas optimalus miego režimas, kuris būtų subalansuotas tarpusavyje su mažos galio vartojimu ir duomenų perdavimo srautu. Šio eksperimento rezultatai turėtų būti atrama renkantis radijo dažnio perdavimo sistemą. Žemiau yra pateikiama lentelė su visų trijų protokolų eksperimentiniais parametrais:

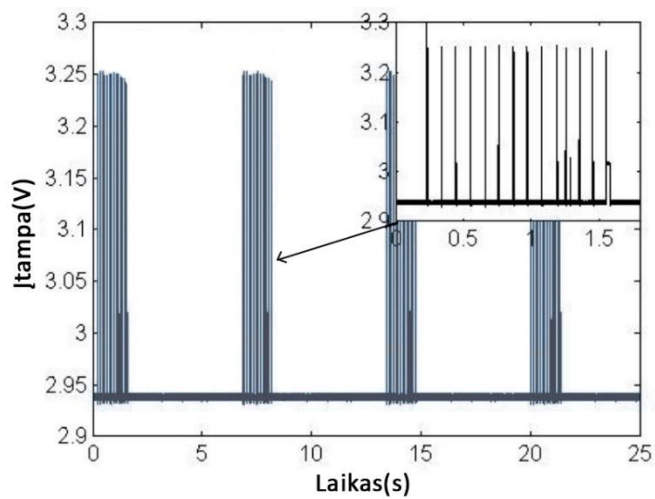
Lentelė 3 Modulių charakteristikos

	BLE	ZigBee	ANT
RX jautrumas	-87dbm	-102dBm	-85dBm
TX galia	0dbm	0dbm	0dbm
Dažnio šuoliai	Taip	Ne	Ne
Dažnis	2.4GHz	2.4GHz	2.4GHz
Periodas tarp duomenų paketų	100ms	100ms	250ms
Siųstuvo lustas	nRF51822	XBee S2	AP2

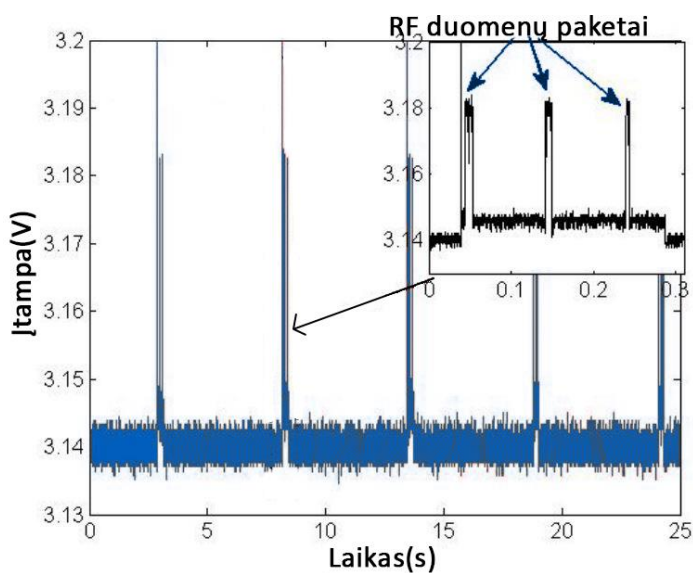
Pirmiausia MGBJ buvo užprogramuoti cikliškam perėjimui į miego režimą iš kurio pabundama persiūsti 8-ių baitų duomenų paketą kas 5, 10, 30, 60 ir 120 sekundžių. Žemiau yra pateiktos diagramos, kuriose matome, jog miego režimo trukmė buvo vykdyta kas 5 sekundes ir yra matuojamas įtampos kritimas ant apkrovos varžos.



Pav. 9 ANT protokolo įtampos kritimo diagrama, kai cikliškas pabudimas yra 5s. Iššokantys spygliai yra atvaizduojami kaip srovės šuoliai pereinant iš miego režimo, nusistovėjusios įtampos reikšmės atvaizduoja miego režimą.



Pav. 10 BLE protokolo įtampos kritimo diagrama, kai cikliškas pabudimas yra 5s



Pav. 11 ZigBee protokolo įtampos kritimo diagrama, kai cikliškas pabudimas yra 5s

Reikia paminėti, jog pabudimo laikai nėra tiksliai nurodyti, todėl vietoje to buvo matuojamas laikas, kurio reikia siūstuvui prisijungti prie imtuvo ir išsiųsti duomenų paketą. Kiekvienu atveju siūstuvai buvo nustatyti taip, jog naudotų kuo mažiau energijos, o tai atlikta sumažinus perduodamų duomenų kiekį ir padidinus miego režimo laiko tarpą iki maksimalaus. Priešingai buvo pasielgta su imtuvu. Jis buvo nustatytas taip, kad nustatytų susiejimą su siūstuvu taip greitai, kaip tik galima skenuojant ir ieškant naujo įrenginio.

2.1 Neapibrėžties būseną atiduodant regeneruotą energiją į apkrovą

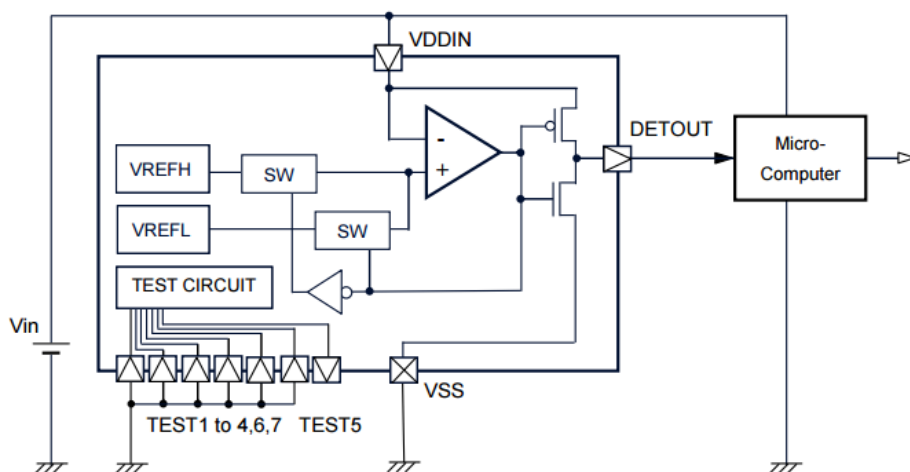
Neapibrėžties būsenos klausimas nėra aktualus kai yra kalbama apie bevielio jutiklio neriboją energiją, kai jutiklis turi neišsenkamą energijos šaltinį ir gali nesirūpinti sunaudojama energija, arba generuojama energija yra didelė ir akumulatorius visada būna įkrautas. Tačiau yra atvejis, kai jutiklis neturi talpaus maitinimo šaltinio, todėl energiją privalo susigeneruoti iš aplinkos anksčiau minėtais būdais. Viskas lyg ir būtų gerai, jeigu sugeneruojama energija visada būtų didelė ir užtektina kiekvienam bevielio jutiklio siuntimo įvykiui atlikti, tačiau dauguma atvejų generuojama energija būna itin maža, todėl būtina ją kaupti, nes priešingu atveju jutiklis ims sudirbinėti ne laiku, kai nėra garantuotas pakankamas energijos lygis.

Iš esmės visi jutikliai turi vieną ir tą pačią problemą – neapibrėžties būseną. Tai tokia būseną, kai lustas pabudimo metu yra pareikalaujama labai didelis energijos kiekis lyginant su miego režimo naudojama energija, todėl nėra aišku ar lustas sukongūruos visą periferiją ir ar pavyks išsiųsti reikiamus duomenis, ar nesibaigs sukaupta energija. Šią problemą spręsti būtina, todėl rinkoje atsirado keletas įvairių gamintojų produktų, skirtų kaupti energiją ir ją atiduoti į apkrovą tik pasiekus tam tikrą reikiamą lygį, kad būtų išvengta užsigeneravimo lusto konfigūravimo momentu. Pati neapibrėžties būseną yra tokia, būseną, kai lustas bando pabusti iš miego režimo ir pereiti į kitus aktyvaus režimo etapus, tačiau dėl didžiulio srovės šuolio pabudimo metu nebėra daugiau sukauptos energijos tolimesniems etapams vykdyti ir aktyvūs lusto laikas baigiasi, vėl pereinama į miego režimą, sekantį pabudimo momentu įvyksta vėl tas pats ir lustas tokiu būdu negali išsiųsti jokių duomenų, nes taip ir nėra prašokama pradinio srovės lygio.

Vienas labiausiai rinkoje išsiskiriančių energijos regeneracijos iš aplinkos keitiklių gamintojų yra AKM, kuris siūlo pakankamai gerų sprendimų šiai problemai spręsti. AKM lustai skirti energijos iš aplinkos regeneracijos monitoringui turi žemas energijos suvartojimo charakteristikas ir jų gaminami lustai turi itin mažą įėjimo įtampą, nuo kurios šis lustas ir

pradedą veikti. Lustai gali tiekti energiją įvairiems jutikliams ir bevielams įrenginiams, kurie energiją generuoja labai mažais kiekiais vien iš kambario šviesos. Šie lustai suteikia saugų energijos saugojimo ir panaudojimo galimybes.

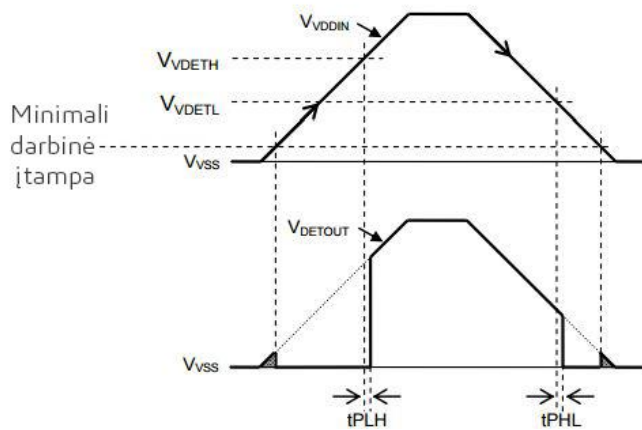
Vienas labiausiai vertinamų AKM integruotųjų grandynų yra itin žemos įtampos detektorius AP4400, kuris turi labai žemas suvartojamos srovės charakteristikas, kurios siekia vos 20nA, o kylančio ir krentančio fronto detekcijos lygmuo (angl. „treshhold“), siekia 0,1V. Detektuojamos įtampos mažiausias ir didžiausias histerezė lygmenys yra pasirenkami nuo 200mV iki 2.4V, todėl šitoks platus detektuojamos įtampos pasirinkimas yra idealus energijos regeneracijos įtaisams, nešiojamiesiems įrenginiams ar IoT prietaisams[14]. Lusto atiduodama įtampa į apkrovą yra nuo 0,8V iki 5,5V. Žemiau yra pateikiama šio įtampos detektoriaus taikymo schema[10]:



Pav. 12 Tipinė lusto taikymo schema

Tipinio pritaikymo atveju, kai yra detektuojamas kylantis įtampos frontas (V_{VDDIN}) ir jis yra tarp V_{VSS} ir minimalaus IC (angl. „integrated circuit“) veikimo įtampos, V_{DETOUT} išėjimas yra begalinis (uždarytas). Tada, kai V_{VDDIN} aukščiau minimalios IC ribos, tada V_{DETOUT} atidaro V_{VSS} . Paskutiniu etapu, kai V_{VDDIN} yra pasiekęs V_{VDETH} , tada V_{DETOUT} atidaro V_{VDDIN} .

Kitu atveju, kai yra detektuojamas krentantis įtampos frontas (V_{VDDIN}) ir jis yra aukščiau V_{VDETH} , tada V_{DETOUT} atidaro V_{VDDIN} . Kai V_{VDDIN} yra žemiau V_{VDETL} , tada V_{DETOUT} atidaro V_{VSS} . O kai V_{VDDIN} yra žemiau minimalios IC operavimo įtampos, tada V_{DETOUT} yra begalinis (uždarytas). Žemiau yra pateikta veikimo diagrama.



Pav. 13 Lusto veikimo etapai priklausantys nuo įtampos lygio

Apžvelgus rinkoje esančius įtampos detektorius buvo rastas vos 20nA srovę naudojantis lustas, kurio gamyba prasidėjo dar tik šiais metais. Tai lustas, kuris regeneruojamą energiją atiduoda į apkrovą tik tuo momentu, kuriuo nerizikuojama užciklinti bevielio jutiklio starto. Šis metodas pagrįstas histerezės principu, todėl sukauptos energijos atidavimas į apkrovą yra apsaugoma nuo įtampos svyravimo regeneracijos metu. Lyginant su kitų gamintojų lustais, būtent šis turėjo tokią mažą sunaudojamą srovę(20nA), kuri praktiškai nebeturi jokios įtakos toliau nagrinėjamiems itin žemos galios jutikliams, kai tuo tarpu kitų gamintojų panašūs lustai deklaruojami naudojantys 3μA srovę, o tai jau yra itin daug lyginant su prieš tai minėtu variantu.

2.2 Būdai mažinantys suvartojamą energiją Bluetooth Low Energy luste

Tiksliam srovės apskaičiavimui reikalingi šie pagrindiniai parametrai:

- 32kHz kvarcinio rezonatoriaus tikslumas arba vidinio RC rezonatoriaus tikslumas
- Maitinimo įtampa
- Išsiuntimo (TX) galia

Tačiau norint apskaičiuoti tikslų srovės suvartojimą tam tikrais esminiais momentais, reikia išskirti suvartojamą galią į kelis atskirus profilius, kurie nurodo kokių parametru reikia tam profiliui:

Srovės suvartojimas išsiuntimo metu:

- Duomenų išsiuntimo intervalai
- Siunčiamų duomenų kiekis bitais esantis kiekviename duomenų pakete
- Nuolatinis duomenų perdavimas ar periodinis

- Taikomosios programos duomenų apdorojimo laikas kiekvienam duomenų perdavimo intervalui

Srovės suvartojimas prisijungimo metu:

- Susijungimo trukmė
- „Slave“ atsako trukmė
- RX naudingoji duomenų dalis kiekviename duomenų pakete
- TX naudingoji duomenų dalis kiekviename duomenų pakete
- Gaunamų RX paketų kiekis kiekvieno prisijungimo metu (daugiausiai 6)
- Siunčiamų TX paketų kiekis kiekvieno prisijungimo metu (daugiausiai 6)
- „Master“io“ 32kHz rezonatoriaus tikslumas
- Taikomosios programos duomenų apdorojimo laikas kiekvieno prisijungimo metu

Norint apskaičiuoti suvartojamą srovę iš tokių periferinių įrenginių kaip SPI, UART ar TWI, reikia žinoti tokius parametrus kaip duomenų perdavimo greitis, duomenų kiekis, yra tik išsiunčiami duomenys ar tik gaunami arba abu atvejai. Taip pat visapusiškam srovės suvartojimo įvertinimui reiktų nurodyti ir visų naudojamų TAIMER'ių nustatymus, GPIOTE ir kitų naudojamų periferinių įrenginių nustatymus.

Tokiam tiksliam profilio įvertinimui yra galimybė siųsti visus šiuos nustatymus BLE gamintojui, kuris tiksliai įvertins susikurto profilio energijos vartojimą.

Vienas iš būtų yra naudoti vidinį 32kHz RC generatorių ir kalibruoti kas 4 sekundes, kad būtų išlaikytas tikslumas lygus 250 ppm (angl. „parts per million“). Dar vienas iš svarbių faktorių lemiančių vidinio generatoriaus pasirinkimą yra finansinis, nes naudoti vidinį generatorių nekainuoja jokių papildomų išlaidų, o taipogi neužima jokios papildomos vietos spausdinto montažo plokštėje. Palyginus su išoriniu kvarciniu rezonatoriumi, kuris yra 20ppm tikslumo, vidinis generatorius suvartoja iki 10μA daugiau srovės ir turi būti kalibruojamas kas 4 sekundes, kas priveda prie 250ppm dažnio tolerancijos.

16MHz taktinio dažnio pasirinkimas

Tam, kad galėtume sumažinti srovės suvartojimą, reiktų rinktis 16MHz išorinį kvarcinį rezonatorių su mažiausiu srovės suvartojimu starto metu. Šiam tikslui įgyvendinti reikia rinktis rezonatorių su maža apkrovos talpa, pavyzdžiui su 9pF vietoje rekomenduojamų didžiausių 16pF.

Energijos taupymo režimas su BLE „softdevice“

„Softdevice“ įrenginys naudoja RTC0(ang. „Real Time Clock 0“) tam, kad sektų laiką ir žinotų kada reikia pabusti sekančiam BLE susijungimo įvykiui. RTC0 pažadina mikrovaldiklį ir „softdevice“ įrenginį, kuris atlieka veiksmus reikalingus BLE susiejimui įvykdyti, kuris įtraukia tiek duomenų paketų priėmimą, tiek siuntimą. Kai yra atliekami prieš tai išvardinti veiksmai, toliau yra grįžtama į režimą, kuriame prieš tai buvo mikrovaldiklis.

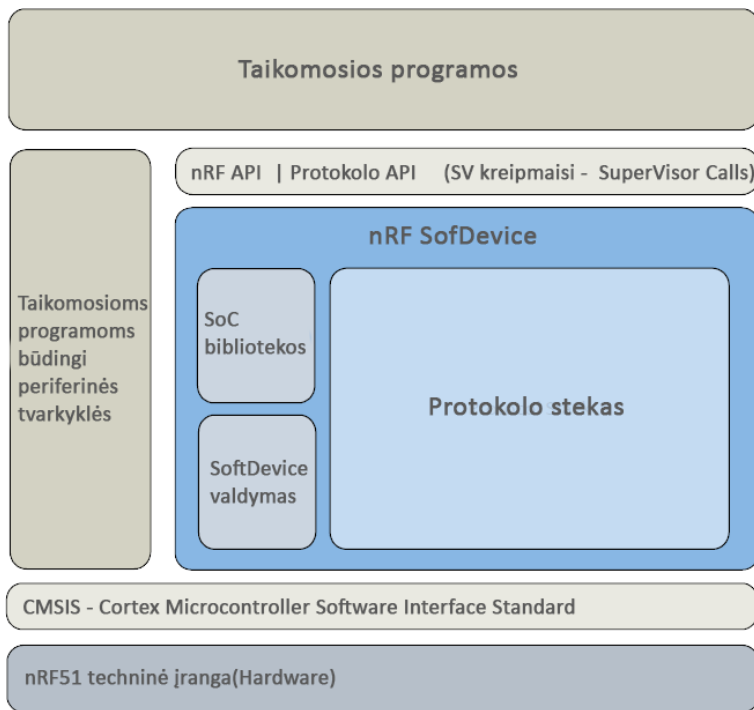
Energiją mažinančių būdų yra ir gerokai daugiau, tačiau visų jų nenagrinėsime, jie būtų tokie kaip: prisijungimo parametrų derinimas, siuntimo parametrų derinimas, LDO režimas prieš žemos įtampos režimą prieš DCDC režimą, kompiliatoriaus optimizavimas, SPI, UART, TWI sąrankų sąsajos (ang. „setup interfaces“) bei GPIOTE nustatymai.

3. MGBJ lusto struktūra

Tiriant mažos galios bevielių jutiklių tinklus buvo pasirinktas nRF51822 lustas turintis platforma, kuri yra savarankiška (stand-alone), skirta prototipų kūrimui, pasitelkiant integruotą „bluetooth smart“ (anksčiau vadinta „bluetooth low power“) ir patentuotą 2.4GHz nRF51822 SoC (System-On-Chip) technologiją

nRF51822 lustas turi jau sukompiliuotą ir integruotą programinę įrangą, kuri sujungia „Bluetooth 4.1“ mažos galio protokolo steką.

Taikomosios programos programavimo aplinkai(Application Programming Interface - API) naudojamas C kalbos standartas su visomis savo turimomis funkcijomis, kintamųjų tipais, kuris suteikia įrenginiui visišką nepriklausomumą nuo „SoftDevice“ vykdymo. Todėl „SoftDevice“ suteikia taikomosios programos kūrėjui galimybę rašyti kodą kaip rašant standartinį ARM Cortex-M0 projektą. Tai reiškia, jog bet kuris ARM Cortex-M0 tinkantis kompiliatorius, bus tinkamas ir kuriant mažos galios „Bluetooth“ taikomąsias programas. Žemiau yra pateikta struktūra parodanti „SoftDevice“ vietą ir paskirtį nRF5188 luste. SV kreipimaisi („Calls“) yra naudojami CMSIS norint kreiptis iš taikomosios programos į „SoftDevice“.



Pav. 14 „SoftDevice“ ryšys ir su kitais nRF51 lusto elementais

nRF51822 valdiklyje esantis „SoftDevice“, palaiko nesusikertantį ir pilnai susikertantį protokolų vykdymą. Tai reiškia, jog naudojant nesusikertantį būdą, patentuotasis 2.4GHz protokolas gali būti iškvieestas taikomosios programos aplinkoje ir gali pasiekti visus „hardvarinius“ išteklius kai „SoftDevice“ yra išjungtas.

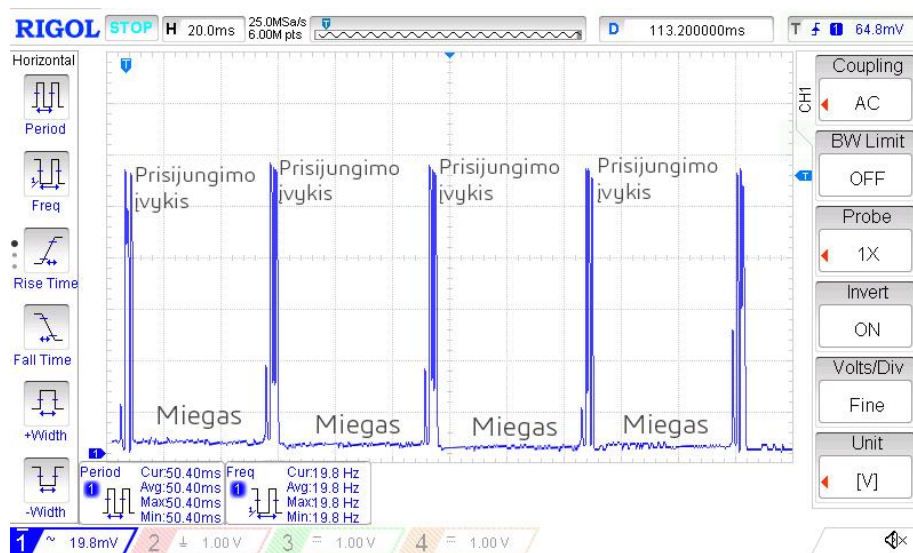
Pilnai susikertančių protokolų atveju taikomosios programos programavimo aplinka suteikia programos kūrėjui saugų 2.4GHz radijo dažnio naudojimo režimą, kol „Bluetooth“ mažos galios įrenginys yra naudojamas kitų įrenginių. Tai leidžia nRF51 įrenginiui būti BLE “Bluetooth Low Energy“ tinklo dalimi ir tuo pačiu būti kito bevielio tinklo dalimi tuo pačiu metu.

Nustatytų laiko intervalų Ypatybė duoda taikomajai programai prieigą prie radijo dažnio ir kitų ribotų periferijų sudarant eilę, kurioje yra taikomosios programos įvykiai kartu su tais kurie reikalingi pasiekti „SoftDevice“. Naudojantis šia nustatytų laiko intervalų ypatybę taikomoji programa gali naudoti ir kitus radijo dažnio protokolus susikertančius su vidiniais „SoftDevice“ protokolų stekais. Nustatytų laiko intervalų Ypatybė taip pat gali būti naudojama norint slopinti „SoftDevice“ radijo dažnį ir tuo pačiu rezervuoti užtikrintus laiko intervalus taikomosios programos veikimui su griežtais laiko paskirstymo reikalavimais, kurie paprastai išvis nesutinkami naudojant SoC radijo pranešimus. Pati nustatytų laiko intervalų ypatybė („Timeslot“), yra dalis SoC bibliotekos. Ši ypatybė veikia turėdama prieigą prie „SoftDevice“ ir

taikomosios programos laiko žymių. Per SoC API (System-On-Chip Application Programming Interface) taikomoji programa inicijuoja nustatytą laiko intervalų veikimą ir pareikalauja laiko žymių, kurias gavus taikomoji programa gauna teisę realiu laiku naudotis periferiniais įrenginiais: RADIO, TIMER0, CCM, AAR ir PPI(8-15 kanalai), kurie paprastai būna neprieinami, o naudojimasis šiais įrenginiais yra nustatytos trukmės, kurią riboja tas pats „Timeslot“.

3.1 BLE suvartojamos energijos etapai

Palyginti Bluetooth Low Energy suvartojamą energiją su kitu įtaisu naudojančiu energiją yra neįmanoma naudojantis vienu energijos matavimo standartu. Taip yra todėl kad kartais įtaisai yra įvertinti pagal momentines sroves („Peak current“). Daugumoje įrenginių momentinė srovė tėra tik visos galios sunaudojimo dalis, tačiau įrenginiai turintys BLE steką, vien tik šiuo momentu ir naudoja srovę ir išsiunčia duomenis. Netgi itin pralaidžiose sistemose, BLE įrenginys siunčia duomenis tik labai nedidelį laiko dalį nuo viso to laiko, kol jis būna prisijungęs. To pavyzdys pateiktas žemiau.

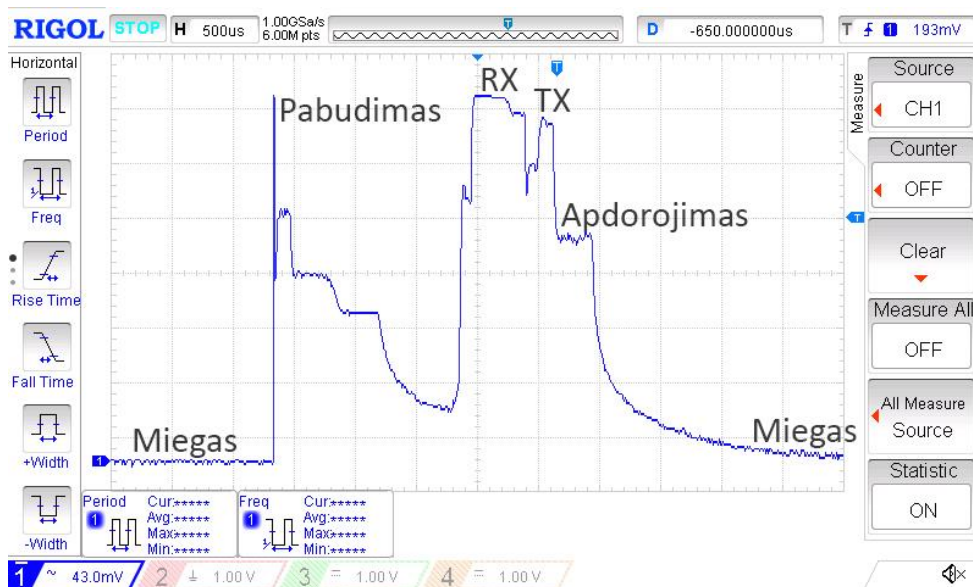


Pav. 15 BLE prisijungimo momentų srovės suvartojimo priklausomybė nuo laiko

Be viso to, jog BLE įrenginys siunčia duomenis, jis turi dar keletą svarbių etapų prieš ir po siuntimo, tokių kaip:

- Duomenų gavimas
- Miego režimas
- Pabudimas iš miego režimo

Bet net jeigu įrenginio srovės kiekvienoje skirtingoje stadijoje yra žinoma, tos informacijos nepakanka norint įvertinti viso įrenginio suvartojamą energiją. Kiekvienas skirtingas BLE įrenginio steko sluoksnis reikalauja tam tikro kiekio duomenų apdorojimo tam, kad įrenginys išliktų prisijungęs ir laikytųsi protokolo specifikacijų. Mikrovaldiklis savo ruožtu yra užimtas tam tikrą laiką atlikdamas duomenų apdorojimą, o tai reiškia, jog tą laiko tarpą įrenginys vartoja energiją. Įrenginys taip pat užtrunka ir tuo momentu, kai yra pereinam iš vienos stadijos į kitą, todėl reikia įvertinti ir šiuo momentu suvartojamą energiją. Taigi įvertinę visus galimus srovės vartojimo momentus, galime pakankamai tiksliai vertinti bendrą įrenginio energijos suvartojimą. Žemiau yra pateiktas nRF51822 lusto vartojamos energijos etapai:



Pav. 16 nRF51822 skirtingų etapų srovės suvartojimo priklausomybė nuo laiko

Dauguma taikomųjų programų atveju, įrenginys naudodamas „BLE“ steką didžiąją laiko dalį praleidžia miego režime tarp prisijungimo įvykių. Miego režimo metu yra išjungiamas vidinis įtampos reguliatorius, analoginis 16MHz RC osciliatorius ir 32MHz kvarcinis rezonatorius. Tuo tarpu lieka neišjungtas atskiras 32kHz miego režimo „timeris“. Vienintelis įrenginio pažadinimo būdas iš miego režimo yra I/O išorinė pertrauktis arba to paties miego režimo 32kHz „timerio“ pertrauktis.

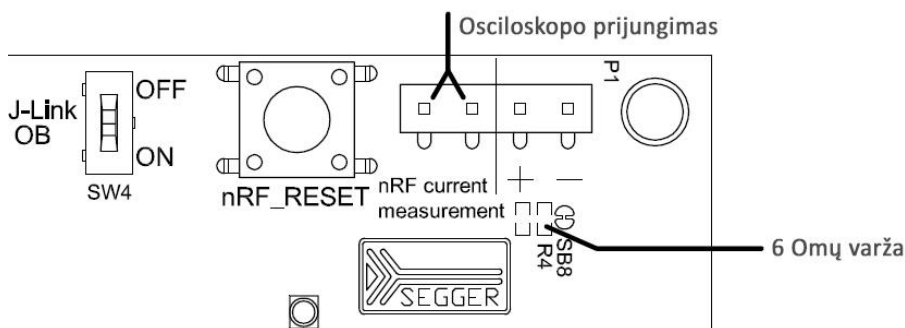
Įvertinus šiuos pagrindinius laikus ir suvartojamą srovę šiais laiko momentais, galima tai įvardinti tik kaip vidutinė suvartota srovė. Būtent šį parametą galima naudoti norėdami nustatyti BLE steką naudojančio įtaiso baterijos veikimo trukmę. Reikia atkreipti dėmesį į tai, jog kiekvienu nauju siuntimo metu, įvertintas naujas parametras – vidutinė suvartojama srovė, negali būti pateikta techniniame aprašyme kaip įtaiso vidutinė suvartojama

srovė, nes šis parametras itin susijęs su įrenginio susiejimo parametrais. Todėl norint naudoti vidutinės suvartojamos srovės parametą būtina nurodyti visas sąlygas tam parametrai pasiekti.

nRF51822 „Soc“ MCU ne tik naudojamas BLE protokolo stekui, bet jis tuo pačiu metu vykdo profiliuose numatytus veiksmus ir vykdo taikomąją aplikaciją. Taikomoji programa naudoja ne tik luste esantį MCU, bet ir kitus periferinius įrenginius esančius luste, tokius kaip AKK (angl. „ADC“) ar operacinius stiprintuvus. Reikia nepamiršti ir kitų įrenginių esančių ant tos pačios plokštės, kurie gali būti gretimais įrenginio, kuriame yra naudojamas „BLE“ protokolo stekas ir tie pašaliniai įrenginiai gali vartoti elektros srovę, todėl būtina įvertinti, jog ir šalia esantys įrenginiai gali iškrauti įrenginio akumuliatorių.

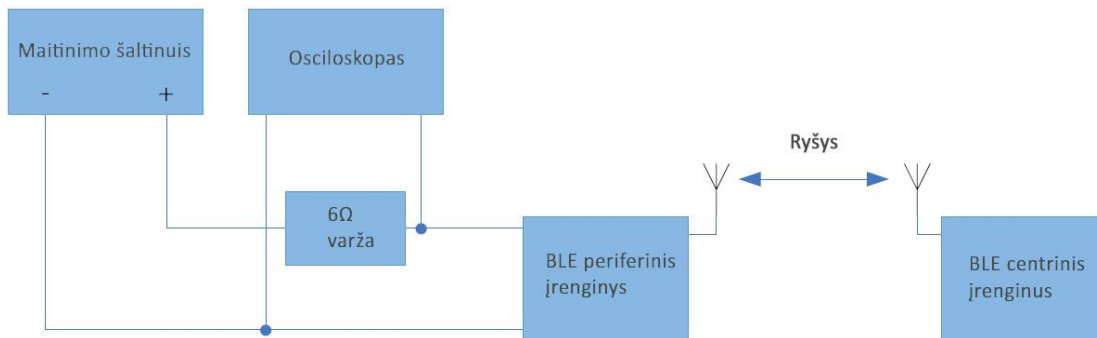
3.2 MGBJ BLE lusto srovės matavimas

Kad tiksliai išmatuotume vidutinį srovės sunaudojimą BLE įrenginio, matavimas turi būti atliktas atsižvelgiant į laiko dedamąją. Štai todėl šiuo atveju mums netinka paprastas multimetras, galintis matuoti srovę, o reikalingas osciloskopas. Pats paprasčiausias būdas norint išmatuoti srovę osciloskopu, yra srovės zondo panaudojimas ir tokiu būdu galime stebėti tekančią srovę į BLE įtaisą. Tačiau mūsų atveju kur kas paprastesnė alternatyva yra naudoti nedidelio nominalo varžą, kurią įterpiame į maitinimo linijos vieną iš linijų. Šiuo atveju mums pakanka osciloskopo įtampos matavimo funkcijos, jog galėtume išmatuoti įtampą krentančią ant varžos ir taip galime apskaičiuoti per varžą tekančią. Matavimui naudojame 6 Omų varžą, kuri yra 1% tikslumo. Iki 10 Omų varža rekomenduojama dėl to, jog šitoks mažas nominalas praktiškai neįtakoja likusios grandinės ir nominalas tuo pačiu pakankamai didelis, kad būtų galima su tinkamu tikslumu išmatuoti įtampos kritimą ant varžos.



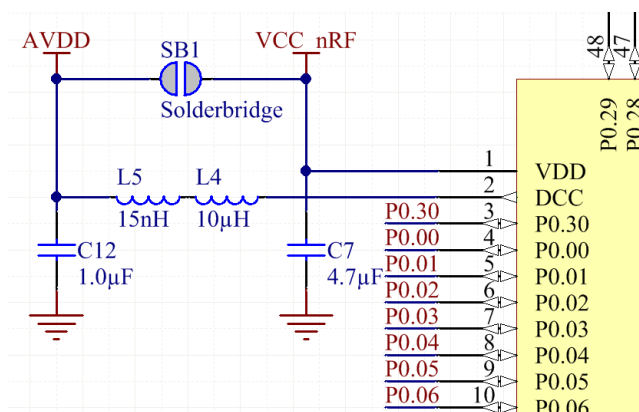
Pav. 17 PCB plokštės paruošimas srovės matavimui

Atliekant matavimą geriausia būtų naudoti reguliuojamą DC maitinimo šaltinį, kuris priešingai nei baterija, užtikrins stabilų maitinimą, kai tuo tarpu baterijos parametrai gali kisti ir įtakoti rezultatus. Žemiau pateikiamas matavimo grandinės principinė schema:



Pav. 18 Srovės matavimo principinė schema naudojant osciloskopą su įtampos matavimu

Dažnu atveju, prie pat BLE lusto būna maitinimo kondensatoriaus, kuris reikalingas išlyginti tekančią srovę ir panaikinti atsirandančius šuolius. Tačiau mūsų matavimo tikslas ir yra gauti tikslesnę suvartojamą srovę, todėl reikia išlietuoti esamą maitinimo linijos kondensatorių, kuris pas mus šiuo atveju pažymėtas C7.



Pav. 19 Maitinimo kondensatorius C7, kuris turi būti išlietuojamas

Prieš atliekant matavimo procesą reikia sukonfigūruoti programinę įrangą, taip, kad būtų matuojama tik BLE steko srovė, o ne papildomų taikomosios programos procesų vartojama srovė, todėl papildomi vykstantys procesai turi būti išjungti. Idealiu atveju programa startuoja vos tik procesorius gauna maitinimą ir ima ieškoti galimų prisijungti įrenginių, bet kokia prisijungimo užklausa yra tenkinama.

Jeigu netinkamai yra sukonfigūruoti GPIO išvadai, tai gali lemti papildomą srovės vartojimą. Idealiu atveju kiekvienas GPIO išvadas turėtų būti atjungtas, tokiu būdu būtų išvengta papildomo srovės sunaudojimo. Tačiau kaip ir daugumoje bandymams skirtų plokščių, kai kurie išvadai yra prijungti prie kitų periferinių įrenginių, tokių kaip šviestukų (angl. „LED“), zumerių

(angl. „buzzer“), pagreičio jutiklių (angl. „accelerometer“), mygtukų ir panašiai. Tam, kad būtų maksimaliai sumažintas šalutinis srovės vartojimas, visi GPIO išvadai privalo būti nustatyti kaip loginiai išėjimai žemame lygyje.

```
* @note Sense capability on the pin is disabled, and input is disconnected
  from the buffer as the pins are configured as output.
```

Pav. 20 *nrf_gpio.h* faile esanti eilutė patvirtina prieš tai aptartus GPIO nustatymus

```
748 // jau deklaruotus isvadus padarome kaip OUTPUT
749 nrf_gpio_cfg_output(RX_PIN_NUMBER); // PIN number 11
750 nrf_gpio_cfg_output(TX_PIN_NUMBER); // PIN number 9
751 nrf_gpio_cfg_output(CTS_PIN_NUMBER); // PIN number 10
752 nrf_gpio_cfg_output(RTS_PIN_NUMBER); // PIN number 8
753
754 nrf_gpio_cfg_output(SPIS_MISO_PIN); // PIN number 20 SPI MISO signal.
755 nrf_gpio_cfg_output(SPIS_CSN_PIN); // PIN number 21 SPI CSN signal.
756 nrf_gpio_cfg_output(SPIS_MOSI_PIN); // PIN number 22 SPI MOSI signal.
757 nrf_gpio_cfg_output(SPIS_SCK_PIN); // PIN number 23 SPI SCK signal.
758
```

Pav. 21 Jau deklaruotus GPIO išvadus *pca10001.h* faile, padarome kaip išėjimus „output“

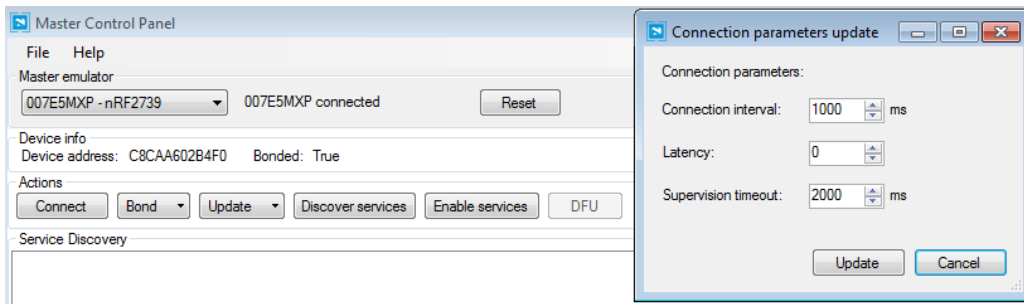
Likusius nenaudojamus išvadus su dar nepriskirtais pavadinimais atjungiamo nepriskirdami naujų vardų:

```
759 for(int unused_PIN_number = 0; unused_PIN_number < 8; unused_PIN_number++){
760     nrf_gpio_cfg_output(unused_PIN_number); // nenaudojami isvadai - input is disconnected
761 }
762 for(int unused_PIN_number = 12; unused_PIN_number < 16; unused_PIN_number++){
763     nrf_gpio_cfg_output(unused_PIN_number); // nenaudojami isvadai - input is disconnected
764 }
765 for(int unused_PIN_number = 24; unused_PIN_number < 31; unused_PIN_number++){
766     nrf_gpio_cfg_output(unused_PIN_number); // nenaudojami isvadai - input is disconnected
767     unused_PIN_number = 0;
768 }
```

Pav. 22 nenaudojamų išvadų atjungimas nuo įėjimo buferio

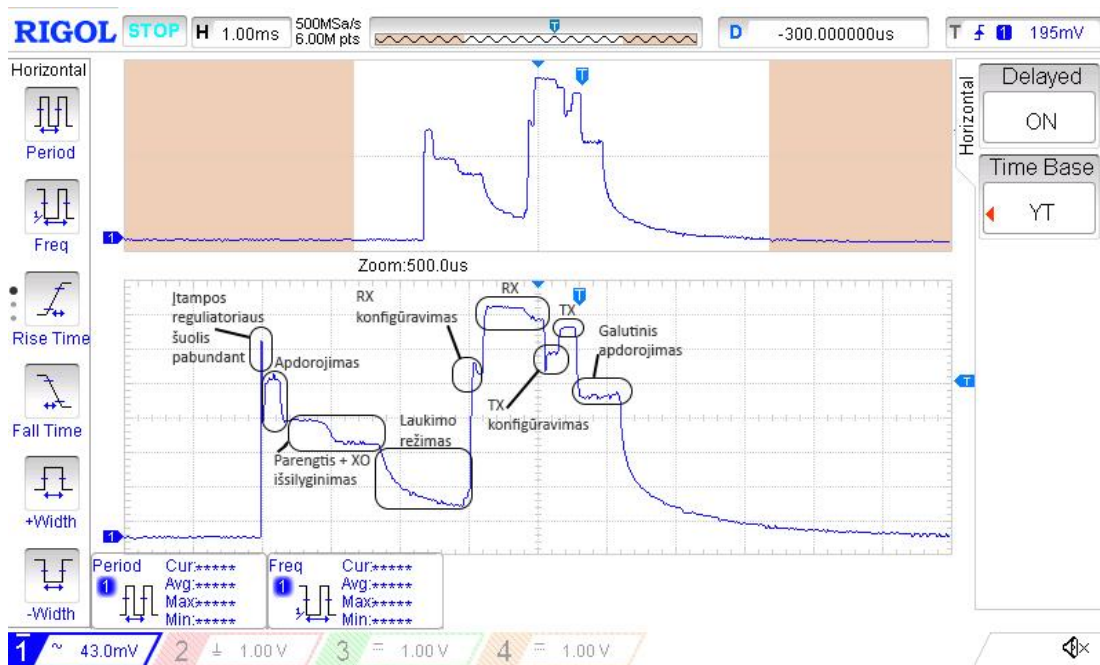
Vietoje numatyto imtuvo įrenginio (PCA10000) naudosime šiek tiek senesnį nRF2739 imtuvą, kuris buvo skirtas naudoti kartu su nRF8001 įrenginiu. Šiam emuliatoriui valdyti yra naudojama taikomoji programa „Master Control Panel 3.7.1“.

Prieš paspaudžiant „Connect“ mygtuką turėtų būti atlikti tinkami sujungimo nustatymai. Šie nustatymai neįtakoja matuojamos srovės parodymų, tačiau bet koku atveju reikėtų laikytis ribinių verčių remiantis Bluetooth 4.0 specifikacijomis. Šiam eksperimentui naudosime 1-os sekundės ryšio intervalą ir su 0-ju „slave“ periodu.



Pav. 23 Master emulator nustatymai prieš sujungiant abu įrenginius

Oscilogramos gavimui naudojame kylančio fronto trigerį, kuris fiksuoja kaip nRF51822 pabunda iš miego režimo prisijungimo įvykiui atlikti.



Pav. 24 Vieno įvykio išklotinė suskirstyta į atskirus etapus

Vienas iš labiausiai pastebimų dalykų žiūrint į gautą oscilogramą, yra didelis srovės šuolis tuo momentu, kai MCU (angl. „microcontroller unit“) pabunda iš miego režimo. Šis srovės šuolis atsiranda dėl skaitmeninio įtampos reguliatoriaus įsisotinimo esančio nRF51822 luste. Kaip ir visi įtampos reguliatoriai, taip ir šis, turi kondensatorių, kurie privalo būti užkrauti pabundant įrenginiui iš miego režimo, o tai ir priverčia itin trumpą laiko dalį sunaudoti didelį srovę, kol kondensatoriai užsikraus. Paprastai šio šuolio nematytume, jei bandymu plokštėje vis dar būtų įlituotas C7 kondensatorius su 4.7μF talpa, todėl tolimesniuose testavimuose šio srovės šuolio nevertinsime.

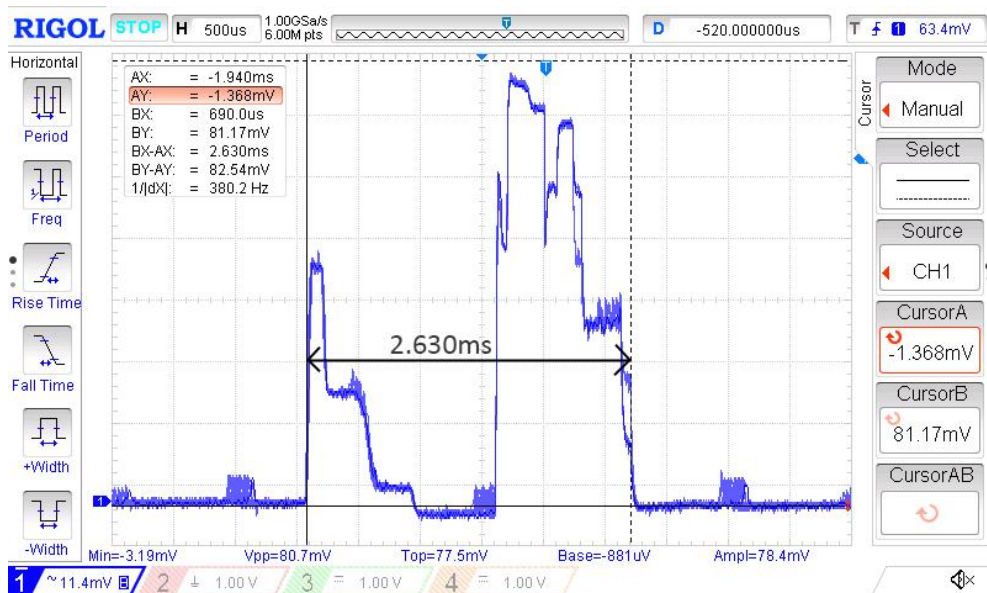
Iš pateiktos oscilogramos galime matyti, jog nRF51822 lusto suvartojama elektros srovė keičiasi nuo skirtingų protokolo etapų:

- Duomenų apdorojimas (ION + IRTC + IX32k + ICPU,Flash)
- „Standby“ + XO(kvarcinis rezonatorius) nusistovėjimas (ION + IRTC + IX32k + ISTART,X16M)
- Laukimo režimas (ION + IRTC + IX32k + IX16M)
- RX konfigūravimas (ION + IRTC + IX32k + IX16M + f (ISTART,RX))
- RX (RX ION + IRTC + IX32k + IX16M + IRX+ ICRYPTO)
- TX –konfigūravimas (ION + IRTC + IX32k + IX16M + f (ISTART,TX))
- TX (ION + IRTC + IX32k + IX16M + ITX,0dBm+ ICRYPTO)
- Galutinis apdorojimas (ION + IRTC + IX32k + ICPU,Flash)
- Idle režimas(prisijungta) (ION + IRTC + IX32k)

Sekančiame etape fiksuojame naują oscilogramą ir įvertiname kaip srovės suvartojimą įtakoja prisijungimo įvykis. Papildomai laiko užtrunkama dėl tokių priežasčių kaip duomenų paketo dydis siunčiant ir gaunant, papildomas laikas apdorojant duomenis steke ir panašiai. Jeigu yra persiunčiama ar gaunama daugiau duomenų paketų, dėl to atsiranda ir pereinamieji procesai iš RX į TX ir atvirkščiai, dėl ko bus užtrukta daugiau laiko.

Nors prieš tai darytoje oscilogramoje ir galime pažymėti visus vykstančius etapus ir pradėti skaičiuoti srovę šiuose atskiruose etapuose, tačiau šioje oscilogramoje mes nematome visos priešistorės, kuri labai svarbi, „triggerio“ pagalba matome tik prisijungimo įvykio oscilogramą, o norime pamatyti kaip prisijungimo įvykis keičia šią oscilogramą.

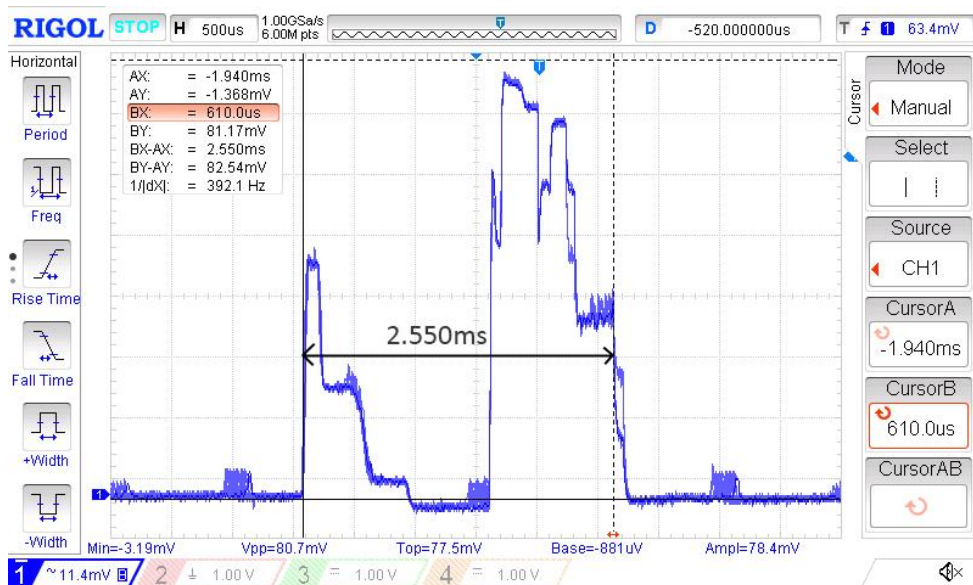
Taigi, darydami sekančias oscilogramas vėl naudosisime kylančio fronto triggerį, kuris fiksuos „kaip nRF51822 lustas pereina iš miego režimo į prisijungimo įvykį, tik šį kartą dar bus panaudotas „persistence“ režimas, kuris leidžia matyti prieš tai buvusias oscilogramas atitinkamai perdengiant jas vieną ant kitos. Ši funkcija yra „Display“ skiltyje ir iš atsidariusio menu pasirinksime 1s nominalą.



Pav. 25 Oscilograma su įjungtu „persistence“ režimui 1-ai sekundei

Iš aukščiau pateiktos oscilogramos galime pastebėti, jog prisijungimo metu pabudimo trukmė yra ilgesnė, o tai lemia viso prisijungimo laiko trukmę. Tai reiškia, jog kiekvieną kartą prisijungiant, bendra prisijungto laiko trukmė gali kisti. Tai pastebėję galime teigti, jog norint tinkamai įvertinti suvartojamą srovę, negalime remtis tik įprastomis trigerio pagalba užfiksuotomis oscilogramomis.

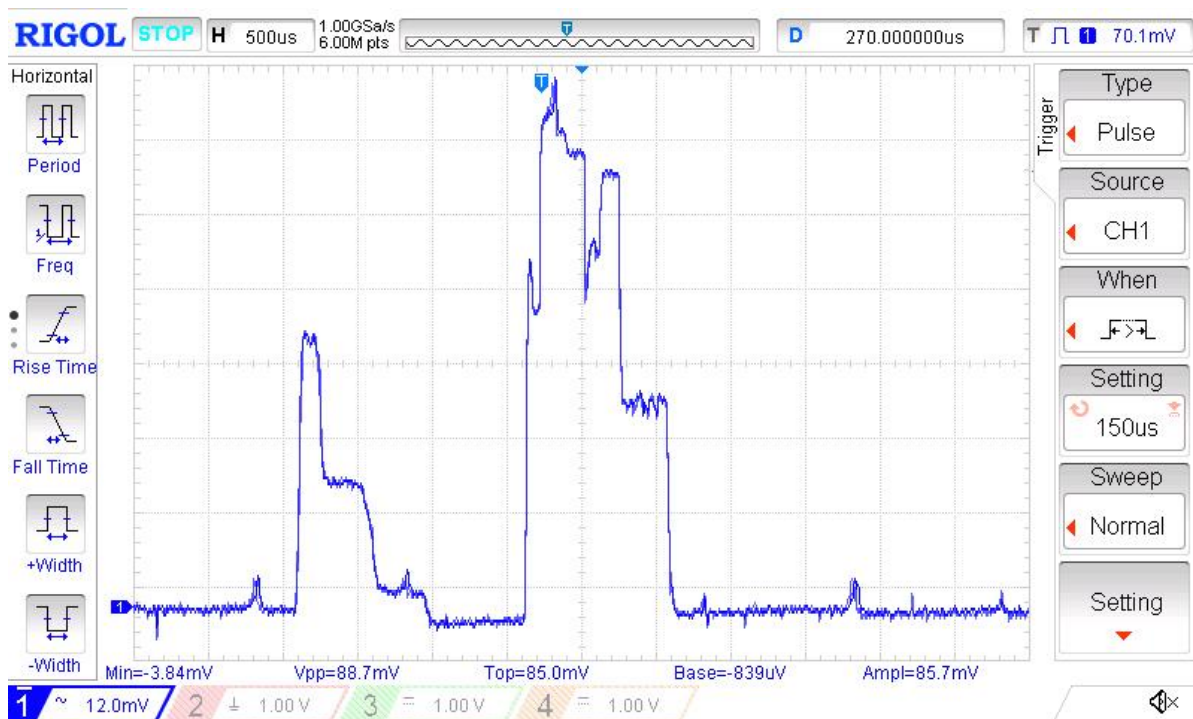
Pasinaudoję osciloskope esančia „persistence“ funkcija, galime pastebėti, jog kiekvieną kartą prisijungimo metu pailgėjęs bendras laikas, nėra visiškai nenumatomas, jį galime įvertinti išmatavus minimalią ir maksimalią prisijungimo trukmes. Aukščiau pateiktoje oscilogramoje buvo pateiktas maksimalus prisijungimo laikas, žemiau pateiktoje oscilogramoje išmatuojame trumpiausią prisijungimo laiką:



Pav. 26 Duomenų apdorojimo metu užtruktas mažiausias intervalas

Galime pastebėti, jog pabudimas iš miego režimo ir perėjimas vėl į miego režimą gali užtrukti nuo 2,550ms iki 2,630ms, o tai reiškia, jog skirtingais atvejais sunaudojama elektros srovės irgi skirsis. Pastebime, jog ne visada prisijungimo laikas yra vienodas ir skiriasi per 0,08ms, todėl norint kuo tiksliau išmatuoti sunaudojamą srovę turime į tai atsižvelgti ir tinkamai įvertinti, o tai padarysime pasinaudoję statistinėmis analizėmis.

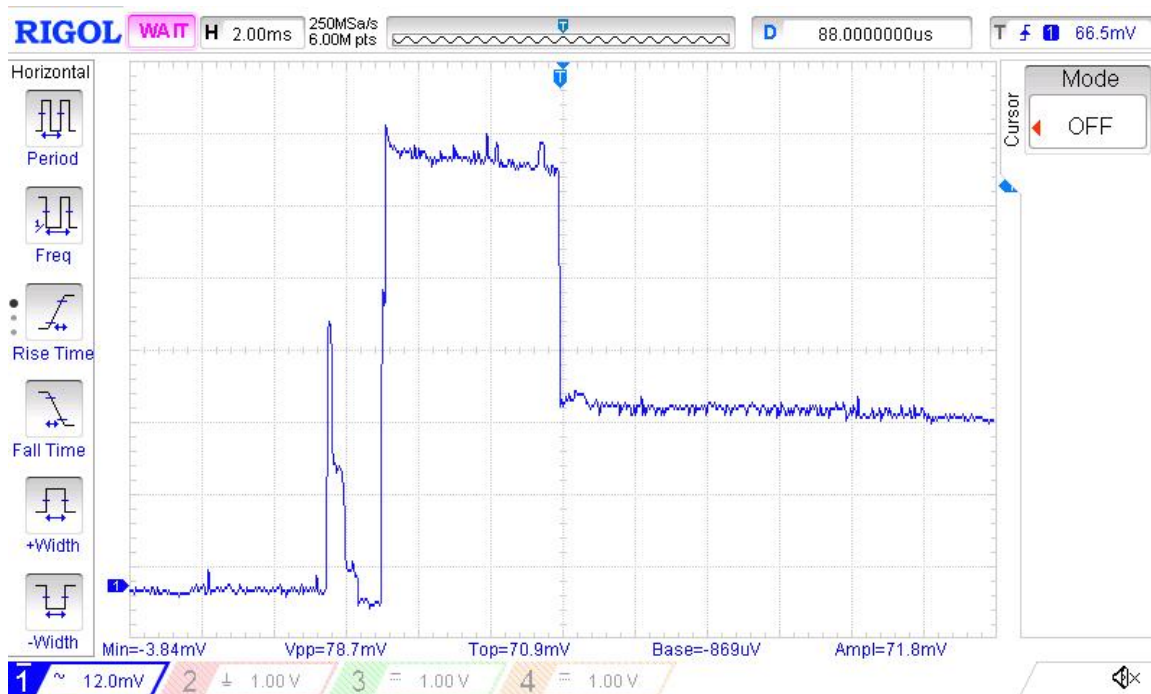
Kitas svarbus pastebėjimas iš prieš tai darytų oscilogramų yra tas, jog prisijungimo metu kinta duomenų siuntimo ir priėmimo laikas. Iš tikro šis duomenų siuntimo ir priėmimo laiko tarpas yra pastovus kiekvieno prisijungimo metu, o tuo galime įsitikinti pakeitę trigerio režimą iš kylančio fronto į teigiamo pulso pločio trigerį ir pasirinkdami RX pulso plotį kaip atskaitą. Taigi pasirenkame trigerio pulso pločio vertę didesnę nei 150μs, kas užtikrins, jog osciloskopas atvaizduos signalą tik kai bus pasiektas RX signalo plotis, o ne įtampos reguliatoriaus kondensatorių srovės pikas. Be viso to būtina padidinti trigerio įtampos lygį, tam, kad trigeris suveiktų ne nuo duomenų apdorojimo etapo ar kitų, bet tik nuo RX dalies. Tinkamas trigerio įtampos lygis būtų 70,1mV, kas atitinka 11,68mA.



Pav. 27 Oscilograma, kai trigerio lygis yra ties RX dalimi

Nustačius atitinkamą trigerį, kurs prisijungimo įvykį fiksuoja tik tuo atveju, kai yra tenkinamas tam tikro ilgio teigiamas RX impulsas tam tikrame įtampos lygyje, galime pastebėti, kad tiek RX tiek TX laiko trukmės ir įtampos lygis visiškai nekinta.

Tačiau, galimybė, jog RX ir TX laikai pakis egzistuoja, tai toks atvejis, kai RX trunka gerokai ilgiau nei turėtų ir dėl šios priežasties „slave“ įrenginys negali priimti duomenų paketų iš „master“ įrenginio. Žemiau yra pateikiama tokio scenarijau oscilograma:



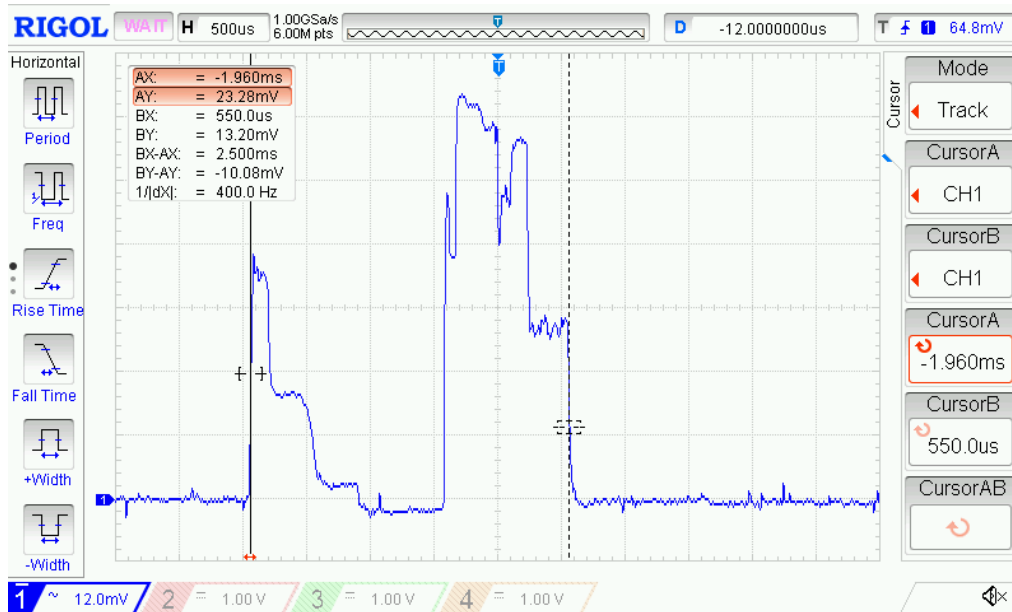
Pav. 28 Ilga RX trukmė dėl praleisto susijungimo įvykio

Šiuo atveju nebus matomas TX signalas nes siųstuvas neatsako, kai negauna nieko iš imtuvo. Šie praleisti susijungimo įvykiai gali įvykti labai retu atveju, jeigu tai nutinka labai dažnai, dažnas atveji, jog tai sukelia pašaliniai RF trukdžiai arba imtuvus ir siųstuvas yra toli nutolę vienas nuo kito.

Iš prieš tai darytų oscilogramų pastebėjome, jog nRF51822 lustas būna pabudęs nuo 2.55ms iki 2.63ms kiekvienu prisijungimo momentu, todėl norint tinkamai įvertinti energijos suvartojimą, turime rinktis tą atvejį kurio tikimybė yra didesnė arba naudoti šių abiejų laikų vidurkį. Šiam tikslui pasiekti kai kurie osciloskopai turi programiškai įgyvendiną sprendimą statistinėms analizėms atlikti, priešingu atveju galima naudoti ir AK taikomąją programą, kurios pagalba yra apdorojami duomenys iš osciloskopo ir atliekami skaičiavimai. Pats paprasčiausias būdas procentiškai įvertinti pabudimo laiką yra atsitiktiniu būdų fiksuoti keletą oscilogramų iš eilės su trigerio lygiu, kuris nustatytas kylančiam frontui, kai lustas pabunda iš miego režimo.

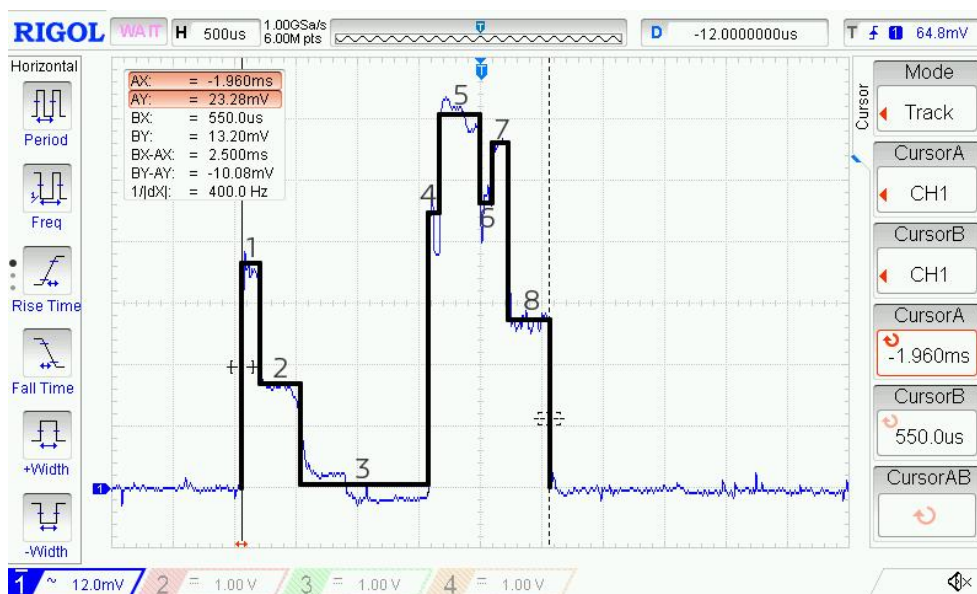
Mūsų nagrinėjamu atveju prisijungimo įvykio intervalas yra nustatytas 1000ms, tai yra pakankamai ilgas laiko tarpas, tam, jog būtų galima naudoti automatinį trigerio režimą, kurio pagalba yra gaunamas prisijungimo laiko vidurkis ir šis laikas nešokinėja tarp ilgiausio ir trumpiausio laikų. Taigi atlikus daugybės prisijungimo įvykių analizę galime daryti išvadą, jog šis laikas yra lygus 2.59ms, o tai yra pakankamas tikslumas. Taigi, radę ilgiausio ir trumpiausio pabudimo laikų vidurkį, priimame sąlygą, jog tiek vienas, tiek kitas įvykis įvyksta su 50% tikimybe.

Atlikę visą būtiniausių gautų duomenų įvertinimą, toliau galime atlikti srovės matavimą. Iš prieš tai atliktų matavimų žinome, jog reikia įvertinti srovę dviem atvejais, kai pabudimo laikas yra 2.55ms ir kai pabudimo laikas yra 2.63ms, todėl pirmiausia pradėsime nuo trumpesniojo pabudimo laiko. Šiam tikslui atlikti galima naudoti osciloskopo triggerį su tam tikrais nustatymais arba atsitiktinai laukti būtent tokio ilgio pabudimo laiko.



Pav. 29 Prisijungimo įvykis su 2.50ms pabudimo laiku

Norėdami atlikti srovės matavimą turime gautą oscilogramą suskirstyti į atitinkamus laiko ir srovės lygmenis, kurie atitinka tam tikrus lusto būseną:



Pav. 30 Sunaudojamos srovės oscilograma suskirstyta į atitinkamus etapus

Naudodamiesi osciloskopo žymekliais nustatome kiekvieno vykdyto etapo laikus ir naudojamą vidutinę srovę. Galime pastebėti, jog ne visuose etapuose srovės suvartojimas išlieka tolygus, todėl norint atlikti tikslesnį tyrimą, kai kurie etapai gali būti perskirti į smulkesnius laiko ruožus, tačiau šiuo atveju to nedarysime, nes gauti duomenys ir taip bus pakankamai tikslūs naudojant vidurkį.

Lentelė 4 Sunaudojama srovė skirtinguose etapuose

Būsena	Trukmė, μ s	Įtampa, mV	Srovė, mA
Pabudimas	150	45,6	7,6
„Standby“ + XO nusistovėjimas	350	19,44	3,24
„Standby“	1040	4,8	0,8
RX konfigūravimas	90	52,08	8,68
RX	320	75,12	12,52
TX konfigūravimas	120	55,44	9,24
TX	120	69,6	11,6
Pasiruošimas prieš miego režimą	330	32,88	5,48

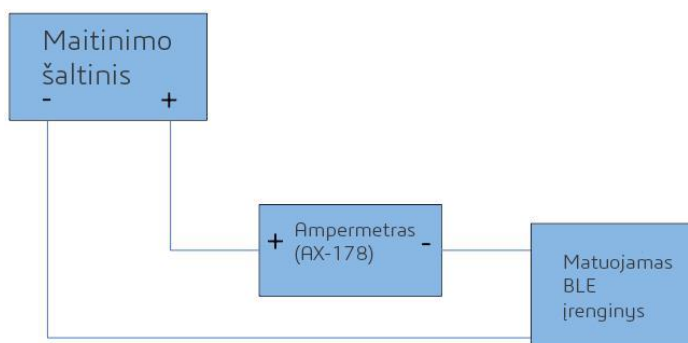
Iš gautų rezultatų galime pastebėti, jog pabudimo laikas(angl. „pre-processing“) ir pasiruošimo prieš miegą laikas (angl. „post-processing“) gali šiek tiek skirtis, tačiau abiejų laikų suma turėtų išlikti tokia pati arba nežymiai skirtis. Galime pastebėti, jog abiejų procesų metu sunaudojama srovė irgi yra panaši, todėl nors laikai ir skiriasi bendras šių abiejų būsenų srovės suvartojimas išliks toks pat.

Sekantis laikų ir srovės tyrimas atliekamas naudojant ilgesnįjį pabudimo laiką, kuris yra 2.63ms. Šiam matavimui atlikti naudojame tuos pačius metodus kaip ir anksčiau minėtu atveju.

Lentelė 5 Ilgesniojo pabudimo laiko būsenų laikai ir suvartojamos srovės.

Būsena	Trukmė, μ s	Įtampa, mV	Srovė, mA
Pabudimas	150	42,24	7,04
„Standby“ + XO nusistovėjimas	340	20,16	3,36
„Standby“	1040	4,56	0,76
RX konfigūravimas	90	52,32	8,72
RX	440	74,88	12,48
TX konfigūravimas	110	55,68	9,28
TX	120	67,92	11,32
Pasiruošimas prieš miego režimą	330	33,6	5,6

Svarbu nepamiršti ir ne aktyviuoju laiku tekančios srovės, kuri apsprendžia baterijos veikimo laiką. Šiuo atveju tai yra miego režimo srovė. Miego režimo srovė yra pakankamai svarbus parametras, nes nRF51822 lustas didžiąją laiko dalį ir praleidžia miego režime, kai įrenginiai suporuoti. Pats paprasčiausias būdas išmatuoti LPM (angl. „Low Power mode“) yra skaitmeninį multimetą:



Pav. 31 BLE įrenginio miego režimo srovės matavimo schema

Pasirinkus matavimo prietaisą svarbu ne tik tai, jog jis gali matuoti itin mažas sroves, μA eilės, bet ir tai, jog prietaisas galėtų pereiti į mA diapazoną, kai BLE įrenginys yra aktyviajame režime. Kai kurie multimetrai turi suskirstytus srovės matavimo diapazonus, todėl srovė yra ribojama kai matuojama maža μA eilės srovė, tokiu atveju gali nepavykti išmatuoti šios srovės, tačiau kiti multimetrai turi galimybę perjungti šiuos diapazonus iš μA eilės į mA, kai tuo metu vyksta matavimas ir nereikia nieko atjungti. Taigi geriausias būdas išmatuoti μA eilės srovė yra sujungti grandinę taip kaip aukščiau parodyta schemoje ir įjungti mA eilės matavimą, o kai srovė stipriai nukrinta ir BLE įrenginys pereina į miego režimą, tada perjungti į μA eilę. Svarbu, nepamiršti, jog reikės multimetą perjungti atgal į mA režimą kol MCU miega, nes priešingu atveju gali būti sugadintas prietaisas, kai μA režime ims tekėti kelis kartus didesnė srovė. Pasinaudodami ant plokštės jau paruoštais maitinimo išvadais, kurie yra šalia išvadų skirtų įtampos kritimui matuoti ir atlikę tuos pačius programos pakeitimus kaip prieš tai nagrinėtuose variantuose, negausime visiškai tikslios lusto miego srovės, ji bus keliais μA didesnė nei turėtų būti, o tai įtakoja ant plokštės esantys kiti periferiniai įrenginiai, tokie kaip šviestukai ar mygtukai. Nors vos keli μA nieko nelemia aktyviuoju periodu, tačiau miego režime tai gali turėti didžiulę įtaką visam baterijos tarnavimo laikui. Todėl pats teisingiausias būdas gauti pačius tiksliausius duomenis yra lituokliu išlituoti nenaudojamas dalis arba pasigaminti kitą plokštę, ant kurios nebūtų jokių papildomų komponentų išskyrus nRF51822 lustas.

Su tokiais pat kodo pakeitimais kaip ankstesniuose skyriuose galime pradėti testą, tačiau negalime iškart imti ir matuoti tekančios srovės, nes vos tik prijungus maitinimą, įrenginys

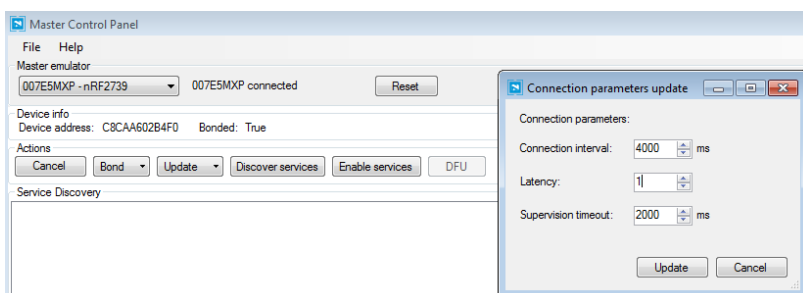
pradedą siųsti duomenis nustatytu dažnumu ir nebūna giliausiame miego režime. Gilus miego režimas prasideda po to, kai įrenginys būna suporuotas su kitu bluetooth įrenginiu ir būna praėjusios 120s po duomenų pasikeitimo, jeigu per tą laiką duomenys nekinta, yra pereinama į gilų miego režimą. Toks pat miego režimas egzistuoja ir vos tik įjungus įrenginį, tačiau labai trumpą laiką ir jos išmatuoti nepavyks iškart, nes įrenginys iškart pradeda vykdyti veiksmus, o šiam matavimui atlikti yra naudojamas paprastas testeris galintis matuoti μA eilės srovę.

Jeigu prieš tai buvo iš plokštės išlituoti visi nereikalingi komponentai, tokie kaip LED ir mygtukai, gali iškilti bėdų su įrenginio aptikimu jį susiejant su kitu įrenginiu jeigu yra nustatyta, jog būtina paspausti kurį nors mygtuką norint pažadinti įrenginį iš miego režimo, tačiau pakeitus šiek tiek kodą ši problema išsprendžia ir nebereikia spausti mygtuko, kuris padaro bandomąjį įrenginį aptinkamu kitiems. Taigi po tokio pakeitimo įrenginys vos tik užmaitintas ima siųsti prisijungimo užklausą periodiškai. Tam, kad būtų nesunkiai gauta miego režimo srovė, reikia prailginti prisijungimo intervalo laiką. Šiuo atveju šiek tiek pakeisime naudojamą kodą ir padarysime, jog būtų naudojamas pats ilgiausias prisijungimo intervalas, kuris yra 4000ms su 1ms vėlavimu (angl. „latency time“).

```
#define MIN_CONN_INTERVAL          MSEC_TO_UNITS(500, UNIT_1_25_MS)
#define MAX_CONN_INTERVAL          MSEC_TO_UNITS(4000, UNIT_1_25_MS)
#define SLAVE_LATENCY               1
#define CONN_SUP_TIMEOUT            MSEC_TO_UNITS(6000, UNIT_10_MS)
```

Pav. 32 Kodo pakeitimas, kad „master“ įrenginys galėtų naudoti šiuos laikus

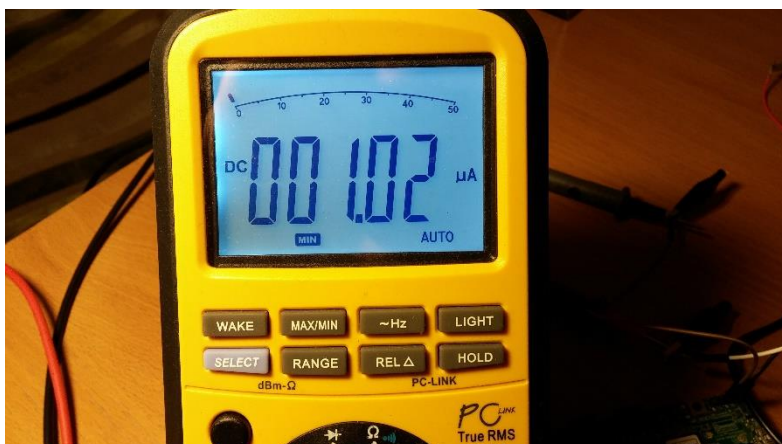
Toliau naudodami jau žinomą įrankį „Master control panel“ nustatome šiuos parametrus.



Pav. 33 Nustatome pasirinktus parametrus „Master“ įrenginiui

Su šiais nustatymais nesunkiai galima pamatuoti kokia yra miego režimo srovė, nes laikas tarp prisijungimo momentų yra gana didelis. Pamatavus šią srovę pastebime, jog ji yra apie 1 μA , o gamintojas panašiai ir nurodo, tačiau didesnis srovės sunaudojimas gali būti dėl srovės nutekėjimo dėl PCB plokštės defektų. Tolimesniuose skaičiavimuose bus galima naudoti 1 μA , kad būtų paprasčiau skaičiuoti. Iš anksčiau žinome, jog galime sugadinti savo srovės

matavimo įrenginį, todėl reikia nepamiršti jo perjungti atgal į mA diapazoną, kai tik μA eilės parodymai gauti, tai užtikrinsime, jog įrenginys bus nesugadintas.



Pav. 34 Išmatuota nRF51822 lusto miego režimo srovė

Kai jau turime išsimatavę visus svarbiausius parametrus, galime pradėti skaičiuoti lusto suvartojamas sroves. Pirmiausia galima pradėti nuo vidutinės sunaudojamos srovės prisijungimo momentu:

Lentelė 6 Pirmuoju atveju gauti laikai ir srovės

	1	2	3	4	5	6	7	8
Etapų laikai T, μs	150	350	1040	90	320	120	120	330
Etapų srovės A, mA	7,6	3,24	0,8	8,68	12,52	9,24	11,6	5,48
Visas pabudimo laikas t, μs	2550							

Vidutinė sunaudojama srovė prisijungimo metu V_{IPM1} :

$$V_{IPM1} = \frac{(T1 \cdot A1 + T2 \cdot A2 + T3 \cdot A3 + T4 \cdot A4 + T5 \cdot A5 + T6 \cdot A6 + T7 \cdot A7 + T8 \cdot A8)}{t}$$

$$= \frac{12202}{2550} = 4,7857 \text{ mA}$$

Iš skaičiavimų matome, jog vieno prisijungimo įvykio metu su trumpesniu laiko momentu, kuris yra 2,550ms, apskaičiuota vidutinė sunaudojama srovė yra 4,7854mA.

Atlikdami tokius pačius skaičiavimus tik su skaičiais iš antrosios lentelės, gausime ilgesniojo prisijungimo laiko vidutinę suvartojamą srovę:

Lentelė 7 Antruoju atveju gauti laikai ir srovės

	1	2	3	4	5	6	7	8
Etapų laikai T, μs	150	340	1040	90	440	110	120	330
Etapų srovės A, mA	7,04	3,36	0,76	8,72	12,48	9,28	11,32	5,6
Visas pabudimo laikas t, μs	2630							

Vidutinė sunaudojama srovė prisijungimo metu V_{IPM2} :

$$V_{IPM2} = \frac{(T1 \cdot A1 + T2 \cdot A2 + T3 \cdot A3 + T4 \cdot A4 + T5 \cdot A5 + T6 \cdot A6 + T7 \cdot A7 + T8 \cdot A8)}{t}$$

$$= \frac{13492}{2630} = 5,130 \text{ mA}$$

Taigi atlikę ilgesniojo prisijungimo laiko vidutinės srovės skaičiavimą, matome, jog apskaičiuota vidutinė srovė yra 5,1300mA.

Sekantis etapas būtų skirtas apskaičiuoti vidutinę sunaudotą srovę, kartu įvertinti ir viso prisijungimo intervalo miego režimo naudojamą srovę. Šiam tikslui atlikti bus naudojama formulė esanti žemiau:

$$\text{Vidutinė_sunaudojama_srovė_prisijungimo_intervalo_metu} = ((\text{Prisijungimo_intervalo_laikas} - \text{Visas_pabudimo_laikas}) \cdot (\text{Vidutinė_sunaudojama_srovė_miego_metu}) + (\text{Visas_pabudimo_laikas}) \cdot (\text{Vidutinė_sunaudojama_srovė_prisijungimo_metu})) / (\text{Prisijungimo_intervalo_laikas})$$

Kaip ir prieš tai skaičiuotuose atvejuose, atliksime skaičiavimus dviem atvejais, nes yra du pabudimo laikai, vienas ilgesnis, kitas trumpesnis. Naudodamiesi prieš tai jau apskaičiuotomis reikšmėmis, šiuose skaičiavimuose galėsime juos panaudoti. Taigi dabar apskaičiuojama vidutinė sunaudojama srovė trumpesniuoju pabudimo atveju – 2,550ms.

Vidutinė sunaudojama srovė prisijungimo intervalo metu V_{IPM1} :

$$V_{IPM1} = \frac{(1000\text{ms} - 2,55\text{ms}) \cdot 0,001\text{mA} + (2,550 \cdot 4,7854\text{mA})}{1000\text{ms}} = 0,0145 \text{ mA}$$

O kai pabudimo trukmė yra ilgesnė, lygi 2,63ms, tuomet srovė bus:

Vidutinė sunaudojama srovė prisijungimo intervalo metu V_{IPM2} :

$$V_{IPM2} = \frac{(1000\text{ms} - 2,63\text{ms}) \cdot 0,001\text{mA} + (2,63 \cdot 5,13\text{mA})}{1000\text{ms}} = 0,0222 \text{ mA}$$

Paskutinis žingsnis, kurį turime atlikti, norint suskaičiuoti vidutinę suvartojamą lusto srovę, yra rasti prieš tai suskaičiuotų verčių vidurkį. Kadangi anksčiau priėmėme sąlygą, jog tiek ilgesnis, tiek trumpesnis prisijungimo laikai įvyksta po vienodą kartų skaičių ir tikimybė abiejų atvejų yra vienoda ir lygi 0,5, tai vidurkis bus skaičiuojamas sekančiai:

$$0,0222\text{mA} \cdot 0,50 + 0,0145\text{mA} \cdot 0,50 = 0,01835 \text{ mA}$$

Vidutinis srovės suvartojimas, kai įrenginys yra prisijungęs yra 0,01835mA arba 18,35μA, taigi turėdami šią vertę galime apskaičiuoti kiek vidutiniškai įrenginys gali išlikti veikiantis ir naudodamas šiuos prisijungimo laikus, kol išsikraus baterija. Šiam skaičiavimui galima naudoti žemiau esančią formulę:

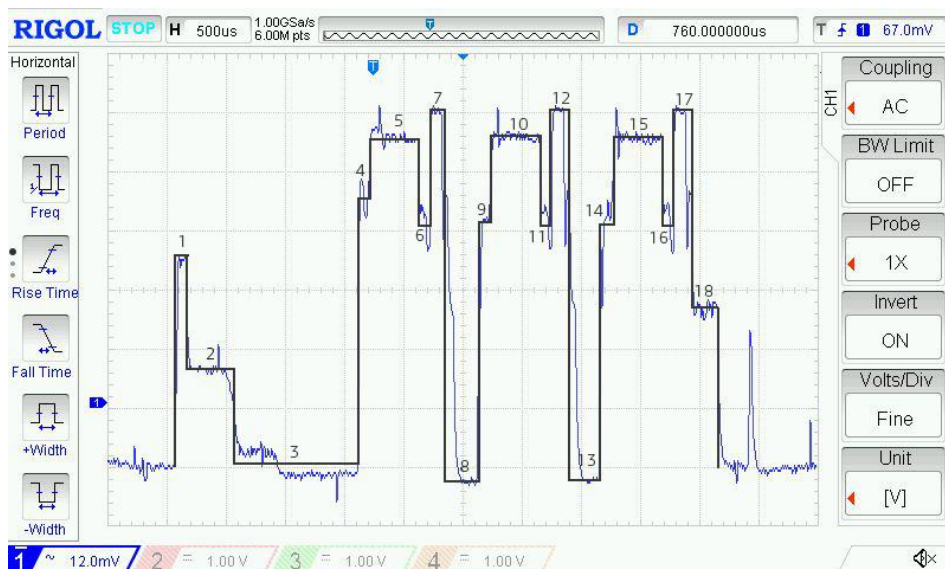
Tikėtinas_baterijos_veikimo_laikas_veikiant_nuolatiniu_prisijungimo_režimu = (Baterijos_talpa) / (Vidutinė_sunaudojama_srovė_prisijungimo_intervalo_metu)

Kadangi mūsų atveju kurį laiką buvo naudojama VARTA firmos elementas CR2032, kurio talpa yra 230 mAh, o iš anksčiau žinome kokia yra vidutinė suvartojama srovė prisijungimo intervalo metu, tuomet galime suskaičiuoti, kokia yra tikėtina baterijos veikimo trukmė:

$$\frac{230\text{mAh}}{0,01835\text{mA}} = 12534 \text{ valandos}$$

Iš šių rezultatų matyti, jog tikėtinas įrenginio veikimo laikas gali būti iki 12534 valandų, kas yra 522 dienos, kai įrenginys veikia nuolatiniu režimu visada suporuotas su prisijungimo intervalu lygiu 1s ir suvėlinimu lygiu 0s.

Nors mūsų tiriamasis atvejis turėjo tik 8 laiko ir srovės dedamąsias, tačiau reikia atkreipti dėmesį į tai, jog taip būna ne visais atvejais, kitais atvejais dedamųjų būna kur kas daugiau. Prieš tai atlikto tyrimo metu buvo gaunamas 20 UUID su nedideliais kiekiais duomenų iš kurių vienas didžiausių buvo gamintojo vardas ir įrenginio vardas, kurie buvo sumažinti iki minimalaus kiekio. Kai kuriais atvejais, prisijungimo metu, gali būti išsiųsti arba priimti keletas duomenų paketų. Tokiais atvejais anksčiau taikyti aštuonių laiko dedamųjų skaičiavimai nebetinka, nes etapų atsiranda kur kas daugiau ir reikia juos visus reikia pamatuoti, šių papildomų etapų gali atsirasti net iki dvidešimties. Žemiau pateikiame keleto duomenų paketų siuntimą:

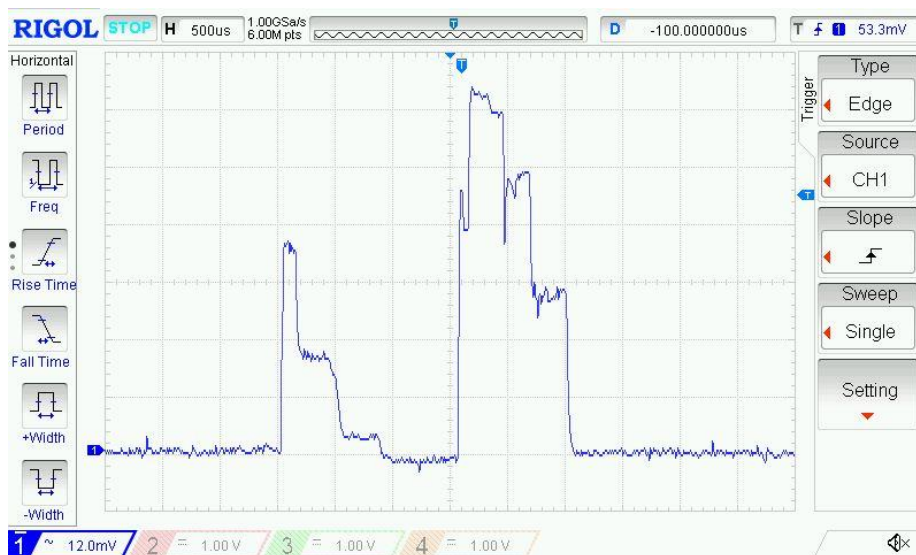


Pav. 35 Didesnio kiekio duomenų pakety persiuntimas, kai atsiranda daugiau etapų

Iš šio pavyzdžio matome, jog anksčiau taikyti skaičiavimai visiškai nebetinka ir tenka naudoti naujus, nes duomenys siunčiami ir priimami kelis kartus.

Kai kuriais atvejais gali būti nustatyta taip, jog duomenys išsiunčiami tik kartą per tam tikrą nustatytą prisijungimų skaičių, todėl gali tecti išsimatuoti visus atvejus ir tokiu būdu rasti bendrą sunaudojamą srovę, kuri ir lems vidutinį baterijos veikimo laiką. Suvartojama srovė skiriasi ir tais atvejais, kai siunčiami ne tušti duomenų paketai, o su tam tikra informacija, nes šiai informacijai apdoroti yra reikalingas kur kas ilgesnis laiko tarpas, todėl ir duomenų apdorojimo ir TX laikai bus ilgesni. To pasakoje skirsis ir vidutinė baterijos veikimo trukmė.

Dar vienas atvejis yra toks, kai duomenys tik siunčiami nelaukiant „master“ įrenginio užklauso, akivaizdžiai matome, jog nebėra RX dalies, todėl savaime suprantama, jog šiam etapui išnykus pagerės sunaudojamos srovės santykis:



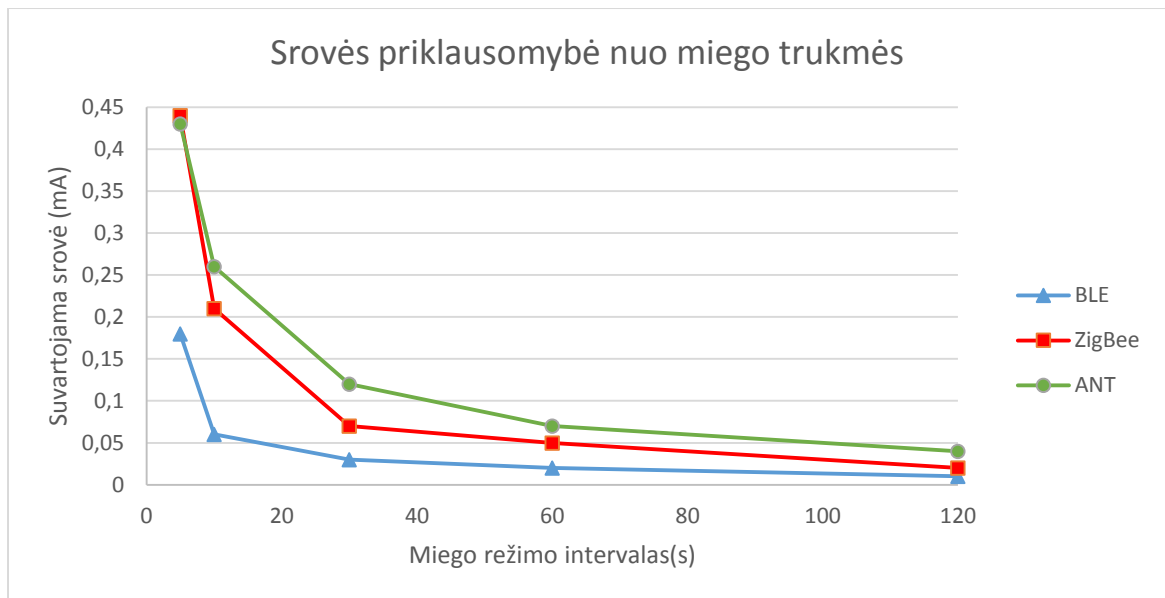
Pav. 36 Duomenų siuntimas tik į vieną pusę

4. Rezultatai ir jų analizė

Tam, kad protokolai būtų palyginti tiesiogiai, buvo pakeisti visi protokolui leistini parametrai „slave“ įrenginiuose į kiek galima vienodus:

- Kiekvienas duomenų perdavimo paketas turėjo vienodą 8-ių baitų nustatytą seką
- Perdavimo galia buvo nustatyta į 0dbm lygį
- Buvo reikalaujamas RF paketo patvirtinimas(angl. „acknowledgement“)
- Fiksuotas atstumas tarp siųstuvo ir imtuvo 30cm
- Duomenų šifravimas išjungtas
- 3.3V maitinimas

Eksperimentas buvo atliktas ofiso patalpose, tačiau ne darbo valandomis, tam kad būtų išvengta galimos RF trukdžių. Šiai užduočiai atlikti ir patvirtinti, jog gaunami duomenys yra patikimi ir priimti teisingai, buvo naudojamas RF nekoduotų duomenų imtuvas (ang. „sniffer“).



Pav. 37 Srovės priklausomybė nuo skirtingų miego intervalų.

Buvo naudojami du identiški ZigBee (XBee S2, Digi International) moduliai[9], iš kurių vienas buvo nustatytas kaip koordinatorius („master“), o kitas kaip „end device“ („slave“). BLE „slave“ įrenginys turi nRF51822 lustą. Prie asmeninio kompiuterio buvo prijungtas „USB dongle“ įrenginys („master“), taip pat turintis taip pat nRF51822 lustą. ANT tinklui tiek „slave“, tiek „master“ įrenginiui buvo naudojami AP2(Nordic Semiconductor) siųstuvai[11]. „Master“ įrenginys prijungtas prie „USB dongle“ ir valdomas su AK programine įranga.

Miego režimo ir aktyvaus „slave“ režimo srovės buvo matuojamos atskirai, tam kad būtų pagerintas tikslumas ir apimtų tik atitinkamą modulį, jokie išoriniai komponentai tokie kaip mikrovaldikliai nebuvo įtraukti. Miego režimo srovė buvo matuojama su multimetru (AX-178, tikslumas $\pm 0,15\%$, rezoliucija $0,01\mu A$), naudojant vidinę $200\ \Omega$ šunto varžą. Miego režimo srovės matavimas buvo vykdomas kas 10 sekundžių, o vidutinė vertė paskaičiuota per 5 minutes. Aktyvaus režimo srovė buvo matuojama su srovės matavimui skirtu lustu (INA226, Texas instrument, tikslumas $0,1\%$, rezoliucija 16-bitų[6]) su išorine šunto varža $10\ \Omega$.



Pav. 38 Tiesinė priklausomybė tarp Srovės suvartojimo ir ciklo (vidutinis pabudimo laikas padalintas iš viso laiko reikiamo vienam ciklui)

Vidutinis srovės suvartojimas, kai miego intervalai yra 5, 10, 30, 60 ir 120 sekundžių yra pateiktas grafike anksčiau („Srovės priklausomybė nuo miego trukmės“), o grafiką apibendrinantys duomenys pateikti žemiau:

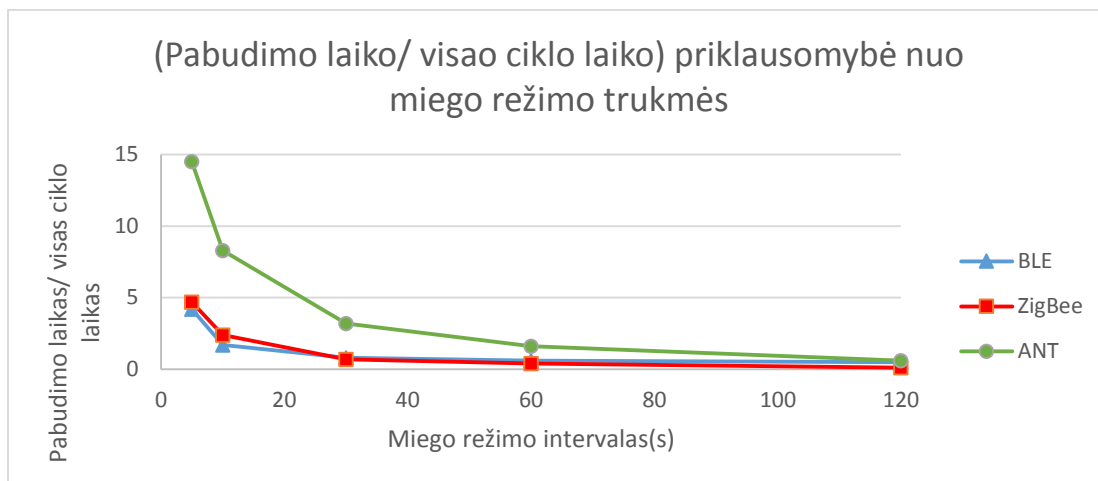
Lentelė 8 visų trijų protokolų srovės suvartojimas, kai maitinimas yra 3,3V

	ANT	BLE	ZigBee
Miego režimo srovė	3,57 μ A	1,02 μ A	4,25 μ A
Pabudimo srovė	3,1mA	4,4mA	12,3mA
Minimali srovė 120s intervale	30,4 μ A	9,8 μ A	16,2 μ A
Optimalus miego intervalas	16,6s	10,4s	13,2s

Iš grafiko pateikto aukščiau („Sunaudojamos srovės priklausomybė nuo pabudimo laiko ir viso ciklo santykio“) matome, jog pabudimo laiko ir viso ciklo santykis yra normuotas tiesišku masteliu, taigi iš šio grafiko galime pastebėti, jog BLE parodė geriausias rezultatus lyginant su ANT ir ZigBee visuose miego režimo intervaluose. Galime pastebėti, jog ZigBee visais tiriamais atvejais turėjo mažesnę sunaudojamą srovę nei ANT, išskyrus ties 5 sekundžių intervalu. Iš RF nekoduotų duomenų imtuvo stebėjimų galime teigti, jog ne visi paketai buvo gauti, tačiau didžioji dalis, daugiau nei 99% duomenų paketų, buvo gauti teisingai.

Miego režimo srovė nevysiškai išaiškina srovės suvartojimo skirtumus tarp protokolų, kai pavyzdžiui ANT protokolo miego režimo srovė buvo 3,57 μ A, o ZigBee

protokolui $4,25\mu\text{A}$, bet visa sunaudojama srovė ZigBee protokolui buvo mažesnė. Panaši situacija ir su ANT protokolu, kuris pabudimo metu sunauduoja tik $3,1\text{mA}$, kai tuo tarpu ZigBee protokolas $12,3\text{mA}$. Didžioji skirtumo dalis iš dalies gali būti paaiškinta tuo, jog siųstuvas būna įjungtas per ilgai, tai atvaizduoja žemiau pateiktas grafikas:



Pav. 39 Vidutinis ciklas skirtinguose miego intervaluose

Po to, kai „slave“ įrenginys išsiuntęs duomenų paketą atsijungia, kiekvienam naujam ciklui susijungimo parametrai turi būti atstatyti ir todėl pabudimo metu yra sunaudojama nemaža laiko dalis kiekvieną kartą. „Slave“ pabudimo momentu pradėdama siųsti atsibudimo būseną ir yra laukiama kol klausantysis „master“ įrenginys ir „slave“ bus sinchronizuoti tarpusavyje, tik tada įvyksta naudingųjų duomenų pasikeitimas. Pastebime, jog ANT turi akivaizdžiai didesnę vidutinį ciklą, negu ZigBee, tai yra pabudimo laiko ir viso ciklo laiko santykis, o taip yra todėl, kad yra užtrunkama ilgiau norint atlikti tą patį procesą. Iš visų protokolų oscilogramų galima pastebėti, jog ANT protokolas turi gerokai daugiau skirtingų prisijungimo laikų, ir visi jie yra žymiai ilgesni lyginant su ZigBee protokolu. Didžiausią įtaką, cikliškai miegančių įrenginių energijos sunaudojimo efektyvumui lemia cikliškas prisijungimo scenarijus. Be viso to, BLE protokolas turi esminę kliūtį ciklinio miego scenarijui, kadangi yra naudojama kintančio dažnio schema, kuri iš prigimties užima didesnę laiko dalį prisijungimo metu, lyginant su fiksuoto dažnio radijo kanalą naudojančiais ZigBee ir ANT protokolais.

Iš grafiko, kuriame yra pavaizduota srovės priklausomybė nuo miego intervalo, galime matyti, jog yra didelės srovės sąnaudos, kai miego intervalas yra trumpas, ypač kai jis tik 5 ar 10 sekundžių, o esant dideliame miego intervalui, kaip pavyzdžiui 60 sekundžių, galime pamatyti, kad taip drastiškai srovės sunaudojimas nebekinta. Tai matydami galime daryti prielaidą, jog yra tam tikras intervalas, kurį naudojant yra sunaudojama mažiausiai srovės, o duomenys išsiunčiami mažiausiu laiko intervalu, o nuokrypis nuo šio intervalo labai brangiai

kainuos energijos sąskaita ir duomenų perdavimo sparta. Norėdami įvertinti optimalų intervalą, iš prieš tai minėto grafiko duomenų (srovės suvartojimo priklausomybė nuo miego intervalo), buvo atlikta išvestinės visoms kreivėms, kurios artėjo link 0 miego intervalo laikui didėjant, pasirinktas 0,01 lygmuo ir pagal jį žiūrima kuriuo laiko momentu yra kertama ši riba kiekvienos išvestinės. Paaiškėjo, jog optimalus laiko intervalas BLE protokolui būtų 10,4 sekundžių, ZigBee protokolui 13,2 sekundžių, o ANT protokolui 16,6 sekundžių.

Šio tyrimo metu buvo išsiaiškina koks turėtų būti optimalus intervalas, kuriuo naudojantis duomenys būtų perduoti maksimalia sparta su mažiausiais energijos nuostoliais, toks atvejis tinka, kai nėra reikalaujamas tikslus ir apibrėžtas duomenų perdavimo intervalas. Dauguma atvejų gamintojas leidžia rinktis kokių intervalu įrenginys pereis į miego režimą, tai dažniausiai būna 5, 10, 30, 60 sekundžių, tačiau gamintojas nenurodo, jog tai nėra optimalus režimas norint sumažinti suvartojamą energiją.

Išvados:

Atlikę energijos regeneracijos būdų apžvalgą, galime pastebėti, jog ne visi energijos regeneracijos būdai gali būti pritaikyti mažos galios bevielių jutiklių tinklams, nes regeneruojama energija gali būti tiesiog per maža.

Įvertinus tai, jog energijos iš aplinkos regeneracijos atveju jutiklis pereina į neapibrėžties būseną, buvo rastas palankiausias sprendimas – įtampos detektorius, kuris atiduoda sukauptą regeneruotą energiją į apkrovą histerezės principu ir naudoja vos 20nA srovę, kai tuo tarpu visi panašūs sprendimai naudoja 3μA srovę. 20nA praktiškai nebeįtakoja bevielių jutiklių sunaudojamos srovės.

Atlikus trijų itin mažos galios protokolų tyrimą galime teigti, jog spręsti apie protokolo sunaudojamą energiją iš lusto techninio aprašymo negalime. Energijos sąnaudos priklauso nuo tarpusavyje sąveikaujančių skirtingų faktorių, ne vien tik nuo išsiuntimo, priėmimo ar miego metu naudojamos srovės, kuri paprastai yra nurodyta techniniame aprašyme.

Tyrimo metu paaiškėjo, jog mažiausiai energijos vartojantis protokolas yra BLE, lyginant su ZigBee ir ANT, tomis pačiomis sąlygomis. Esminis pranašumas išryškėja ne miego ar aktyviojo režimu, bet tuo momentu, kai lustas turi pabusti iš miego režimo.

Iš eksperimentinių duomenų buvo pasiūlyta nauja sąvoka, kuri vadinasi optimalus miego intervalas, kurio dėka galima apspręsti cikliško miego mažiausią sunaudojamą energiją. Šis parametras leidžia sunaudoti mažiausią energijos kiekį išsiunčiant

Tyrimo metu paaiškėjo, jog duomenų kiekis neturi reikšmingos įtakos energijos suvartojimui, kaip buvo manyta iš pradžių.

Literatūros sąrašas

1. World Energy Consumption Since 1820 in Charts [žiūrėta 2014-03-29]. Prieiga per internetą: <http://www.financialsense.com/contributors/gail-tverberg/world-energy-consumption-since-1820-in-charts>
2. Bevielių tinklų topologijos [žiūrėta 2014-04-05]. Prieiga per internetą: <http://rtcmagazine.com/articles/view/102871>
3. Energijos regeneracija iš aplinkos [žiūrėta 2014-03-30]. Prieiga per internetą: <http://www.iop.org/resources/energy/#3>
4. RD regeneracija [žiūrėta 2014-05-30]. Prieiga per internetą: http://www.mouser.com/applications/rf_energy_harvesting/
5. Aktyvūs ir pasyvūs RFID [žiūrėta 2014-06-04]. Prieiga per internetą: <http://atlasrfid.com/auto-id-education/active-vs-passive-rfid/>
6. Srovės matavimo lustas [žiūrėta 2015-02-02]. Prieiga per internetą: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina226.pdf>
7. NFC duomenų perdavimas [žiūrėta 2015-02-12]. Prieiga per internetą: <http://www.st.com/web/en/catalog/tools/FM116/SC1444/PF253360?sc=m24lr04e-discovery>
8. Bluetooth Low Energy lusto srovės mažinimo būdai [žiūrėta 2015-02-22]. Prieiga per internetą: <https://devzone.nordicsemi.com/question/5186/how-to-minimize-current-consumption-for-ble-application-on-nrf51822/>
9. ZigBee S2 modulio savybės [žiūrėta 2015-03-01]. Prieiga per internetą: http://ftp1.digi.com/support/documentation/90002168_B.pdf
10. AKM įtampos detektorius [žiūrėta 2015-05-05] <http://www.akm.com/akm/en/file/datasheet/AP4400AEMXX.pdf>
11. ANT AP2 modulių aprašymas [žiūrėta 2015-02-05]. Prieiga per internetą: <https://www.nordicsemi.com/eng/Products/ANT/nRF24AP2-8CH>
12. Bluetooth Smart technologija [žiūrėta 2014-06-08]. Prieiga per internetą: <http://www.bluetooth.com/Pages/low-energy-tech-info.aspx>
13. Bevielių tinklų protokolų lentelė [žiūrėta 2015-03-03]. Prieiga per internetą: <http://searchmobilecomputing.techtarget.com/definition/IEEE-802-Wireless-Standards-Fast-Reference>
14. Mažos galio bevielieji tinklai [žiūrėta 2014-11-02]. Prieiga per internetą: <http://www.link-labs.com/low-power-wireless-sensor-network/>