



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

KOMPIUTERIJOS IR RYŠIŲ TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

Augustė Makšutytė

**LPWPAN ĮRANGOS IR RYŠIO STANDARTŲ PANAUDOJIMO
DAIKTŲ INTERNETE TYRIMAS**

**A STUDY OF THE USE OF LPWPAN HARDWARE AND COMMUNICATION
STANDARDS IN THE IOT**

Baigiamasis magistro darbas

Kompiuterių inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX051

Elektronikos ir elektros inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2025



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

KOMPIUTERIJOS IR RYŠIŲ TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

Augustė Makšutytė

**LPWPAN ĮRANGOS IR RYŠIO STANDARTŲ PANAUDOJIMO
DAIKTŲ INTERNETE TYRIMAS**

**A STUDY OF THE USE OF LPWPAN HARDWARE AND COMMUNICATION
STANDARDS IN THE IOT**

Baigiamasis magistro darbas

Kompiuterių inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX051

Elektronikos ir elektros inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

doc. dr. Darius Guršnys

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Lietuvių kalbos konsultantas

dr. Aušra Žemienė

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Vilnius, 2025

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Augustė Makšutytė, 20231332

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Kompiuterių inžinerija, KTfm-23

(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO) SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2025 m. gegužės 23 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „LPWPAN įrangos ir ryšio standartų panaudojimo daiktų internete tyrimas“ yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Mano darbo vadovas docentas daktaras Darius Guršnys.

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

(Parašas)

Augustė Makšutytė

(Vardas ir pavardė)

<table border="1"> <tr><td>Vilniaus Gedimino technikos universitetas</td></tr> <tr><td>Elektronikos fakultetas</td></tr> <tr><td>Kompiuterijos ir ryšių technologijų katedra</td></tr> </table>		Vilniaus Gedimino technikos universitetas	Elektronikos fakultetas	Kompiuterijos ir ryšių technologijų katedra	<table border="1"> <tr> <td>ISBN</td> <td>ISSN</td> </tr> <tr> <td>Egz. sk.</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Data*</td> <td></td> </tr> </table>		ISBN	ISSN	Egz. sk.		Data*	
Vilniaus Gedimino technikos universitetas												
Elektronikos fakultetas												
Kompiuterijos ir ryšių technologijų katedra												
ISBN	ISSN											
Egz. sk.												
Data*												
Antrosios pakopos studijų Kompiuterių inžinerijos programos magistro baigiamasis darbas												
Pavadinimas	LPWPAN įrangos ir ryšio standartų panaudojimo daiktų internete tyrimas											
Autorius	Augustė Makštutytė											
Vadovas	Darius Guršnys											
		<table border="1"> <tr> <td></td> <td>Kalba: lietuvių</td> </tr> </table>			Kalba: lietuvių							
	Kalba: lietuvių											
Anotacija Baigiamajame magistro darbe nagrinėjami daiktų interneto LPWPAN tinklo ryšio protokolai – Bluetooth Low Energy ir ZigBee. Atliekamas jų energijos sąnaudų tyrimas. Išnagrinėta energijos sąnaudų tyrimus aprašanti literatūra, nustatyti aktualiausi energijos sąnaudų kriterijai. Atliktas praktinis energijos sąnaudų matavimas bei jų tikslumo įvertinimas realiame daiktų interneto kontekste. Pateikiamos baigiamojo darbo išvados. Darbą sudaro 8 dalys: įvadas, literatūros ir technologijų apžvalga, tyrimo įrangos pristatymas, tyrimo matavimai, praktiniai daiktų interneto scenarijų matavimas, išvados, literatūros sąrašas, priedai. Darbo apimtis: 67 p. teksto be priedų, 8 iliustr., 55 lent., 38 bibliografiniai šaltiniai. Atskirai pridedami darbo priedai.												
<table border="1"> <tr> <td>Prasminiai žodžiai: Daiktų internetas, Bluetooth Low Energy, ZigBee, energijos sąnaudos.</td> </tr> </table>				Prasminiai žodžiai: Daiktų internetas, Bluetooth Low Energy, ZigBee, energijos sąnaudos.								
Prasminiai žodžiai: Daiktų internetas, Bluetooth Low Energy, ZigBee, energijos sąnaudos.												

<table border="1"> <tr><td>Vilnius Gediminas Technical University</td></tr> <tr><td>Faculty of Electronics</td></tr> <tr><td>Department of Computer Science and Communications Technologies</td></tr> </table>		Vilnius Gediminas Technical University	Faculty of Electronics	Department of Computer Science and Communications Technologies	<table border="1"> <tr> <td>ISBN</td> <td>ISSN</td> </tr> <tr> <td>Copies No.</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Date*</td> <td></td> </tr> </table>		ISBN	ISSN	Copies No.		Date*	
Vilnius Gediminas Technical University												
Faculty of Electronics												
Department of Computer Science and Communications Technologies												
ISBN	ISSN											
Copies No.												
Date*												
Master Degree Studies Computer Engineering study programme Master Graduation Thesis												
Title	A Study of the Use of LPWAN Hardware and Communication Standards in the IoT											
Author	Augustė Makštutytė											
Academic supervisor	Darius Guršnys											
			Thesis language: Lithuanian									
Annotation The final master's thesis examines the Internet of Things LPWPAN network communication protocols - Bluetooth Low Energy and ZigBee. The energy consumption of these protocols is investigated. The literature describing energy consumption studies is reviewed, and the most relevant energy consumption criteria are identified. Practical energy consumption measurements and the evaluation of measurement accuracy in the real Internet of Things context are performed. The conclusions of the final thesis are presented. The work structure: introduction, literature and technology overview, presentation of research equipment, research measurements, practical measurement of Internet of Things scenarios, conclusions, bibliography, appendices. Thesis consists of: 67 p. of text without appendixes, 8 pictures, 55 tables, 38 bibliographical sources. Appendixes included.												
Keywords: IoT, Bluetooth Low Energy, ZigBee, energy consumption.												

TURINYS

LENTELIŲ SĄRAŠAS	4
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	6
PRIEDŲ SĄRAŠAS	7
SANTRUMPŲ IR TERMINŲ ŽODYNAS	8
IVADAS	9
Darbo pagrįstumas	10
Darbo tikslas	10
Darbo objektas	10
Darbo uždaviniai	11
1. LITERATŪROS IR TECHNOLOGIJŲ APŽVALGA	12
1.1. LPWPAN	12
1.2. Daiktų internetas	12
1.3. Baterijų naudojimas bei energijos sąnaudos	13
1.4. <i>Bluetooth Low Energy</i>	15
1.5. Veiksniai, lemiantys <i>BLE</i> ryšio energijos sąnaudas	17
1.6. <i>ZigBee</i>	18
1.7. Veiksniai, lemiantys <i>ZigBee</i> ryšio energijos sąnaudas	19
1.8. <i>BLE</i> ir <i>ZigBee</i> palyginimas	19
1.9. Mokslinių straipsnių apžvalga	22
1.9.1. Kiek energijos naudoja <i>Bluetooth Low Energy</i> ? Lyginamieji matavimai su <i>ZigBee/802.15.4</i>	22
1.9.2. RSSI pagrindu veikiančių patalpų lokalizavimo metodų palyginimas išmaniuosiuose daiktų interneto pastatuose	24
1.9.3. Komunikacijos protokolų vertinimas medicininių įrenginių sąveikai: <i>BLE</i> ir <i>ZigBee</i>	26
1.9.4. Preliminarus žemos galios belaidžių technologijų tyrimas: <i>ZigBee</i> ir <i>Bluetooth Low Energy</i>	27
1.9.5. <i>Bluetooth Low Energy</i> , <i>ZigBee</i> ir ANT jutiklių mazgų energijos sąnaudų analizė ciklinio miego režime	28
1.9.6. Jutiklių viduje apdorotų ir neapdorotų duomenų perdavimo lyginamasis tyrimas	30
1.10. Mokslinių straipsnių apžvalgos išvados	32
2. TYRIMO ĮGYVENDINIMO ĮRANGA	33
2.1. <i>ESP32-C6</i> mikrovaldiklis	33
2.2. <i>DHT22</i> temperatūros ir drėgmės jutiklis	34
2.3. <i>Power Profiler Kit II</i> energijos sąnaudų matavimo įranga	35
2.4. <i>ESP32-C6</i> energijos sąnaudų palyginimas su gamintojo specifikacijomis	36
2.4.1. Srovės sąnaudos aktyviojo režimo metu	37
2.4.2. Srovės sąnaudos radijo modulio miego režimo metu	40
2.4.3. Srovės sąnaudos mažos galios režimų metu	41

2.4.4.	Srovės sąnaudos prijungus <i>DHT22</i> jutiklį	42
2.4.5.	Bendros sistemos srovės sąnaudos	42
2.4.6.	Poskyrio apibendrinimas	43
3.	TYRIMO MATAVIMAI	44
3.1.	<i>BLE</i> srovės sąnaudų matavimai	44
3.1.1.	Duomenų siuntimas ir gavimas	44
3.1.2.	<i>BLE</i> tinklo reklama.....	46
3.1.3.	<i>BLE</i> tinklo skenavimas	48
3.1.4.	Prisijungimas prie <i>BLE</i> tinklo	49
3.1.5.	Skirtingo dydžio duomenų paketų siuntimas	51
3.1.6.	Skirtingos duomenų perdavimo metodikos	52
3.1.7.	Saugumo parametrai	53
3.1.8.	<i>MTU</i> dydis	54
3.1.9.	<i>PHY</i> vertė.....	55
3.2.	<i>ZigBee</i> srovės sąnaudų matavimai	55
3.2.1.	Duomenų siuntimas ir gavimas	56
3.2.2.	Skirtingo dydžio duomenų paketų siuntimas	57
3.2.3.	Skirtingos duomenų perdavimo metodikos	58
3.2.4.	Tinklo skenavimas	59
3.2.5.	Prisijungimas prie tinklo.....	61
3.3.	Skyriaus apibendrinimas ir išvados	62
4.	PRAKTINIAI DAIKTŲ INTERNETO SCENARIJAI	64
4.1.	<i>BLE</i> scenarijai	64
4.2.	<i>ZigBee</i> scenarijai.....	69
4.3.	Skyriaus apibendrinimas ir išvados	71
	IŠVADOS IR DARBO REZULTATAI.....	73
	LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	75
	PRIEDAI	79

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. <i>BLE</i> ir <i>ZigBee</i> savybių palyginimas	20
2.1 lentelė. <i>WiFi</i> srovės sąnaudos duomenų siuntimo metu	37
2.2 lentelė. <i>WiFi</i> srovės sąnaudos duomenų gavimo metu	38
2.3 lentelė. <i>BLE</i> srovės sąnaudos duomenų siuntimo metu	38
2.4 lentelė. <i>BLE</i> srovės sąnaudos duomenų gavimo metu	39
2.5 lentelė. <i>802.15.4</i> srovės sąnaudos duomenų siuntimo metu	39
2.6 lentelė. <i>802.15.4</i> srovės sąnaudos duomenų gavimo metu	39
2.7 lentelė. Srovės sąnaudos radijo modulio miego metu	40
2.8 lentelė. <i>ESP32-C6</i> srovės sąnaudos mažos-galios režimų metu	41
2.9 lentelė. <i>ESP32-C6</i> srovės sąnaudos prijungus <i>DHT22</i> jutiklį.....	42
2.10 lentelė. <i>ESP32-C6</i> bendros srovės sąnaudos.....	42
3.1 lentelė. <i>BLE</i> srovės sąnaudos duomenų siuntimo skirtingais atstumais metu	44
3.2 lentelė. <i>BLE</i> srovės sąnaudos duomenų gavimo skirtingais atstumais metu	45
3.3 lentelė. Signalų stiprumo vertės skirtingais atstumais	45
3.4 lentelė. <i>BLE</i> srovės sąnaudos duomenų siuntimo metu, pritaikius skirtingus <i>CPU</i> dažnius	46
3.5 lentelė. <i>BLE</i> reklamos, atliekamos skirtingais intervalais, srovės sąnaudos.....	46
3.6 lentelė. <i>BLE</i> reklamos, atliekamos skirtingame reklamos kanalų skaičiuje, srovės sąnaudos....	47
3.7 lentelė. <i>BLE</i> reklama, pritaikius skirtingas reklamavimo taktikas.....	47
3.8 lentelė. Greitojo, aktyvaus bei pasyvaus, skenavimo srovės sąnaudos.....	49
3.9 lentelė. Lėtojo, aktyvaus bei pasyvaus, skenavimo srovės sąnaudos.....	49
3.10 lentelė. <i>BLE</i> kliento srovės sąnaudos prisijungimo metu	50
3.11 lentelė. <i>BLE</i> serverio srovės sąnaudos prisijungimo metu.....	50
3.12 lentelė. <i>BLE</i> kliento srovės sąnaudos prisijungimo metu taikant delsos parametą.....	51
3.13 lentelė. <i>BLE</i> kliento srovės sąnaudos ryšio nutraukimo metu.....	51
3.14 lentelė. <i>BLE</i> srovės sąnaudos skirtingo dydžio duomenų paketų siuntimo metu	51
3.15 lentelė. <i>BLE</i> srovės sąnaudos duomenų perdavimo metu	53
3.16 lentelė. <i>BLE</i> srovės sąnaudos, pritaikius skirtingus saugumo parametrus	54
3.17 lentelė. <i>BLE</i> srovės sąnaudos pritaikius skirtingus <i>MTU</i> dydžius	54
3.18 lentelė. <i>BLE</i> srovės sąnaudos pritaikius skirtingus <i>PHY</i> tipus.....	55
3.19 lentelė. Srovės sąnaudos, naudojant <i>ZigBee</i> protokolą duomenims siųsti.....	56
3.20 lentelė. Srovės sąnaudos, naudojant <i>ZigBee</i> protokolą duomenims gauti	56
3.21 lentelė. <i>ZigBee</i> srovės sąnaudos duomenų siuntimo metu, pritaikius skirtingus <i>CPU</i> dažnius	57
3.22 lentelė. Skirtingo dydžio duomenų perdavimo srovės sąnaudos, naudojant <i>ZigBee</i> protokolą	57
3.23 lentelė. Srovės sąnaudos skirtingose <i>ZigBee</i> duomenų perdavimo metodikose	58

3.24 lentelė. Duomenų perdavimas skirtingais laiko intervalais naudojant <i>ZigBee</i> protokolą	59
3.25 lentelė. <i>ZigBee</i> vykdomo aktyvaus bei pasyvaus tinklo skenavimo srovės sąnaudos	60
3.26 lentelė. <i>ZigBee</i> srovės sąnaudos tinklo skenavimo metu	60
3.27 lentelė. <i>ZigBee</i> srovės sąnaudos galinio įrenginio prisijungimo metu.....	61
3.28 lentelė. <i>ZigBee</i> srovės sąnaudos galinio įrenginio ryšio nutraukimo metu.....	61
4.1 lentelė. Pirmojo <i>BLE</i> scenarijaus žingsnių teoriniai skaičiavimai	65
4.2 lentelė. Pirmojo <i>BLE</i> scenarijaus vieno ciklo sąnaudų palyginimas.....	65
4.3 lentelė. Pirmojo <i>BLE</i> scenarijaus sąnaudų palyginimas.....	66
4.4 lentelė. Antrojo <i>BLE</i> scenarijaus žingsnių teoriniai skaičiavimai.....	66
4.5 lentelė. Antrojo <i>BLE</i> scenarijaus vieno ciklo sąnaudų palyginimas	67
4.6 lentelė. Antrojo <i>BLE</i> scenarijaus sąnaudų palyginimas	67
4.7 lentelė. Trečiojo <i>BLE</i> scenarijaus žingsnių teoriniai skaičiavimai.....	67
4.8 lentelė. Trečiojo <i>BLE</i> scenarijaus vieno ciklo sąnaudų palyginimas	68
4.9 lentelė. Trečiojo <i>BLE</i> scenarijaus sąnaudų palyginimas	68
4.10 lentelė. Pirmojo <i>ZigBee</i> scenarijaus žingsnių teoriniai skaičiavimai	69
4.11 lentelė. Pirmojo <i>ZigBee</i> scenarijaus vieno ciklo sąnaudų palyginimas.....	70
4.12 lentelė. Pirmojo <i>ZigBee</i> scenarijaus sąnaudų palyginimas	70
4.13 lentelė. Antrojo <i>ZigBee</i> scenarijaus žingsnių teoriniai skaičiavimai	70
4.14 lentelė. Antrojo <i>ZigBee</i> scenarijaus vieno ciklo sąnaudų palyginimas	71
4.15 lentelė. Antrojo <i>ZigBee</i> scenarijaus sąnaudų palyginimas.....	71

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. <i>BLE</i> protokolo sąnaudos duomenų siuntimo ir gavimo metu (Siekkinen et al., 2012).....	23
1.2 pav. <i>ZigBee</i> srovės sąnaudos duomenų siuntimo metu (Siekkinen et al., 2012)	24
1.3 pav. <i>BLE</i> , <i>ZigBee</i> ir <i>ANT</i> protokolų energijos sąnaudų, pritaikius skirtingus miego intervalus, palyginimas (Dementyev et al., 2013).....	29
1.4 pav. <i>ZigBee</i> , <i>BLE</i> ir <i>WiFi</i> srovės sąnaudų, siunčiant skirtingo dydžio paketus, palyginimas (Shahzad & Oelmann, 2014)	31
2.1 pav. <i>ESP32-C6</i> mikrovaldiklis (<i>Espressif Systems</i> , 2025).....	33
2.2 pav. <i>DHT22</i> temperatūros ir drėgmės jutiklis (<i>Aosong Electronics Co. Ltd.</i>).....	35
2.3 pav. <i>Power Profiler Kit 2</i> srovės matavimo įranga (<i>Nordic Semiconductor ASA</i> , 2022)	36
2.4 pav. Energijos sąnaudų tyrimo atlikimas	36

PRIEDŲ SĄRAŠAS

1 priedas. Programinės įrangos kodas	79
2 priedas. <i>WiFi 802.11b</i> srovės sąnaudų matavimo profilis.....	80
3 priedas. <i>802.15.4</i> srovės sąnaudų matavimo profilis (pažymėta teritorija – 12 <i>dBm</i> srovės sąnaudų testas).....	81
4 priedas. Radijo miego režimo srovės sąnaudų matavimo profilis (160 MHz <i>CPU</i> dažnis, periferija išjungta).....	82
5 priedas. Gilaus miego srovės sąnaudų matavimo profilis	83
6 priedas. Lengvo miego srovės sąnaudų matavimo profilis	84
7 priedas. <i>DHT22</i> jutiklio, prijungto prie <i>ESP32-C6</i> mikrovaldiklio, srovės sąnaudų matavimo profilis.....	85
8 priedas. <i>BLE</i> siųstuvo, naudojančio 9 <i>dBm</i> siųstuvo galią, srovės sąnaudų matavimo profilis	86
9 priedas. <i>BLE</i> siųstuvo atliekamo didelio duomenų paketo siuntimo srovės sąnaudų matavimo profilis.....	87
10 priedas. <i>ZigBee</i> siųstuvo, naudojančio 9 <i>dBm</i> siųstuvo galią, srovės sąnaudų matavimo profilis	88
11 priedas. <i>ZigBee</i> kelių kanalų skenavimo srovės sąnaudų matavimo profilis	89
12 priedas. <i>ZigBee</i> mažo duomenų paketo siuntimo srovės sąnaudų matavimo profilis	90
13 priedas. Pirmojo <i>BLE</i> eksperimento srovės suvartojimo grafikas.....	91
14 priedas. Pirmojo <i>ZigBee</i> eksperimento srovės suvartojimo grafikas.....	92

SANTRUMPŲ IR TERMINŲ ŽODYNAS

LPWPAN (angl. *Low Power Wireless Personal Area Network, LPWPAN*) – mažos galios belaidis PAN tinklas. Tai yra tinklo technologija, skirta mažos galios įrenginiams, kurie veikia labai ribotu atstumu ir sudaro asmeninio ryšio tinklą.

IoT (angl. *Internet of Things, IoT*) – daiktų internetas. Tai yra koncepcija, kurioje įprasti kasdien naudojami objektai yra prijungiami prie interneto ryšio, leidžiant jiems siųsti ir gauti duomenis.

LPWAN (angl. *Low Power Wide Area Network, LPWAN*) – mažos galios daiktų interneto tinklų kategorija, pritaikyta mažoms energijos sąnaudoms.

BLE (angl. *Bluetooth Low Energy, BLE*) – belaidė ryšio technologija, skirta duomenų perdavimui trumpais atstumais naudojant itin mažai energijos.

ZigBee – belaidžio ryšio technologija, naudojama sukurti mažos galios, mažo nuotolio tinklus. Dažnai naudojama namų automatizavime ir pramonės valdymo sistemose.

PAN (angl. *Personal Area Network, PAN*) – asmeninis ryšio tinklas. Tai tinklas, kuris apima nedidelį geografinį plotą ir yra naudojamas asmeninių įrenginių veikimui (pvz., kompiuteriai, telefonai, išmanieji laikrodžiai).

GPIO (angl. *General Purpose Input/Output, GPIO*) – bendrosios paskirties įvesties/išvesties jungtys. Mikrovaldiklių sąsajos, leidžiančios prijungti ir valdyti išorinius įrenginius.

SoC (angl. *System on a Chip, SoC*) – integruota mikroelektronikos sistema, kuri viename luste apjungia mikroprocesorių, atmintį ir įvesties/išvesties sąsajas.

CPU (angl. *Central Processing Unit, CPU*) – centrinis valdymo vienetas, atsakingas už kompiuterio arba mikrovaldiklio programų, instrukcijų vykdymą ir valdymą.

RX (angl. *Receive, RX*) – ryšio įrenginio funkcija, skirta signalams ar duomenims gauti.

TX (angl. *Transmit, TX*) – ryšio įrenginio funkcija, skirta signalams ar duomenims siųsti.

RSSI (angl. *Received Signal Strength Indicator, RSSI*) – gauto signalo stiprumo indikatorius, rodantis priimamo radijo signalo lygį.

dBm (angl. *decibel milliwatt, dBm*) – galios lygmens matavimo vienetas, išreiškiantis radijo signalo galią decibelais, lyginant su 1 milivato (mW) etalonine galia.

IVADAS

Daiktų internetas – tai šiuolaikinė technologinė koncepcija, kuri yra apibrėžiama kaip įvairių kasdienio naudojimo objektų sujungimas į bendrą komunikacijos tinklą. Ši technologija leidžia tinkle esantiems įrenginiams keistis duomenimis tiek tarpusavyje, tiek su išorinėmis sistemomis. Pagrindinis daiktų interneto koncepcijos principas yra skirtingų technologijų ir komunikacijos sprendimų integravimas į bendrą sistemą (Atzori, Iera, & Morabito, 2010).

Daiktų interneto populiarumas sparčiai auga. Šaltiniuose yra teigiama, jog 2023-aisiais metais *IoT* įrenginių skaičius turėtų perkopti 15 milijardų, taip pažymint net 55 % augimą palyginti su 2020-aisiais metais (Kulkarni, 2024). Yra duomenų, jog iki 2025-ųjų metų pabaigos visame pasaulyje bus daugiau nei vienas trilijonas daiktų interneto įrenginių (Zhang et al., 2022). Šį augimą gana seniai numatė Jungtinių Amerikos Valstijų Nacionalinės žvalgybos taryba (angl. *National Intelligence Council*), kuri nurodė, jog daiktų internetas yra įtraukiamas į sąrašą objektų, kurie gali daryti įtaką valstybės nacionalinei galiai. Šios institucijos duomenimis, iki 2025-ųjų metų interneto mazgų gali būti randama daugelyje kasdien naudojamų objektų, pvz., maisto pakuotėse, balduose ar net popieriniuose dokumentuose (*National Intelligence Council*, 2021).

Dauguma daiktų interneto sprendimų turi veikti nepertraukiamai, kad suteiktų galimybę atlikti sprendimų priėmimą realiu laiku. Puikus tokios sistemos pavyzdys – sveikatos priežiūros įrenginiai (pvz., širdies ritmo monitoriai, nuolatiniai gliukozės matuokliai) ar pramonės sistemos, privalančios užtikrinti gamybos proceso tęstinumą. Net ir trumpas tokių sistemų veikimo proceso sustojimas ar nepasiekiamumas gali turėti rimtų pasekmių. Dėl šių priežasčių daiktų interneto sistemos bei jų ryši užtikrinantys standartai turi būti projektuojami taip, jog veiktų stabiliai ir be perstojo.

Norint užtikrinti efektyvų ir nepertraukiamą daiktų interneto sprendimų veikimą svarbu užtikrinti du esminius dalykus: patikimą tinklo ryšį bei energijos valdymą. Patikimas tinklo ryšys užtikrina, jog duomenys būtų perduodami laiku ir be jokių trikdžių, o efektyvus energijos valdymas suteikia galimybę baterijomis maitinamiems įrenginiams veikti ilgiau. Siekiant užtikrinti tiek ryšio stabilumą, tiek energijos tausojimą, daiktų interneto komunikacijos vykdymui yra naudojami *LPWPAN* – mažomis energijos sąnaudomis pasižymintys, nedideliu atstumu veikiantys belaidžiai tinklai.

Ši magistro darbo tema aprėpia *LPWPAN* tinklą bei juose funkcionuojančių *IoT* įrenginių ir jų protokolų tarpusavio veikimo tyrimą. Šio tyrimo metu siekiama įvertinti mažos galios bei mažo nuotolio tinklų energijos sąnaudas, kurios yra suvartojamos užtikrinant daiktų interneto siųstuvų-imtuvų tarpusavio komunikaciją. Tyrimo metu yra siekiama identifikuoti, kokios trumpo nuotolio komunikacijos protokolų savybės yra pačios svarbiausios daiktų interneto sistemose, kad būtų sukuriamas korektiškas įrenginių tarpusavio bendravimo būdas, užtikrinant tiek mažą energijos naudojimą, tiek nenutrūkstamą duomenų gavimą ar siuntimą.

Darbo pagrįstumas

Daiktų interneto sistemose naudojamų komunikacijos protokolų energijos sąnaudų tyrimai yra aktuali bei dažnai akademiniuose darbuose aptariama tema. Yra gausybė mokslinių straipsnių, kuriuose yra aprašomi ne tik individualūs *Bluetooth Low Energy* ar *ZigBee* energijos sąnaudų tyrimai, bet ir pristatomi šių dviejų komunikacijos protokolų energijos sąnaudų lyginamosios analizės rezultatai.

Tokio pobūdžio mokslinių straipsnių gausa parodo temos svarbą ir praktinę reikšmę realiame komunikacijos protokolų pritaikymo kontekste. Vis dėlto skirtingų ryšio protokolų energijos sąnaudų tyrimų rezultatai pateikiami tik kaip orientacinės gairės, o ne kaip vienareikšmė taisyklė. Skirtingi tyrėjai naudoja skirtingą programinę bei aparatinę įrangą, nevienodus apkrovų modelius, skirtingus ryšio parametrus, o naudojama sąnaudų matavimo įranga skiriasi jautrumu ar kalibravimo tikslumu, matavimai atliekami esant skirtingoms aplinkos sąlygoms. Vienuose straipsniuose pateikiamos ryšio protokolų energijos sąnaudų išvados gali būti paneigiamos kituose. Net ir oficialiose aparatinės įrangos specifikacijose nurodytos energijos sąnaudos gali skirtis realaus naudojimo sąlygomis.

Dauguma daiktų interneto sprendimų veikia naudodami baterijas kaip pagrindinį maitinimo šaltinį. Dažnas baterijų keitimas yra neekonomiškas. Dėl šios priežasties daiktų interneto sistemos turi būti kuriamos taip, kad, naudodamos tas pačias baterijas, užtikrintų stabilų ir ilgalaikį veikimą. Norint kurti ir projektuoti energijos aspektu efektyvias daiktų interneto sistemas, svarbu įvertinti pasirinktos įrangos ir naudojamų ryšio protokolų vidutinės energijos sąnaudas skirtingais veikimo režimais.

Tiriamajame magistro darbe atliekama *Bluetooth Low Energy* ir *ZigBee* ryšio protokolų energijos sąnaudų analizė realiomis naudojimo sąlygomis. Gauti energijos sąnaudų rezultatai sudaro išsamų komunikacijos protokolų energijos sąnaudų profilį. Šis leidžia objektyviai įvertinti ir palyginti skirtingus ryšio konfigūracijos parametrus, optimizuoti energijos sąnaudas bei užtikrinti ilgalaikį ir patikimą kuriamų daiktų interneto sistemų veikimą.

Darbo tikslas

Darbo tikslas – ištirti mažos galios trumpojo nuotolio belaidžių tinklų ryšio standartų energijos sąnaudas, išskiriant aktualiausias daiktų interneto sistemų savybes.

Darbo objektas

BLE (angl. *Bluetooth Low Energy*) ir *ZigBee* – mažos galios, trumpojo nuotolio belaidžių tinklų ryšio standartų energijos sąnaudos, realizuotos *ESP32-C6* platformoje, daiktų interneto sistemose.

Darbo uždaviniai

Siekiant įgyvendinti darbo tikslą, keliami šie uždaviniai:

1. Atlikti *LPWPAN BLE* ir *ZigBee* ryšio standartų analizę ir tarpusavio palyginimą. Išnagrinėti kiekvieno standarto privalumus ir trūkumus skirtingose *IoT* taikymo srityse.
2. Aprašyti praktiniams eksperimentams pasirinktus įrenginius, jų technines specifikacijas, kaip jie pritaikomi *LPWPAN* technologijų tyrimui.
3. Atlikti eksperimentinę *LPWPAN* ryšio standartų tyrimą realiomis sąlygomis.
4. Apibendrinti gautus eksperimentinio tyrimo rezultatus su apskaičiuotomis vidutinėmis energijos sąnaudomis, esant skirtingai veikimo būsenai ir skirtingomis realiomis aplinkos sąlygomis, pabrėžiant nustatytas svarbiausias tendencijas.

1. LITERATŪROS IR TECHNOLOGIJŲ APŽVALGA

Daiktų internetas – sparčiai auganti technologinė paradigma, kuri sulaukia daug dėmesio akademiname pasaulyje. Gausu straipsnių, kuriuose, taikant skirtingus ryšio protokolus, pristatomi įvairūs daiktų interneto modeliai, architektūros, technologiniai sprendimai ir jų palyginimai. Visi šie straipsniai – tai akademinės visuomenės indėlis tobulinant daiktų interneto sistemų veikimą, jų saugumą bei energetinį efektyvumą įvairiose taikymo srityse.

Šioje dalyje pristatomi pagrindiniai darbo elementai: *LPWPAN* tinklai, juose naudojami *BLE* ir *ZigBee* ryšio protokolai, daiktų internetas bei energijos sąnaudų svarba. Taip pat pristatomi moksliniai darbai, kuriuose atliekami *LPWPAN* ryšio technologijų energijos sąnaudų tyrimai.

1.1. LPWPAN

LPWPAN tinklai – tai mažesnė *LPWAN* tinklų atmaina. *LPWPAN* tinklo pavadinimas sudarytas iš dviejų terminų, apibūdinančių pačio tinklo veikimo principą. *LP* – ši pavadinimo dalis apibūdina, kad tai yra mažo galingumo tinklas (angl. *Low Power*, *LP*). Likusi pavadinimo dalis – *WPAN* (angl. *Wireless Personal Area Network*, *WPAN*) – belaidis asmeninio naudojimo tinklas.

Belaidis asmeninio naudojimo tinklas apima ribotą geografinę lokaciją ir yra skirtas informacijai perduoti tarp artimai tarpusavyje susijusių stočių. *WPAN* tinklas veikia be papildomos infrastruktūros (išorinių prieigos taškų ar bazinių stočių), siunčia duomenis trumpais atstumais ir neturi tiesioginio ryšio su išoriniu pasauliu. *WPAN* tinklas yra aprašytas *IEEE 802.15* serijos standartuose (*802.15.1 – Bluetooth* bei *802.15.4 – ZigBee*), kuriuose apibrėžtos tiek fizinio sluoksnio (*PHY*), tiek prieigos prie tinklo terpės kontrolės (*MAC*) specifikacijos (*IEEE 802 Working Group*, 2024). *WPAN* ribotas veikimo atstumas siekia iki dešimties metrų.

1.2. Daiktų internetas

Daiktų internetas – tai technologinė koncepcija, pagal kurią kasdien naudojami fiziniai objektai yra prijungiami prie ryšio tinklo. Tai leidžia įrenginiams rinkti, perduoti ir analizuoti duomenis realiu laiku. Įrenginių prijungimas prie tinklo suteikia galimybę vykdyti nuotolinę įrenginių stebėseną ir valdymą. Pagrindinis daiktų interneto idėjos tikslas – stebėti ir valdyti daiktus nuotoliniu būdu bei automatizuoti sprendimų priėmimą remiantis surinktais duomenimis (O’Leary & Vakaloudis, 2019).

Daiktų interneto koncepcija – tai ne tik techninė platforma. Nuo šiol *IoT* – tai naujos kartos verslo paslauga. Įmonės pritaiko daiktų interneto technologiją kuriamoje produkcijoje, taip pereinant nuo vienkartinio produkto pardavimo prie nuolatinių, duomenų pagrindu teikiamų sprendimų. Pagal „Gartner“ tyrimų ir konsultacijų įmonės sukurtą „Gartner Hype Cycle“ modelį, *IoT* technologijų

visuma yra įvardijama kaip „nauja verslo modelio architektūra“. Daiktų internetas suteikia galimybę į fizinius produktus integruoti skaitmenines funkcijas. Pavyzdžiui, medicinos įrangą gaminanti įmonė „Phillips“ į rentgeno ir ultragarso aparatus integruoja duomenų rinkimo mazgus (Sharbaf, 2022). Pagal šių mazgų surinktus duomenis įmonė gali analizuoti gautus diagnostikos parametrus bei teikti konsultacijas ligoninėms. Tokių konsultacijų teikimas leidžia optimizuoti įrangos išlaikymo kaštus ir gerinti pacientų aptarnavimo kokybę (Aboshosha et al., 2019). Ši paslauga iš anksto nustato galimus gedimus bei numato galimus diagnostikos ir priežiūros žingsnius.

Galimas *IoT* sprendimų pritaikymas yra platus ir apima įvairias sritis, tokias kaip namų apyvokos sistemos, pramonė, miestų infrastruktūra, žemės ūkis ar anksčiau minėtas sveikatos priežiūros pavyzdys. Daiktų internetas atveria naujas galimybes integruoti pažangias technologijas, skirtas atlikti aplinkos sąlygų sekimą, stebėjimą bei reguliavimą. Tokiu būdu užtikrinamas pramonės efektyvumas, kasdienio gyvenimo patogumas, automatizavimas. Norint užtikrinti šių sprendimų patikimumą, būtina atitikti daiktų interneto sistemoms keliamus reikalavimus.

2023 metais Brazilijos mokslininkų išleistame straipsnyje yra pateikiamas suformuotas būtinų *IoT* sistemų reikalavimų sąrašas. Autoriai, remdamiesi *ITU-T* (angl. *International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector*) rekomendacijomis bei įvykdyta ekspertų apklausa, išskyrė 26 reikalavimus, kurie yra būtini kiekvienai kuriamai daiktų interneto sistemai. Tarp šių reikalavimų yra išskirti du punktai „Mažos galios mikrovaldiklių naudojimas“ ir „Mažos galios belaidžio ryšio protokolų pritaikymas“ (Barros & Teixeira, 2023). Pirmasis reikalavimas numato, kad sistema turi sklandžiai veikti su mažai energijos vartojančiais mikrovaldikliais. Šie mikrovaldikliai suteikia galimybę naudoti energijos taupymo režimus – lengvo ir gilaus miego ciklus bei dinaminį procesoriaus dažnio reguliavimą. Antrasis punktas – mažos galios belaidžio ryšio technologijų pritaikymas – apima efektyvius ryšio protokolus, tokius kaip *BLE* ar *ZigBee*. Šie protokolai pasižymi mažų energijos sąnaudų generavimu. Abi šios savybės orientuotos į baterijomis maitinamus *IoT* sprendimus. Šių savybių taikymas užtikrina, kad įrenginiai naudotų mažomis energijos sąnaudomis pasižyminčius ryšio protokolus ir energiją taupančius veikimo režimus. Savybių taikymo siekiamybė – maksimaliai pailginti baterijų veikimo laiką.

1.3. Baterijų naudojimas bei energijos sąnaudos

Daugelyje daiktų interneto sprendimų baterijos naudojamos kaip pagrindinis sistemos maitinimo šaltinis. Energijos sąnaudos yra svarbus veiksnys projektuojant mažos savikainos ir galios jautrių tinklus, kurie veikia naudodami baterijas (Bocca et al., 2022).

Baterijos yra naudojamos dėl suteikiamo mobilumo, patogumo bei nepriklausomybės nuo fizinio elektros tinklo. Tai yra ypač patogu, kai daiktų interneto sprendimai yra diegiami lokacijose,

kuriose nėra centralizuoto elektros energijos tiekimo tinklo. Baterijų naudojimas taip pat užtikrina atsparumą elektros energijos tiekimo trikdžiams. Ši savybė yra svarbi kritinėse aplikacijose, kuriose nuolatinis duomenų rinkimas ir perdavimas yra būtinas.

Baterijų naudojimo populiarumas kartu su savimi atsineša ir naujus iššūkius. Baterijos išsikrauna, todėl daiktų interneto sprendimai patiria veikimo ilgaamžiškumo ribojimus. Baterijos gyvavimo laikas, per kurį baterija yra iškraunama, gali svyruoti nuo kelių valandų iki kelių savaičių ar mėnesių. Galimybė įvertinti naudojamos baterijos veikimo laiką yra svarbus elementas projektuojant ir diegiant daiktų interneto sprendimus (Jagmohandas & Rosado, 2021). 2021 metais išleistame Portugalijos mokslininkų darbe teigiama, jog formulių naudojimas siekiant nustatyti, kiek ilgai baterija išliks veikianti, nėra pakankamai tikslus ilgaamžiškumo įvertinimas. Kuriant baterijomis maitinamą daiktų interneto sistemą svarbu įvertinti, jog baterijų ilgaamžiškumas kiekviename *IoT* scenarijuje turi būti vertinamas individualiai. Galimas baterijų gyvavimo laikas priklauso nuo konkretaus taikymo scenarijaus, pasirinktos programinės ir aparatinės įrangos. Baterijų ilgaamžiškumas taip pat priklauso ir nuo išorės sąlygų – žemesnėje negu 0 °C aplinkos temperatūroje, baterijų talpa (matuojama ampervalandėm, Ah) itin krenta. Svarbu atkreipti dėmesį ir į pačios baterijos montavimą sistemoje – jei jos aplinkoje kaupiasi šiluma, baterija įkaista ir dėl to greičiau sensta.

Baterijos veikimo laiką reikia vertinti atsižvelgiant į konkrečius įrenginio energijos suvartojimo modelius ir naudojimo scenarijus. Žinant šią informaciją galima tiksliau prognozuoti, kiek laiko baterija išliks veikianti realiomis eksploatacijos sąlygomis. Tam, kad būtų galima įvertinti baterijos gyvavimo laikotarpį, svarbu nustatyti, kiek elektros energijos naudoja kiekvienas galimas sistemos veiksmas. Svarbu žinoti generuojamas energijos sąnaudas tiek aktyvaus veiksmo metu, tiek ramybės ar miego būsenose (Fox et al., 2019).

Dauguma *IoT* prietaisų veikia naudodami baterijas, kaip pagrindinį maitinimo šaltinį, todėl neplanuotas baterijos išsikrovimas gali turėti rimtų pasekmių – nuo prarastų duomenų žemės ūkio jutikliuose iki gyvybiškai svarbių implantų gedimų medicinoje. 2021 metais išleistame Brad Jolly straipsnyje teigiama, jog vienas iš penkių pagrindinių iššūkių keliamų daiktų interneto sistemoms yra tęstinumas (angl. *continuity*). Tęstinumo sąvoka yra tiesiogiai susijusi su ilgu baterijomis maitinamų įrenginių veikimo laikotarpiu (Jolly, 2021). Straipsnyje taip pat teigiama, jog norint tiksliai numatyti daiktų interneto įrenginių baterijų veikimo laiką, svarbu įvertinti tiek vidutines, tiek maksimalias srovės sąnaudas. Maksimalios srovės sąnaudos gali parodyti sistemos veikimo metu patiriamus staigius srovės šuolius. Taip pat svarbi ilgalaikė sistemos veikimo analizė. Jos metu siekiama aptikti galimas kuriamo sprendimo anomalijas. Anomalijos – netikėti srovės sąnaudų pakitimai gali rodyti programinės ar aparatinės įrangos defektus.

2019 metais išleistame JAV mokslininko straipsnyje (Jolly, 2019) pristatoma problema, jog daiktų interneto sistemų kūrimo metu nėra atsižvelgiama į sistemos elgseną artėjant baterijos išsikrovimo momentui. Pakitus baterijos įtampai, sistema gali elgtis neprognozuojamai – gali atsirasti nenumatyti srovės šuoliai, gedimai, pakartotiniai bandymų ciklai – visa tai sutrikdo numatytą sistemos veikimą. Šiame straipsnyje siūloma maitinimo šaltinio įtampos kritimo atveju keisti pačios programinės įrangos veikimą – išjungti *RTC* (angl. *Real Time Clock*, *RTC*) ir pradėti naudoti *RC* (angl. *Resistor–Capacitor*, *RC*) laikmatį, sumažinti jutiklių matavimo dažnį, rečiau siųsti duomenis. Taip siekiama užtikrinti, jog sistema veikimo pabaigoje vis dar atliktų tam tikrus funkcionalumus ir išvengtų neprognozuojamo veikimo, kuris gali sukelti pavojus likusiai sistemai ar aplinkai.

Autorius ragina *IoT* sistemų kūrėjus naudoti įvykiais grįstą energijos sąnaudų analizę. Straipsnyje pristatomas įvykių pagrindu vykdomas galios analizės metodas (angl. *event-based power analysis*). Šio metodo taikymo metu srovės suvartojimo, radijo dažnių ir kitų signalų matavimai yra sinchronizuojami ir laike išskaidomi į atskirus įvykius. Šis vizualizavimas laike leidžia suprasti, kokios operacijos naudoja daugiausia energijos. Tai leidžia inžinieriams identifikuoti energetiškai neefektyvius veiksmus bei pritaikyti energijos taupymo strategijas, pavyzdžiui, keisti veiklos režimus ar duomenų siuntimo dažnį.

1.4. Bluetooth Low Energy

Bluetooth Low Energy – tai belaidis komunikacijos protokolas, kuris literatūroje dar yra pristatomas kaip „Bluetooth Smart“. Protokolas plačiai visuomenei buvo pristatytas 2010-ais metais, kartu su „Bluetooth 4.0“ protokolo versija. *BLE* protokolas yra sukurtas taip, jog užtikrintų minimalų energijos suvartojimą. Šis protokolas yra pritaikytas mažos galios įrenginiams, kurie perduoda nedidelius duomenų kiekius.

BLE protokolo architektūra susideda iš kelių pagrindinių sluoksnių. Fiziniame lygmenyje naudojama 2,4 GHz *ISM* (angl. *Industrial, Scientific and Medical*) dažnių juosta, kuri yra padalinta į 40 kanalų, kurių kiekvieno plotis yra po 2 MHz. Iš minėtųjų 40 kanalų, *BLE* naudoja tris specialius kanalus (37, 38 ir 39) įrenginio reklamai tinkle vykdyti. *BLE* reklama – tai procesas, kurio metu įrenginys įgyvendina periodišką mažų reklamos paketų transliavimą tinkle. Transliacijos metu aplinkiniams įrenginiams pranešama apie transliacijos įrenginio egzistavimą bei atliekamas funkcijas. Likę 37 kanalai – tai duomenų kanalai, skirti abipusiems duomenų mainams ryšio būsenoje (Tei, Yamazawa, & Shimizu). *BLE* protokolas naudoja *GFSK* (angl. *Gaussian Frequency Shift Keying*) moduliaciją.

Aukštesniuose protokolo sluoksniuose veikia *L2CAP* (angl. *Logical Link Control and Adaptation Protocol*). Šis sluoksnis atlieka duomenų paketų segmentavimą ir surinkimą vieno fizinio

ryšio metu. Šis lygmuo taip pat leidžia tuo pačiu fiziniu ryšiu perduoti kelių skirtingų protokolų duomenis, žymėdamas juos skirtingais kanalų identifikatoriais.

Aukščiausi sluoksniai – tai *ATT* (angl. *Attribute Protocol*) ir *GATT* (angl. *Generic Attribute Profile*). *ATT* sluoksnis apibrėžia, kaip *BLE* įrenginiai keičiasi atskirais duomenų elementais (atributais), naudojant paprastą skaitymo ir rašymo metodą. *GATT* sluoksnis naudoja *ATT* sluoksnį bei jį papildo taisyklėmis, nurodančiomis, kaip atskiri atributai organizuojami į aiškias *BLE* paslaugas ir charakteristikas. *GATT* sluoksnis nurodo, kaip naudoti *ATT* sluoksnyje įvardintus atributus (Chang, 2015).

BLE veikia toje pačioje 2,4 GHz juostoje kaip ir tradicinis *Bluetooth*. Šią dažnių juostą taip pat naudoja kitos belaidės technologijos, tokios kaip *WiFi* ar *ZigBee*, todėl jų veikimas gali kelti ryšio trikdžių. Siekiant užtikrinti stabilų ir trikdžiams atsparų ryšį, *BLE* protokolas ryšio metu naudoja dažnių šokinėjimo (angl. *frequency hopping*) mechanizmą. Jei ryšio kanalas yra užimtas, pažymėtas kaip triukšmingas ar baigiasi suplanuotas reklamos bei prisijungimo intervalas, *BLE* sistema automatiškai persijungia į kitą kanalą. Šis persijungimas atliekamas pagal iš anksto sutartą dažnių šokinėjimo seką (Treurniet et al., 2015).

BLE tinklo topologijoje išskiriamos keturios pagrindinės įrenginių rolės:

- Centrinis įrenginys – įrenginys, kuris skenuoja tinklą, aptinka reklamą atliekančius įrenginius ir jungiasi prie jų.
- Periferinis įrenginys – įrenginys, kuris atlieka reklamavimo procesą bei leidžia centriniams įrenginiams prisijungti prie jo.
- Transliaciją atliekantis įrenginys – įrenginys, kuris tinkle atlieka vienpusį reklamos paketų siuntimą, tačiau nesuteikia galimybės prisijungti prie jo.
- Tinklo stebėtojas – įrenginys, kuris skenuoja reklamos paketus, tačiau neinicijuoja ryšio.

Siunčiant duomenis, egzistuoja dvi rolės:

- Serveris – įrenginys kuris saugo duomenis (paslaugas, charakteristikas) bei atsako į kliento užklausas.
- Klientas – įrenginys, kuris inicijuoja užklausas serveriui, norėdamas skaityti, rašyti ar stebėti charakteristikas.

Bluetooth Low Energy technologija yra specialiai sukurta daiktų interneto ir nešiojamų jutiklių sistemoms, kurioms yra itin svarbus mažas energijos suvartojimas ir ilga baterijos gyvavimo trukmė (Rajotte et al., 2023). Dėl mažų energijos sąnaudų šis protokolas tinka mažos galios įrenginiams, kuriuose svarbus ilgas baterijos veikimo laikas. Protokolas leidžia įrenginiams didžiąją laiko dalį veikti „miego“ režime. Šio režimo metu yra generuojamos minimalios energijos sąnaudos. Esant poreikiui, duomenų perdavimas yra atliekamas aktyviuoju protokolo veikimo metu, išėjus iš miego režimo. Duomenų siuntimo metu yra generuojamos didesnės energijos sąnaudos (*Bluetooth Special*

Interest Group, 2024). BLE taip pat naudoja mažus duomenų paketus, greitą ryšio užmezgimą bei efektyvų reklaminių paketų siuntimą.

1.5. Veiksniai, lemiantys BLE ryšio energijos sąnaudas

BLE įrenginių energijos sąnaudoms didžiausią įtaką daro aktyvių ir pasyvių darbo režimų suderinimas – kiek laiko įrenginys išlieka mažų sąnaudų režimuose tarp aktyvių radijo įvykių bei kaip dažnai tai vyksta.

„Texas Instruments“ įmonės parengtame dokumente (Lindh et al., 2019), kuriame apžvelgiamas BLE ir Sub-1GHz įrenginių srovės suvartojimas, pateikiama, kokie veiksniai daro įtaką energijos sąnaudoms. Dokumente taip pat yra pristatoma, kaip optimizuoti sistemų darbą, kad būtų prailgintas baterijos veikimo laikas. Teigiama, jog energijos sąnaudoms didelę įtaką daro BLE reklamos ir ryšio intervalai. Ilgesni reklamos bei ryšio intervalai, kurių dėka įgyvendinamas retesnis radijo modulio pabudimas iš miego būsenos, užtikrina mažesnes vidutines energijos sąnaudas. Šiame dokumente taip pat teigiama, kad radijo siųstuvo perdavimo galia daro reikšmingą momentinį poveikį energijai – kuo didesnė siuntimo galia, tuo daugiau energijos naudojama kiekvieno duomenų paketo perdavimo metu.

Kitame „Texas Instruments“ sukurtame dokumente (Kamath & Lindh, 2012), kuriame pristatoma, kaip teisingai matuoti BLE įrenginių srovės suvartojimą, taip pat pristatomi elementai, kurie turi didžiausią įtaką įrenginio energijos sąnaudoms. Dokumente teigiama, kad pagrindinis BLE įrenginių energijos sąnaudų rodiklis yra vidutinė suvartojama srovė, o ne momentinės maksimalios, sistemos pikus nurodančios srovės. BLE įrenginio atliekamas duomenų siuntimas ir gavimas naudoja daugiausia energijos sąnaudų. Nors šie veiksmi trunka trumpai, tačiau svarbu pritaikyti tinkamas veikimo strategijas, jog šiais trumpais momentais būtų naudojama mažiau energijos. Dokumentacijoje pabrėžiama, kad ilgesni ryšio intervalai ir mažesnis duomenų srautas leidžia sumažinti vidutinę srovę. Pritaikius tokią veikimo taktiką įrenginys ilgiau išlieka žemo energijos suvartojimo būsenoje. Dokumente taip pat akcentuojama, jog neužtenka žinoti tik sistemos vidutines srovės sąnaudas atskirų veikimo būsenų metu. Norint tiksliai apskaičiuoti energijos sąnaudas ir baterijos tarnavimo laiką, būtina įvertinti kiek laiko įrenginys būna konkrečiose veikimo stadijose.

„Silicon Labs“ įmonės parengtame dokumente (Silicon Laboratories Inc., 2021) apžvelgiama BLE technologijos struktūra ir veikimo principai. Dokumente taip pat pabrėžiama, kad BLE skenavimo ir reklamos režimai turi reikšmingą poveikį energijos sąnaudoms. Aktyvus skenavimas naudoja daugiau energijos negu pasyvus skenavimas, o ilgesnis pačio skenavimo proceso vykdymas padidina prietaiso aktyvumo trukmę, taip pat didindamas energijos sąnaudas. Reklamos proceso metu naudojamas reklamos kanalų skaičius (jų yra trys) tiesiogiai veikia energijos sąnaudas. Sumažinus

naudojamų reklamos kanalų kiekį, kartu galima sumažinti ir energijos suvartojimą. Vis dėlto pasirinkus tokį energijos taupymo būdą, gali sumažėti pačio ryšio patikimumas.

1.6. ZigBee

ZigBee – tai belaidžio ryšio protokolas, skirtas mažos galios bei mažo duomenų srauto tinklams kurti. *ZigBee* remiasi *IEEE 802.15.4* standartu, veikiančiu 2,4 GHz (pasaulinis dažnis), 868 MHz (Europos dažnis) ir 915 MHz (Šiaurės Amerikos dažnis) dažnių juostose. Pagrindinis *ZigBee* tikslas – užtikrinti patikimą, energiją taupantį ryšį tarp jutiklių bei daiktų interneto įrenginių.

ZigBee protokolo architektūra susideda iš trijų sluoksnių. Ši architektūra remiasi *802.15.4* fiziniu (*PHY*) ir ryšio reguliavimo (*MAC*) sluoksniu. Virš šio sluoksnio yra *ZigBee* tinklo *NWK* (angl. *Network Layer*) sluoksnis bei programinės įrangos sluoksnis *APS* (angl. *Application Support Sublayer*). *PHY* ir *MAC* sluoksnis apibrėžia radijo dažnių modulį, paketų perdavimo laikus bei pačių paketų sudėtį. Šis sluoksnis taip pat atsakingas už radijo bangomis perduodamų bitų kodavimą, kanalų prieigą bei pakartotinius paketų siuntimus. Tinklo sluoksnis atlieka duomenų paketų maršrutų parinkimą, įrenginių adresavimą ir tinklų formavimą. Programinės įrangos sluoksnis atlieka įrenginių susiejimą, grupinį siuntimą ir profilių bei klasterių valdymą (Kouche et al., 2013).

ZigBee naudojama moduliacija priklauso nuo pasirinktos veikimo dažnio juostos. Jei pasirinkta 2,4 GHz dažnių juosta, tuomet naudojama *O-QPSK* (angl. *Offset Quadrature Phase Shift Keying*) moduliacija, kurios metu pasiekiamas apie 250 kbps duomenų perdavimo greitis. Jei pasirinkta 868 MHz ar 915 MHz dažnių juostos – naudojama *BPSK* (angl. *Binary Phase Shift Keying*) bei pasiekiamas apie 20–40 kbps duomenų perdavimo greitis (Purnama et al., 2018).

ZigBee tinkle gali būti naudojami trijų tipų įrenginiai:

- Koordinatoriai (angl. *coordinator*) – įrenginiai atsakingi už tinklo sukūrimą.
- Maršrutizatoriai (angl. *routers*) – įrenginiai atliekantys maršrutizatoriaus vaidmenį. Maršrutizatoriai atlieka duomenų paketų siuntimą tarp koordinatoriaus ir galinių įrenginių, užtikrinant geriausio galimo duomenų siuntimo kelio naudojimą, palaiko ir atnauja maršrutų lenteles (angl. *routing tables*).
- Galiniai įrenginiai (angl. *end devices*) – jutiklių mazgai, kurie periodiškai pabunda, renka aplinkos duomenis, juos išsiunčia į tinklą ir sugrįžta atgal į miego režimą.

ZigBee protokolas išsiskiria pritaikoma *Mesh* tinklo topologija. Šioje tinklo topologijoje visi mazgai yra sujungti tarpusavyje. Tinklo įrenginių sujungimas yra šios topologijos pranašumas. Jei vienas tinklo mazgas praranda ryšį ar nustoja veikti, duomenų siuntimas atliekamas aplenkiant šį tinklo mazgą. Tai leidžia sukurti trikdžiams atsparų tinklą. *ZigBee* maršrutizatoriai yra skirti palaikyti

ir plėsti protokolui būdingus *Mesh* topologijos tinklus. *ZigBee* protokolas palaiko iki 65 000 mazgų tinkle.

ZigBee – tai trumpo nuotolio belaidžio ryšio technologija, kuri užtikrina automatinę tinklo topologijos organizaciją bei mažą energijos suvartojimą. Dėl šių savybių protokolas yra ypač tinkamas automatikos, nuotolinio valdymo bei daiktų interneto sistemoms (Qadir et al., 2018).

1.7. Veiksniai, lemiantys *ZigBee* ryšio energijos sąnaudas

ZigBee ryšio protokolo energijos sąnaudos priklauso nuo prietaisų veikimo režimų ir tinklo charakteristikų. „Connectivity Standards Alliance“ sukurtoje oficialioje *ZigBee* protokolo specifikacijoje (*Connectivity Standards Alliance*, 2023) pristatoma protokolo struktūra, veikimo principai bei energijos valdymo mechanizmai. Dokumente pristatoma siųstuvo galios svarba duomenų perdavimo metu. Tinkamos siųstuvo galios pasirinkimas gali optimizuoti įrenginio energijos naudojimą. Specifikacijoje nurodoma reikšminga duomenų siuntimo dažnio įtaka – dažnas įrenginių pabudimas ir duomenų perdavimas didina energijos suvartojimą. Įrenginių prisijungimas, tinklo skenavimas taip pat sukuria papildomą energijos suvartojimą, todėl svarbu užtikrinti šių veikimo etapų optimizavimą.

„Texas Instruments“ įmonės parengtame dokumente, kuriame aprašoma, kaip praktiškai matuoti *ZigBee* įrenginių energijos sąnaudas įvairiuose veikimo režimuose pristatoma, kurie ryšio parametrai turi didžiausią įtaką sistemos energijos sąnaudoms. Dokumente teigiama, jog pagrindiniai *ZigBee* įrenginių energijos sąnaudų veiksniai yra susiję su veikimo režimais, duomenų perdavimo dažniu bei ryšio kanalo naudojimo efektyvumu. Nurodoma, jog vienas svarbiausių energijos taupymo aspektų yra miego režimas, tačiau svarbu optimizuoti ir aktyvius veikimo momentus. Dažnas duomenų paketų ar duomenų užklausų siuntimas (angl. *periodic polling*) didina įrenginio energijos sąnaudas. Taip pat pabrėžiama, jog komunikacijos kanalo užimtumas ir CSMA-CA algoritmas (atliekamas laukimas prieš duomenų siuntimą, esant užimtam kanalui) papildomai padidina energijos sąnaudas. Galiausiai nurodoma, jog siunčiamų duomenų paketų dydis tiesiogiai lemia suvartojamos energijos kiekį. Didesni paketai reikalauja didesnių energijos sąnaudų (Kim, 2012).

1.8. BLE ir *ZigBee* palyginimas

Tiek *BLE*, tiek *ZigBee* yra populiariūs belaidžio ryšio protokolai, kurie yra naudojami įgyvendinant daiktų interneto sistemas. Abu šie protokolai yra skirti veikti mažais atstumais bei generuoti mažas elektros energijos sąnaudas. Toliau pateikiama lentelė (**1.1 lentelė**), kurioje

pristatomas šių protokolų tarpusavio palyginimas (Haque et al., 2022), (*Bluetooth Special Interest Group, Bluetooth security*):

1.1 lentelė. BLE ir ZigBee savybių palyginimas

Savybė	<i>BLE (Bluetooth Low Energy)</i>	<i>ZigBee</i>
Standartas	Bluetooth 4.0 ir naujesnės versijos	IEEE 802.15.4
Veikimo dažnis	2,4 GHz	2,4 GHz (pagrindinis); 868 MHz (Europos rinkla); 915 MHz (JAV rinkla).
Duomenų perdavimo greitis	1 Mbps (Bluetooth 4.0 versija); 2 Mbps (Bluetooth 5.0 versija).	250 kbps (2,4 GHz juostoje); 40 kbps (915 MHz juostoje); 20 kbps (868 MHz juostoje).
Tinklo topologija	Taškas-taškas topologija (<i>angl. point-to-point</i>); Žvaigždės topologija (<i>angl. Star</i>); Mesh topologija – naudojant <i>BLE Mesh</i> sprendimą.	Taškas-taškas topologija (<i>angl. point-to-point</i>); Žvaigždės topologija (<i>angl. Star</i>); Medžio topologija (<i>angl. Tree</i>); Mesh topologija.
Tinklo skalė	Iki 32 įrenginių tinkle (Naudojant <i>BLE Mesh</i> – iki 32 767)	Iki 65 000 įrenginių tinkle
Veikimo atstumas	10–30 metrų patalpų viduje; 75 – 100 metrų lauke.	10 – 20 metrų patalpų viduje; 75 – 100 metrų lauke.
Taikymo sritis	Nešiojami įrenginiai (išmanieji laikrodžiai, ausinės, sveikatos monitoriai), daiktų interneto sistemos.	Pramoninės automatika, saugumo sistemos, jutiklių tinklai, daiktų interneto sistemos.
Saugumas	Reklamos režime nenaudojamas joks šifravimo algoritmas; Prisijungus galima įgalinti ir naudoti AES-CCM šifravimą.	<i>AES-CCM 128</i> bitų šifravimas tinklo ir APS sluoksniuose.
Delsa (<i>angl. Latency</i>)	~6–12 ms	~10–50 ms
Paketo dydis	Maksimalus paketo dydis – 255 baitai, iš kurių 251 baitų yra naudingi duomenys.	Maksimalus paketo dydis – 127 baitai, iš kurių 70-100 baitų yra naudingi duomenys.

Triukšmų prevencija	Automatinis dažnių keitimas (AFH).	CSMA/CA (angl. <i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i> , CSMA-CA) užtikrina, jog prieš siųsdamas paketą ZigBee įrenginys patikrintų, ar radijo kanalas yra laisvas.
---------------------	------------------------------------	---

BLE komunikacijos protokolas tai mažas energijos sąnaudas generuojantis ryšio sprendimas. Šis protokolas pasižymi didele egzistuojančia įrenginių ekosistema – dauguma mobiliųjų telefonų ar kitų asmeninio naudojimo elektronikos prietaisų palaiko šį ryšio protokolą. Dėl didelio paplitimo, šis protokolas gali būti lengvai integruojamas į jau egzistuojančias sistemas ar sprendimus. *BLE* protokolo išskirtinumas – galimybė atlikti reklamos paketų transliaciją. Ši transliacija tai vieno įrenginio duomenų reklamavimas tinkle. Aplinkiniai įrenginiai skenuodami savo aplinką gali aptikti šiuos periodiškai transliuojamus duomenis, neatlikdami ryšio užmezgimo. Atvirų reklamavimo paketų dėka *BLE* suteikia maksimalų lankstumą ir energijos taupymo galimybes, kadangi perduodami reklamos paketai netaiko saugumo sprendimų. Duomenų paketų šifravimą galima įgalinti tik tuomet, kai vartotojas aktyviai inicijuoja prisijungimą.

ZigBee ryšio protokolas taip pat pasižymi mažomis energijos sąnaudomis. Didžiausias protokolo išskirtinumas – palaikoma *Mesh* tinklo struktūra, kurioje gali veikti apie 65 000 tinklo įrenginių. *ZigBee* protokolas taip pat išsiskiria pačiame ryšio standarte įgyvendinamu tinklo valdymo mechanizmu, taip sudarant galimybę vienu metu kurti didelius, patikimus ir gebančius save reguliuoti tinklus. Dar vienas *ZigBee* protokolo išskirtinumas – klasteriai bei paslaugų profiliavimas. Aukščiausiuose *ZigBee* programos lygiuose yra įgyvendintas funkcionalumo rinkinių valdymas. Šie minėtieji rinkiniai yra skirti iš anksto nustatytoms funkcijoms (pvz., apšvietimo valdymas, temperatūros matavimas, jungiklių būsenos stebėseną). Kiekvienas klasteris aprašo susijusias atributų reikšmes ir komandas. Tai suteikia galimybę skirtingų gamintojų įrenginiams, kurie laikosi to paties klasterio profilio, veikti kartu išvengiant papildomų veiksmų. Taip užtikrinamas plačios ekosistemos pritaikomumas ir greitas sprendimų diegimas.

Iš šio palyginimo paaiškėja, jog *BLE* protokolas yra tinkamas sistemoms, kurioms svarbus tiesioginis ryšys su mobiliuoju įrenginiu bei kurių reikalavimai nurodo didelio duomenų pralaidumo bei mažų energijos sąnaudų poreikį. Tuo tarpu *ZigBee* protokolas yra tinkamas didelėms sistemoms, kurioms reikalinga plečiamumo galimybė, centralizuoto bei savireguliuojančio tinklo valdymo užtikrinimas.

1.9. Mokslinių straipsnių apžvalga

Šioje darbo dalyje pateikiama mokslinės literatūros, kurioje aprašomas *BLE* bei *ZigBee* technologijų pritaikymas, apžvalga. Toliau pristatomi naujausi tyrimai bei eksperimentai, kuriuose atliekamas anksčiau minėtų mažos galios belaidžių tinklų protokolų palyginimas.

Mokslinių straipsnių apžvalgos metu didžiausias dėmesys skiriamas literatūrai, kurioje pristatomas *BLE* ir *ZigBee* ryšio technologijų pritaikymas daiktų interneto sprendimuose, išskiriant skirtingus energijos vartojimo režimus ir duomenų perdavimo charakteristikas.

1.9.1. Kiek energijos naudoja *Bluetooth Low Energy*? Lyginamieji matavimai su *ZigBee/802.15.4*

2012 metais išleistame Suomijos mokslininkų straipsnyje (Siekkinen et al., 2012) yra pateikiamas *Bluetooth Low Energy* bei *ZigBee* belaidžių ryšio technologijų energijos sąnaudų palyginimas. Tyrimo metu autoriai analizavo, kiek energijos yra naudojama ryšio užmezgimo ir duomenų siuntimo metu, kokią įtaką šioms sąnaudoms daro protokolų konfigūracijos parametrai bei kaip kinta ryšio protokolų energijos sąnaudos patiriant išorinius trikdžius.

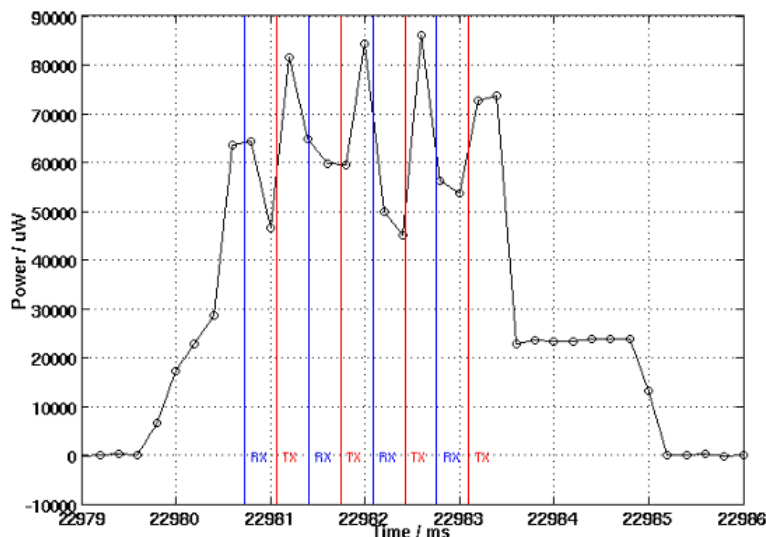
Sistemoms įgyvendinti pasitelktas *BlueGiga BLE112 Bluetooth Low Energy* ryšio modulis su integruotu Texas Instruments *CC2540* lustu. *ZigBee* protokolo sąnaudų tyrimui įgyvendinti pasitelkta *MSP430F2274* mikrovaldiklio bei *CC2530* modulio kombinacija. Eksperimentinis energijos sąnaudų matavimas atliktas naudojant „Monsoon Solutions“ įmonės sukurtą *Monsoon Power Monitor* sprendimą.

Straipsnyje pristatomas *BLE* tyrimas skaidomas į dvi dalis – matavimai atlikti iki abipusio ryšio užmezgimo momento (angl. *non-connection state*) bei matavimai atlikti ryšio metu. Laikotarpis iki ryšio užmezgimo – tai skenavimo bei reklamos fazė. Jos metu atliekama *BLE* įrenginio reklama tinkle, pasirenkant vis kitokį reklamos kanalų kiekį. Čia pastebėta, jog siunčiant reklaminius pranešimus trijuose ryšio kanaluose, sąnaudos padidėja apie 0,08 mJ lyginant su reklamos atlikimu viename ryšio kanale. Tuo tarpu įrenginys atliekantis tinklo skenavimą generuoja kur kas didesnes energijos sąnaudas negu tas, kuris atlieka reklamos vykdymą. Tinklą skenuojantis įrenginys dirba 50% aktyvumo ciklu (pusę laiko atlieka aktyvų skenavimą, o kitą pusę laiko ilsisi – yra miego režime), kurio atlikimo metu galios suvartojimas siekia apie 33 mW.

Po ryšio užmezgimo, komunikacijos būsenoje, įrenginiai periodiškai keičiasi duomenų paketais. Abipusio ryšio vykdymo metu atliekami sąnaudų matavimai, kurie apima pabudimą iš miego režimo ir perėjimą į aktyvią būseną. Šio proceso metu naudojama apie 15 mW galios. Atskirai matuojamas tarpas tarp duomenų siuntimo ir gavimo (angl. *inter-frame space*), kurio metu naudojama

apie 45 mW galios. Aktyvios duomenų apdorojimo būsenos metu naudojama apie 24 mW galios. Be šių žingsnių taip pat matuotos duomenų siuntimo ir gavimo metu generuotos energijos sąnaudos.

Žemiau pateikiamame grafike atvaizduojamas *BLE* ryšį vykdančio įrenginio energijos sąnaudos duomenų paketų siuntimo ir gavimo metu (**1.1 pav.**):

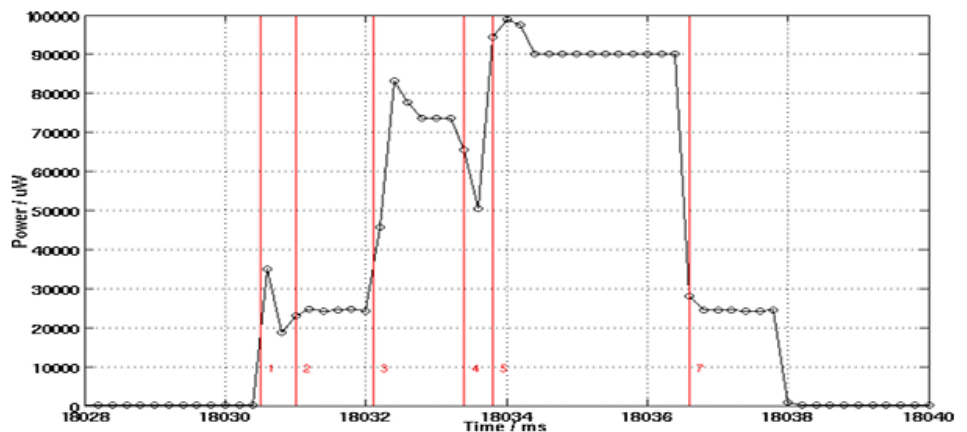


1.1 pav. *BLE* protokolo sąnaudos duomenų siuntimo ir gavimo metu (Siekkinen et al., 2012)

Iš pateikto grafiko yra matoma, kad duomenų siuntimo (*TX*) metu galios sąnaudos siekia apie 84 mW, o duomenų gavimo (*RX*) metu – apie 66 mW. *BLE* ryšį naudojantys įrenginiai vartoja daugiau energijos duomenų siuntimo, negu gavimo metu. Sistemos veikimo žingsnių išskaidymas leidžia apskaičiuoti energijos sąnaudas vienam ryšio įvykiui. Straipsnyje pateikiama išvada, jog siekiant kuo didesnio energijos sąnaudų efektyvumo, svarbu susitelkti į *TX* operacijų optimizavimą. Duomenų paketų siuntimo metu energijos naudojimas yra didesnis, todėl sumažinus šios operacijų trukmę arba siunčiant daugiau duomenų vieno ryšio įvykio metu, galima pagerinti bendrą energijos sąnaudų rodiklį.

Straipsnyje pateikiamas *ZigBee* energijos sąnaudų tyrimas yra taip pat skaidomas į dvi dalis – tinklo skenavimo bei duomenų siuntimo fazes. Tinklo paieškos metu *ZigBee* protokolą naudojantys įrenginiai klausosi koordinatoriaus siunčiamų signalų. Tinklo skenavimo metu generuojamos energijos sąnaudos yra panašios ar bent šiek tiek didesnės palyginti su *BLE* protokolo energijos sąnaudomis. Duomenų perdavimo metu *ZigBee* protokolas naudoja *CSMA/CA* technologiją. Pritaikius *CSMA/CA*, *ZigBee* įrenginys prieš atliekant duomenų siuntimą privalo palaukti, kol duomenų siuntimo kanalas bus laisvas. Šis laukimo etapas yra fiksuotas ir gali trukti nuo 0,6 iki 2 ms. Pritaikius šią technologiją, įrenginys privalo būti laukimo režime su įjungtu radijo moduliu, todėl didėja energijos sąnaudos.

Duomenų siuntimo metu atliktas energijos sąnaudų matavimas, kai įrenginys pabunda iš miego režimo (šis žingsnis generuoja apie 20 mW), pereina į aktyvią būseną (apie 24 mW), įgyvendina CSMA/CA (apie 72 mW) bei atlieka patį duomenų siuntimą ir gavimą. Žemiau pateikiamame grafike atvaizduojamas *ZigBee* ryšio sąnaudos duomenų paketų siuntimo ir gavimo metu (**1.2 pav.**):



1.2 pav. *ZigBee* srovės sąnaudos duomenų siuntimo metu (Siekkinen et al., 2012)

Iš pateikto grafiko matoma, kad duomenų siuntimo (*TX*) metu sąnaudos siekia apie 90 mW, o duomenų gavimo (*RX*) apie 72 mW. *ZigBee* ryšys, taip pat kaip ir *BLE*, naudoja daugiau energijos duomenų siuntimo, negu gavimo metu.

Straipsnyje aprašyto tyrimo metu gauti rezultatai rodo, jog *ZigBee* protokolas demonstruojamas energijos efektyvumas nusileidžia *BLE* protokolo energijos sąnaudoms. Tai lemia papildomos energijos sąnaudos, kurias generuoja *CSMA/CA* technologijos priverstinai sukeltas papildomas laukimas.

Straipsnio išvadose taip pat pateikiamas atsakymas į klausimą, kaip kinta ryšio protokolų energijos sąnaudos, jiems patiriant išorinius trikdžius. Tokių išorinių trikdžių, kaip *WiFi* signalų buvimas, gali lemti siunčiamų duomenų paketų praradimus. Siekiant užtikrinti nuoseklų duomenų perdavimą, prarasti paketai turėtų būti retransliuojami. Tai sukuria papildomas energijos sąnaudas. Jei naudojant *BLE* komunikacijos protokolą, trikdžio šaltinis yra arti (nuo 1 iki 1,5 metro atstumu), tuomet yra pastebimas intensyvus duomenų paketų praradimas. Siekiant išvengti duomenų paketų praradimo būtina naudoti *AFH* (angl. *adaptive frequency hopping, AFH*) technologiją.

1.9.2. *RSSI* pagrindu veikiančių patalpų lokalizavimo metodų palyginimas

išmaniuosiuose daiktų interneto pastatuose

Objektų pozicijoms nustatyti atviroje erdvėje yra naudojamos *GPS* sistemos. Šios sistemos veikia naudodamos palydovų siunčiamus signalus. Vis dėlto, jei prireikia atlikti objekto lokacijos nustatymą patalpų viduje, dėl storų sienų ar grindų šie signalai susilpnėja arba yra visiškai

blokuojami. Dėl to, patalpose įrengti *GPS* pagrindu veikiančios lokalizacijos sprendimai dažnai yra netikslūs arba iš viso neveikia. Todėl reikia pasitelkti alternatyvius, belaidžio ryšio technologijų pagrindu veikiančius, metodus, kad būtų galima įgyvendinti lokacijos nustatymą patalpų viduje.

2018 metais išleistame Kanados mokslininkų darbe (Sadowski, 2018) pristatomas *RSSI* (signalų stiprumo) naudojimas objektų lokacijai nustatyti patalpų viduje. Autoriai straipsnyje pristato atliktą tyrimą, kurio metu pritaikė *ZigBee*, *Bluetooth Low Energy (BLE)* ir *WiFi* belaidžio ryšio technologijas užduočiai atlikti. Tyrimo metu buvo nagrinėjama, kuris iš šių protokolų demonstruoja tiksliausią nustatytą objekto lokaciją, mažiausias energijos sąnaudas bei didžiausią signalo perdavimo nuotolį.

Tyrimui įgyvendinti sukurta sistema, kuri naudoja trilateracijos principą. Trilateracijos principas – tai metodas, kuris leidžia nustatyti objekto padėtį, remiantis atstumais nuo kelių fiksuotų ir žinomų taškų. Pritaikius šį metodą, trys skirtingi belaidžio ryšio įrenginiai, kurie atlieka siųstuvo vaidmenį, transliuoja signalus, o vienas imtuvas nuolat renka šių signalų stiprio duomenis. Visi trys fiksuotų pozicijų siųstuvai veikia identiškomis transliacijos sąlygomis – esant -10 dBm siųstuvo galiai bei vykdomu periodišku, 0,5 sekundės trunkančiu, transliacijos intervalu. Prieš atliekant realius matavimus, buvo atliktas signalo slopinimo (angl. *path loss*) modelio skaičiavimas. Pritaikius šį modelį gauti duomenys yra konvertuojami į atstumus tarp įrenginių – tai leidžia apskaičiuoti tikrąją imtuvo padėtį patalpoje.

Tyrimo metu kiekvienam ryšio protokolui pritaikyta skirtinga aparatinė įranga. *ZigBee* technologijai panaudotas *Arduino Uno* mikrovaldiklis, prie kurio buvo prijungtas *XBee* siųstuvo-imtuvo modulis. *BLE* technologijai naudoti *Gimbal Series 10 Beacon* įrenginiai, kurie veikė naudodami *Apple iBeacon* protokolo konfigūraciją signalams siųsti, o *BLE* signalams gauti panaudotas *Google Nexus 5* išmanusis telefonas. *WiFi* technologijai naudotas *Raspberry Pi 3 Model B*, turintis integruotą *WiFi* anteną.

Visi tyrimai buvo atliekami kontrolinėje patalpų aplinkoje. Matavimai atlikti $5.6 \times 5.9\text{ m}$ dydžio susitikimų kambaryje, kuriame buvo palikti vidaus baldai – stalai bei kėdės. Eksperimentų metu įgyvendinta po 11 bandymų kiekvienai technologijai. Gauti rezultatai buvo lyginami pagal vidutinę paklaidą ir variaciją, siekiant išskirti geriausią lokacijos nustatymo tikslumo bei energijos sąnaudų kombinaciją. Atlikti matavimai rodo, jog skirtingi ryšio protokolai demonstravo skirtingas energijos sąnaudas bei skirtingus objekto lokacijos nustatymo tikslumus.

WiFi technologija pasižymėjo didžiausiu lokacijos nustatymo tikslumu, tačiau kartu šio protokolo sąnaudos vidutiniškai siekia apie 216,71 mW. *WiFi* lokacijos nustatymo sistema parodė mažiausią paklaidą – vidutiniškai apie 0,5183 m.

BLE technologijos objekto vietos nustatymo rezultatai buvo prastesni negu *WiFi* technologijos. *BLE* protokolo atveju vidutinė paklaida – apie 1,1143 m. Vis dėlto šis protokolas parodė efektyvias

sąnaudas, kurios siekia apie 0,367 mW. Tuo tarpu *ZigBee* matavimai rodo apie 78,8 mW siekiančias sąnaudas bei didžiausią lokacijos nustatymo paklaidą – vidutiniškai apie 5,1317 m.

Straipsnyje pateikti eksperimentų rezultatai rodo, jog *WiFi* tiksliausiai nustato objekto lokaciją patalpų viduje, tačiau naudoja daugiausia energijos. Tiek *BLE*, tiek *ZigBee* protokolai demonstruoja kur kas mažesnes energijos sąnaudas, tačiau kartu ir prastesnę lokacijos nustatymo tikslumą.

1.9.3. Komunikacijos protokolų vertinimas medicininių įrenginių sąveikai: *BLE* ir *ZigBee*

Sveikatos apsauga – tai dar viena sritis, kurioje vis labiau populiarėja daiktų interneto sprendimai. Medicinos prietaisams, ypač nešiojamiems bei implantuojamiems, yra itin svarbu, kad jų atliekami veiksmai būtų energetiškai efektyvūs ir taupūs. Sveikatos apsaugos sprendimai naudoja baterijas kaip pagrindinį maitinimo šaltinį. Medicinos srityje dažnas baterijų keitimas ar įkrovimas gali kelti papildomų nepatogumų ar netgi rizikų pacientams. Svarbu tokias sistemas kurti pasirenkant mažai energijos suvartojančius komponentus bei komunikacijos protokolus.

2023 metais Meksikos mokslininkų išleistame straipsnyje (Zenil et al., 2023) aprašomas atliktas belaidžio ryšio protokolų energijos sąnaudų įvertinimas bei tarpusavio palyginimas medicininės įrangos sąveikavimo aplinkoje. Medicinos sektorius išsiskiria itin dideliu jautrių duomenų kiekiu, todėl juos perduodant būtina taikyti šifravimo priemones. Pritaikomi šifravimo sprendimai turi užtikrinti duomenų saugumą, nepridedant nereikalingų energijos sąnaudų. Paciento būklė gali pasikeisti akimirksniu, todėl būtina užtikrinti nuolatinę stebėseną. Reikalingas nuolatinis duomenų perdavimas. Dažnas duomenų perdavimas generuoja dideles energijos sąnaudas, todėl svarbu optimizuoti duomenų perdavimo algoritmus, ryšio technologijas bei kitus sistemos komponentus, siekiant sumažinti energijos suvartojimą ir pagerinti sistemos efektyvumą. Straipsnyje pateikiamas *BLE* bei *ZigBee* komunikacijos protokolų tarpusavio palyginimas energijos suvartojimo bei potencialaus baterijos tarnavimo laiko aspektais.

Straipsnyje aprašoma eksperimentinė daiktų interneto sistema, kuri renka paciento medicininius duomenis bei juos perduoda į tolimesnius sistemos mazgus naudojant belaidį komunikacijos ryšį. Perduodami duomenys – tai paciento širdies ritmas (pulsas) bei kraujo deguonies prisotinimas (SpO_2). Šie duomenys gaunami pasitelkiant *MAX30102* jutiklį. Skirtingų ryšio protokolų tyrimo metu pasitelkta skirtinga aparatinė įranga: *Bluetooth Low Energy* protokolo tyrimui panaudotas *ESP32 DevKit V1* mikrovaldiklis, o *ZigBee* – *Arduino Uno* bei *XBee Pro S1* modulio kombinacija. Sukurta eksperimentinė sistema, kuri naudoja 7,4 V *LiPo* 1000 mAh talpos baterijas. Sistema atlieka duomenų rinkimą ir perdavimą kas minutę, taip išsiunčiant 60 žinučių per valandą.

Prieš atliekant realius eksperimentus su sukurtomis daiktų interneto sistemomis, buvo atlikti išankstiniai teoriniai skaičiavimai, kurie prognozuoja galimą sistemos veikimo laiką su vienu baterijų komplektu. Šis išankstinis sistemos gyvavimo laikas buvo apskaičiuotas remiantis komponentų specifikacijose pateikiamomis energijos sąnaudų reikšmėmis. Teoriniai skaičiavimai rodė, jog *ESP32* įrenginys, naudojantis *BLE* protokolą veiks apie 12,22 valandos, tuo tarpu *Arduino Uno* kartu su *XBee* moduliu naudodami *ZigBee* protokolą, veiks apie 22 valandas. Atlikus praktinius matavimus matoma, kad sistema, naudojanti *BLE*, generuoja vidutiniškai apie 180 mA srovės sąnaudas, o sistema įgyvendinanti *ZigBee* komunikaciją – apie 100 mA. Galutiniai eksperimento rezultatai rodo, jog sistema naudojanti *BLE* užtikrina greitą ir mažai delsos patiriančią komunikaciją. Ši sistema vidutiniškai veikė apie 13,28 valandos, taip viršydama numatytus išankstinius veikimo trukmės skaičiavimus. *ZigBee* sistema, kuri pasitelkia *AES* (angl. *Advanced Encryption Standard*, *AES*) duomenų šifravimą, veikė apie 20,21 valandos, rodydama prastesnius rezultatus negu buvo prognozuota.

1.9.4. Preliminarus žemos galios belaidžių technologijų tyrimas: *ZigBee* ir *Bluetooth Low Energy*

Kuriant daiktų interneto sprendimus yra svarbu įvertinti duomenų paketų siuntimo ir priėmimo strategijas bei ryšio užmezgimo metu atliekamus žingsnius. Šie veiksmai yra svarbūs modeliuojant kuriamos sistemos energijos taupymo strategijas. Tikslingai įvertinus, kaip bei kada atliekamas duomenų siuntimas, galima sumažinti sistemos generuojamas energijos sąnaudas, atsisakant nereikalingų žingsnių, tokių kaip perteklinis ryšio užmezgimas, daugkartinis duomenų apdorojimas ar per dažnas duomenų perdavimas.

2015 metais Taivano mokslininkų atliktame mažos galios ryšio sprendimų tyrime (Lee et al., 2015) analizuojami *ZigBee* bei *Bluetooth Low Energy* protokolai, atkreipiant ypatingą dėmesį į jų tinkamumą daiktų interneto sprendimams. Straipsnyje pristatomas duomenų perdavimo spartos, efektyvumo bei energijos sąnaudų palyginimas. Tyrimo metu sukurta eksperimentinė sistema, simuliuojanti realias daiktų interneto naudojimo sąlygas. Sukurtos tyrimo sistemos vykdo nuolatinį duomenų paketų siuntimą tarp įrenginių.

ZigBee protokolo energijos sąnaudų tyrimui atlikti pasitelkti „Texas Instruments“ *CC2530* lustai, kurie tiriamoje sistemoje atlieka tiek ryšio koordinatoriaus, tiek galinio įrenginio vaidmenis. *ZigBee* technologijos pritaikyme įgyvendintas duomenų paketų užklausų siuntimas tarp siuntėjo ir gavėjo įrenginių. Sukurtoje sistemoje testuojama, kiek srovės naudojama vykdant duomenų užklausas, kai koordinatorius buferyje turi arba neturi saugomų duomenų. Energijos sąnaudų matavimas atliekamas kiekviename ciklo etape.

BLE protokolo energijos sąnaudos tirti naudojamas „*Texas Instruments*“ įrenginių rinkinys – centrinis modulis *CC2540* duomenims priimti ir *CC2541* modulis pranešimams siųsti. Šioje sistemoje įgyvendinamas prisijungimo patvirtinimas, duomenų siuntimas bei *BLE* transliacija, kurios metu įrenginys siunčia periodiškus trumpus pranešimus – reklamos paketus. Šie leidžia kitiems įrenginiams aptikti siuntėją bei užmegzti tarpusavio ryšį.

Atlikus srovės sąnaudų matavimą, nustatytos *ZigBee* protokolo suvartojamos srovės vertės:

- Vieno ciklo srovės sąnaudos, kai koordinatorius neturi buferyje saugomų duomenų – apie 103,9 mA.
- Vieno ciklo srovės sąnaudos, kai koordinatorius turi buferyje saugomus duomenis (atliekamas realus duomenų paketų perdavimas) – apie 610,2 mA.

Tuo tarpu *BLE* srovės sąnaudų matavimai demonstruoja tokius rezultatus:

- Vieno ciklo srovės sąnaudos *BLE* transliacijos (siunčiami reklaminiai paketai) atlikimo metu – apie 57,1 mA.
- Vieno ciklo srovės sąnaudos įrenginio prisijungimo patvirtinimo metu – apie 39,5 mA.
- Vieno ciklo srovės sąnaudos duomenų perdavimo metu – apie 29 mA.

Matavimai rodo, kad naudojant *ZigBee* protokolą didžiausios energijos sąnaudos patiriamos, kai yra atliekamos dažnos buferyje saugomų duomenų užklauskos. *BLE* protokolas tyrimo metu generuoja mažesnes energijos sąnaudas lyginant su *ZigBee* rezultatais. Didžiausios *BLE* protokolo srovės sąnaudos buvo patirtos reklamos paketų siuntimo metu.

1.9.5. *Bluetooth Low Energy*, *ZigBee* ir *ANT* jutiklių mazgų energijos sąnaudų analizė ciklinio miego režime

Siekiant taupyti energiją bei pailginti baterijų veikimo trukmę, daiktų interneto sprendimai naudoja gilus (angl. *deep sleep*) arba lengvo (angl. *light sleep*) miego režimus. Dauguma daiktų interneto sprendimų, kuriuos sudaro jutikliai, valdikliai ar buities prietaisai, nevykdo nuolatinio duomenų perdavimo. Tarp informacijos perdavimo etapų yra laiko tarpai, kai šie įrenginiai nevykdo svarbios veiklos. Būtent šiais momentais įrenginiai energijos taupymo tikslais pereina į miego režimus. Gilus miegas daiktų internete maksimaliai sumažina įrenginių procesoriaus bei visiškai išjungia ryšio modulių aktyvumą. Tuo tarpu lengvo miego metu įrenginys sumažina energijos sąnaudas, bet išlaiko bent minimalų procesoriaus bei ryšio modulių funkcionalumą, taip leidžiantį įrenginiui greičiau reaguoti į išorinius signalus.

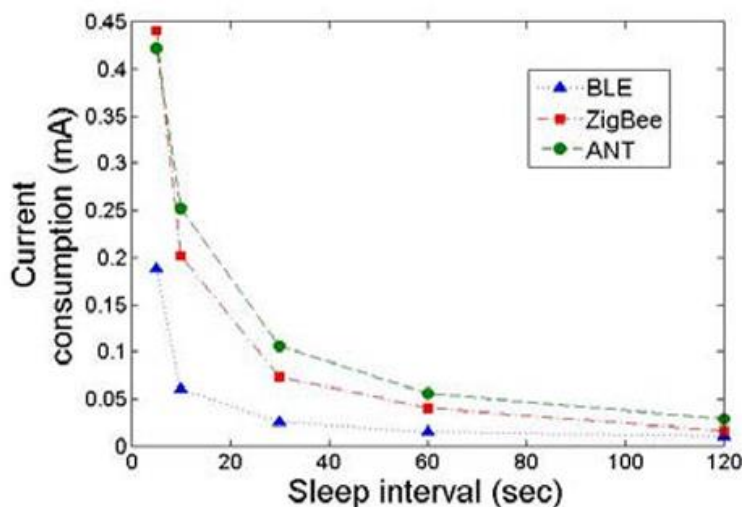
2013 metais išleistas bendras Jungtinių Amerikos Valstijų bei Jungtinės Karalystės mokslininkų darbas (Dementyev et al., 2013) pristato tyrimą, kuris analizuoja trijų belaidžių ryšio technologijų *BLE*, *ZigBee* bei *ANT* energijos sąnaudas, kai jas naudojantys jutiklių mazgai veikia

ciklinio miego režimu. Šis ciklinio miego režimas yra dažnai aptinkamas daiktų interneto sistemose – įrenginys trumpam pabunda iš miego režimo, išsiunčia jutiklio surinktus duomenis bei vėl grįžta į gilaus miego būseną. Straipsnio autoriai pristato eksperimentinius tyrimus, kuriais siekiama rasti atsakymą į klausimą, kaip optimizuoti ciklinio miego režimo įgyvendinimą, užtikrinant pakankamai dažną duomenų perdavimą bei kartu minimalias energijos sąnaudas.

Tyrimo metu matuojamos sistemos energijos sąnaudos tiek aktyvaus veikimo, tiek miego režimuose. Matavimo metu buvo atliktas pašalinių sistemos komponentų bei sąsajų išjungimas. Tokiu būdu siekiama sumažinti veiksmų skaičių, kurie gali turėti papildomos įtakos energijos sąnaudoms. Taip buvo siekiama nustatyti, kiek energijos naudoja komunikaciją užtikrinantis radijo modulis.

BLE sąnaudų tyrimo metu naudotas „Texas Instruments“ *CC2450* modulis su integruotu *8051* mikrovaldikliu. *ZigBee* matavimams panaudotas „Digi International“ sukurtas *XBee S2* modulis. *ANT* tyrimui – „Nordic Semiconductor“ sukurtas *AP2* radijo modulis, kuris buvo valdomas pasitelkiant *ARM Cortex M0+* mikrovaldiklį. Matavimo metu pritaikyta ta pati ryšio parametrų konfigūracija: duomenų perdavimo metu siunčiami 8 baitų duomenų paketai, siuntimo galia (angl. *transmit power*) suvienodinta iki 0 dBm, įgyvendinta paketų patvirtinimo (angl. *acknowledgement*) funkcija, užtikrintas 30 cm atstumas tarp siuntėjo ir gavėjo. Siųsti nešifruoti duomenų paketai. Visų bandymų metu buvo naudojamas 3,3 V maitinimo šaltinis.

Tyrimo metu kiekvienas mazgas cikliška pabunda iš gilaus miego etapo, prisijungia prie bazinės stoties (paketų gavėjo) ir persiunčia jai duomenų paketą. Visi aktyvumo momentai, kuomet būdavo atliekamas prisijungimas ir paketų siuntimas, trukdavo 5 sekundes. Tyrimo metu skirdavosi tik laikas, praleistas gilaus miego būsenoje. Skirtingų matavimo metu siuntėjo mazgas pabunda iš gilaus miego kas 5, 10, 30, 60 bei 120 sekundžių. Šios skirtingos gilaus miego trukmės ir sudaro skirtingus ciklinio miego režimus. Žemiau pateiktame grafike atvaizduotos elektros srovės sąnaudos pritaikius skirtingus gilaus miego intervalus (**1.3 pav.**):



1.3 pav. *BLE*, *ZigBee* ir *ANT* protokolų energijos sąnaudų, pritaikius skirtingus miego intervalus, palyginimas (Dementyev et al., 2013)

Atlikus energijos sąnaudų matavimus, autoriai nustatė optimalų ciklinio miego intervalą, kurio metu būtų užtikrinamas balansas tarp pakankamai dažno duomenų perdavimo bei energijos sąnaudų sumažinimo. Straipsnio autoriai nustatė, jog geriausius rezultatus parodė intervalas, svyruojantis tarp 10 bei 15 sekundžių, priklausomai nuo pasirinkto protokolo:

- *BLE* efektyviausias pritaikant 10s trunkantį gilaus miego intervalą.
- *ZigBee* efektyviausias pritaikius apie 14,3s trunkantį gilaus miego intervalą.
- *ANT* efektyviausias pritaikius apie 15,3s trunkantį gilaus miego intervalą.

Šie tyrimo rezultatai rodo, kad galima rasti optimalų sprendimą, leidžiantį pakankamai dažnai siųsti arba priimti duomenų paketus, tuo pačiu įgyvendinant pakankamai ilgus gilaus miego intervalus. Tokiu būdu yra pasiekiamas geriausias santykis tarp duomenų perdavimo dažnio bei bendrų sistemos energijos sąnaudų.

1.9.6. Jutiklių viduje apdorotų ir neapdorotų duomenų perdavimo lyginamasis tyrimas

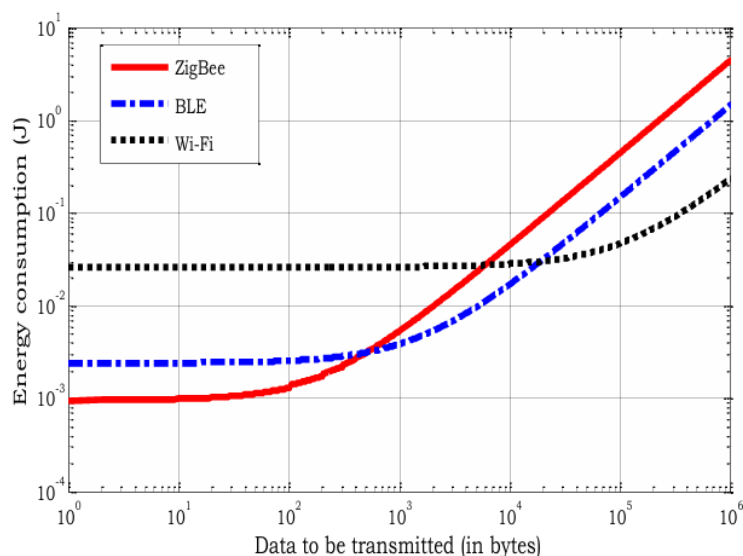
2014 metais Švedijos mokslininkų išleistame straipsnyje (Shahzad & Oelmann, 2014) pristatomas atliktas tyrimas, kuriame siekiama nustatyti, kokia duomenų siuntimo strategija yra efektyvesnė energijos sąnaudų aspektu – apdorotų ar neapdorotų jutiklių duomenų siuntimas. Šio tyrimo metu lyginamos trys belaidės ryšio technologijos – *ZigBee*, *Bluetooth Low Energy* bei *WiFi*.

Tyrimo metu daugiausia dėmesio skiriama dideliame siunčiamų duomenų srautui bei energijos sąnaudoms. Tikrinama, kuris iš ryšio protokolų būtų tinkamiausias didelio kiekio duomenų aplinkoje. Tyrimo metu analizuojama, kaip skirtingos ryšio technologijos atlieka ryšio užmezgimą bei kaip kinta energijos sąnaudos atliekant įvairaus dydžio duomenų paketų siuntimą. Vis dėlto pagrindinis dėmesys skiriamas „in-sensor processing“ duomenų apdorojimo metodui. Pritaikant šį metodą, didžioji dalis duomenų yra apdorojami pačiame duomenis surinkusiame jutiklyje. Tam yra pasitelkiamas duomenų filtravimas, daugiakanalis analizavimas ar net vaizdo apdorojimas. Pritaikius šią taktiką, toliau yra perduodami tik apdoroti duomenys – sumažintas ir koncentruotas informacijos kiekis. Tyrime nagrinėjama, kaip kinta energijos sąnaudos perduodant didelį duomenų kiekį, kai taikomos skirtingos duomenų apdorojimo strategijos.

Tiriamoji sistema įgyvendina taškas-taškas tinklo topologiją. Centrinis mazgas nuolat aktyvus ir yra maitinamas iš pastovaus maitinimo šaltinio. Jutiklį turintis mazgas yra maitinamas naudojant bateriją. Šis mazgas inicijuoja ryšio užmezgimą bei duomenų perdavimą tik tuomet, kai surenka pakankamai duomenų. Jutiklį turintis mazgas siunčia duomenis ir po kiekvieno perduoto paketo laukia patvirtinimo pranešimo iš centrinio mazgo. Sistema praktiškai įgyvendinta pasitelkus „Texas Instruments“ sukurtus siųstuvus-imtuvus – *CC2520 ZigBee*, *CC2540 BLE* ir *CC3000 WiFi* protokolams.

Atlikus praktinius eksperimentus bei matavimus, straipsnyje pateikiami skaičiai pagrindžia, jog siunčiant mažge apdorotus jutiklių duomenis energijos sąnaudos sumažėja. Straipsnyje apteikiamas praktinis pavyzdys su siunčiamais vaizdo kadrais – vienas vaizdo kadras, kurio dydis siekia 256 kB, atliekant vietinį duomenų apdorojimą yra sumažinamas į 114 baitų dydžio informaciją. Taigi energijos sąnaudos, reikalingos vienam kadrai apdoroti ir perduoti į centrinį mazgą, siekia apie 6,47 mJ. Vietinis duomenų apdorojimas leidžia reikšmingai sumažinti perduodamų duomenų kiekį bei taip sumažinti kuriamos sistemos bendras energijos sąnaudas.

Atlikus praktinius sistemų, naudojančių skirtingus protokolus, sąnaudų matavimus, skirtingų dydžių duomenų paketų siuntimo rezultatai pateikti vizualiu formatu (**1.4 pav.**):



1.4 pav. ZigBee, BLE ir WiFi srovės sąnaudų, siunčiant skirtingo dydžio paketus, palyginimas (Shahzad & Oelmann, 2014)

Pateiktame grafike horizontalioji ašis atvaizduoja siunčiamų duomenų kiekį baitais, vertikalioji ašis – bendrą suvartotą energiją džauliais (J). Iš grafiko matoma, kad:

- ZigBee protokolas demonstruoja mažiausias energijos sąnaudas siunčiant mažus duomenų paketus – iki 500 baitų dydžio.
- BLE protokolas demonstruoja mažiausias energijos sąnaudas siunčiant vidutinio dydžio duomenų paketus – nuo 500 baitų iki 800 kB dydžio.
- WiFi protokolas demonstruoja mažiausias energijos sąnaudas, kai reikia perduoti didelius duomenų paketus – 800 kB dydžio ir didesnius.

Straipsnyje taip pat pabrėžiama, jog skirtingų protokolų energijos sąnaudos įvertinamos ne tik pagal duomenų siuntimo metu generuojamas sąnaudas, bet ir pagal ryšio užmezgimo laiką. WiFi ryšio užmezgimas trunka apie 4 sekundes, todėl net jei duomenų perdavimas po prisijungimo yra greitas bei energijos sąnaudų aspektu efektyvus, pradiniam ryšio etape yra naudojama daugiau energijos. Tuo tarpu ZigBee protokolas sugeba užmegzti ryšį per maždaug 15 ms – todėl šis protokolas yra ypač efektyvus mažo dydžio paketams siųsti.

1.10. Mokslinių straipsnių apžvalgos išvados

Apžvelgtuose straipsniuose pristatomi skirtingi tyrimai, metodikos ir išvados. Svarbu atkreipti dėmesį, kad nei vienas iš pristatytų straipsnių tyrimo atlikimo metu nenaudojo tos pačios aparatinės įrangos ryšio protokolų veikimui įgyvendinti. Kai kuriuose tyrimuose buvo naudojami atskiri radijo moduliai, kurie buvo valdomi pasitelkiant išorinius mikrovaldiklius. Tokiu atveju galima įvertinti tik radijo modulio ir naudojamo ryšio protokolo energijos sąnaudas. Vis dėlto straipsniuose pateikiamų skirtingų radijo modulių, veikiančių naudojant skirtingus komunikacijos protokolus, energijos sąnaudų palyginimas nėra korektiškas. Dėl skirtingų radijo modulių techninių ypatybių, unikalių architektūrų bei skirtingų integruotų grandžių, tiesioginis ir objektyvus jų energijos sąnaudų palyginimas yra negalimas.

Įgyvendinti tik radijo modulių ir komunikacijos protokolų energijos sąnaudų tyrimai neaprepia visų galimų sistemos energijos sąnaudų. Minėtieji radijo moduliai yra valdomi mikrovaldikliais. Pastarųjų energijos sąnaudos taip pat yra svarbios diegiamoms daiktų interneto sistemoms. Dėl šių priežasčių pateikti energijos sąnaudų matavimai neatspindi visų radijo ryšio funkcijoms įgyvendinti reikalingų energijos sąnaudų.

Apžvelgtuose straipsniuose dažniausiai pristatoma energijos tausojimo metodika – limituoto darbo intervalai. Keliuose straipsniuose pristatytas sprendimas surinktus jautiklių duomenis siųsti kuo rečiau. Būtent komunikacijos protokolų veikimo momentais (ryšio užmezgimo bei duomenų siuntimo) baterijos patiria didžiausias energijos sąnaudas. Iš to matoma – retesni duomenų siuntimo momentai reiškia ilgesnį baterijos gyvavimo laikotarpį. Vis dėlto retesnis duomenų siuntimas nebūtinai yra galimas sprendimas ieškant kompromiso tarp pakankamai dažno duomenų perdavimo bei minimalių sistemos energijos sąnaudų.

Straipsniuose taip pat pristatomas pasiūlymas naudoti selektyvų duomenų siuntimą. Šis būdas atliekamas apdorojant duomenis tarpiniuose mazguose. Tai reiškia, jog siunčiame ne tiesiogiai surinktus jautiklių duomenis, o apdorotą ar atrinktą naudingą informaciją. Pastebėta, kad siunčiant mažesnius duomenų paketus naudojama mažiau energijos negu siunčiant didesnius paketus. Tokiu būdu sumažinamos baterijų energijos sąnaudos bei nereikalingos komunikacijos poreikis.

Viename iš apžvelgtų straipsnių pristatomas prognozuojamo sistemos veikimo laiko teorinių ir praktinių skaičiavimų neatitikimas. Straipsnyje teigiama, kad teoriniai skaičiavimai, atlikti pagal oficialioje specifikacijoje pateiktas sąnaudas, nuo praktiškai išmatuoto sistemos veikimo laiko skyrėsi net 8 %. Tai rodo, kad įrangos gamintojų pateikiami energijos sąnaudų rodikliai gali neatitikti realių sistemos eksploatavimo sąlygų. Dėl šios priežasties norint įvertinti galimą sistemos veikimo laiką, svarbu atlikti individualius sąnaudų matavimus.

2. TYRIMO ĮGYVENDINIMO ĮRANGA

Siekiant įgyvendinti *LPWPAN* mažos galios belaidžiams tinklams skirtų komunikacijos protokolų energijos sąnaudų tyrimą, pasitelkta *Arduino IDE* integruoto kodo kūrimo aplinka. Aparatinė tyrimo įranga – *ESP32-C6* mikrovaldikliai. Tyrimo metu sukurtos programos – tai daiktų interneto sprendimo įgyvendinimai, kuriuose veikiantys siųstuvai-imtuvai tarpusavyje komunikuoja naudodami mažam veikimo nuotoliui pritaikytus *Bluetooth Low Energy* bei *ZigBee* protokolus.

2.1. *ESP32-C6* mikrovaldiklis

ESP32-C6 – tai „Espressif Systems“ įmonės sukurtas išplečiamojo funkcionalumo rinkinys (angl. *Development Kit, DVK*). Tai belaidį ryšį palaikanti mikrovaldiklio platforma, kurią naudotojas gali modifikuoti plečiant arba pridėdant papildomus išorinius modulius bei jutiklius. *ESP32-C6* turi *RISC-V* 32 bitų, vieno branduolio procesorių, kuris pagal numatytuosius nustatymus veikia naudojant 160 MHz dažnį. Mikrovaldiklis taip pat turi 512 KB SRAM ir 384 KB ROM atmintį. Mikrovaldiklis turi integruotas *WiFi*, *Bluetooth* (taip pat *Bluetooth Low Energy*) ir *IEEE 802.15.4* (suteikianti galimybę palaikyti *ZigBee* ir *Thread* protokolus) belaidžio ryšio technologijas. *ESP32-C6* (2.1 pav.) palaiko lengvo ir gilaus miego energijos valdymo režimus, kurie leidžia sumažinti energijos sąnaudas sistemos veikimo metu (*Espressif Systems*, 2025).



2.1 pav. *ESP32-C6* mikrovaldiklis (*Espressif Systems*, 2025)

ESP32-C6 mikrovaldiklį galima maitinti naudojant tiek 3,3 V, tiek 5 V įtampos šaltinius. Būtent 3,3 V įtampa yra reikalinga *ESP32* mikrovaldiklio procesoriui bei periferiniams įrenginiams veikti. *ESP32-C6* mikrovaldiklis turi vidinį *LDO* reguliatorių, kuris sumažina įvesties įtampą nuo 5 V iki 3,3 V. Modulis neturi integruotos *LiPo* baterijos jungties, todėl norint prijungti šį maitinimo šaltinį reikia pasinaudoti maitinimo iš išorinio šaltinio jungtimis.

2.2. DHT22 temperatūros ir drėgmės jutiklis

Daiktų interneto sprendimuose yra naudojami įvairūs jutikliai. Ryšio protokolų energijos sąnaudų tyrimas yra orientuotas į *IoT* sistemų kūrimą. Norint įvertinti išmatuotų sąnaudų tikslumą, svarbu jas pritaikyti imituojamų *IoT* scenarijų sąnaudų skaičiavimuose. Šie skaičiavimai palyginami su praktiškai išmatuotomis vertėmis. Šiuose daiktų interneto scenarijuose naudojamas *DHT22* aplinkos matavimų jutiklis. Atliekant tyrimą taip pat išmatuotos mikrovaldiklio ir prie jo prijungto jutiklio srovės sąnaudos.

DHT22, taip pat žinomas kaip *AM2302* – tai aplinkos temperatūros ir drėgmės matavimų jutiklis. Šis jutiklis yra skirtas tikslių aplinkos temperatūros bei santykinės drėgmės, kuri yra pateikiama procentų išraiška, matavimams atlikti.

DHT22 naudoja talpinį drėgmės jutiklį (angl. *capacitive humidity sensor*) ir termistorių oro temperatūrai matuoti. Surinkti duomenys yra perduodami skaitmeniniu formatu, naudojant jutiklį ir mikrovaldiklį jungiančią duomenų liniją.

Šis jutiklis turi integruotą analoginį-skaitmeninį duomenų keitiklį. *DHT22* aplinkos matavimų jutiklis perduoda surinktus duomenis skaitmeniniu formatu, todėl kuriamame daiktų interneto sprendime nereikia pritaikyti atskiro *ADC* loginio sprendimo. Jutiklis savo viduje apdoroja surinktus analoginius temperatūros ir drėgmės signalus bei perduoda juos kaip skaitmeninį signalą per vieną duomenų liniją.

Norint prijungti *DHT22* jutiklį prie mikrovaldiklio, duomenų linija sujungiama su viena iš mikrovaldiklio skaitmeninės įvesties jungčių. Tarp duomenų linijos ir maitinimo įtampos prijungiamas 10 k Ω varžos rezistorius. Tai yra traukos rezistorius (angl. *pull-up resistor*), kuris užtikrina, jog duomenų linija yra laikoma aukšto loginio lygio būsenoje, kai jutiklis nėra aktyvus. Taip sudaroma galimybė stabiliai perduoti skaitmeninius signalus iš jutiklio į mikrovaldiklį. Tokia grandinės konfigūracija garantuoja patikimą komunikaciją tarp *DHT22* ir mikrovaldiklio.

Pagrindinės *DHT22* (2.2 pav.) jutiklio charakteristikos (*Aosong Electronics Co. Ltd.*):

- Temperatūros matavimų intervalas – nuo -40 °C iki +80 °C, su galima $\pm 0,5$ °C matavimų paklaida.
- Drėgmės matavimų intervalas – nuo 0 % iki 100 % santykinės drėgmės, su galima $\pm 2-5$ % matavimų paklaida.
- Jutiklio maitinimo įtampa – nuo 3,3 V iki 6 V.
- Maksimalus jutiklio srovės suvartojimas – apie 2,5 mA aplinkos duomenų matavimo metu.



2.2 pav. DHT22 temperatūros ir drėgmės jutiklis (*Aosong Electronics Co. Ltd.*)

DHT22 yra populiarus bei lengvai integruojamas jutiklis, skirtas aplinkos drėgmės ir temperatūros matavimams atlikti. Šį jutiklį galima integruoti su įvairiomis mikrovaldiklių platformomis, tokiomis kaip *Arduino*, *Raspberry Pi* ar šiuo atveju *ESP32-C6*. Dėl paprasto naudojimo, šie jutikliai yra dažnai pritaikomi klimato kontrolės sistemose ir namų automatikos projektuose, kuriuose reikalingi temperatūros ir drėgmės duomenys.

2.3. Power Profiler Kit II energijos sąnaudų matavimo įranga

Nustatyti energijos sąnaudas naudojamas „Nordic Semiconductor“ įmonės sukurtas sprendimas – *Power Profiler Kit II*. Tyrimo atlikimo metu pagrindinis mikrovaldiklio maitinimo šaltinis – pats *Power Profiler Kit II*. Šis prietaisas srovės sąnaudų matavimo metu geba veikti kaip maitinimo šaltinis. Naudojant šį prietaisą kaip pagrindinį maitinimo šaltinį yra gaunamas itin stabilus ir pastovus įtampos bei srovės tiekimas.

„Nordic Semiconductor“ įmonės sukurtas *Power Profiler Kit II (PPK2)* – tai specializuotas prietaisas, skirtas mažos galios sistemų energijos sąnaudoms matuoti. Šis įrenginys yra skirtas stebėti ir analizuoti mikrovaldiklių ar kitų *IoT* sistemų komponentų generuojamas energijos sąnaudas realiu laiku.

PPK2 (2.3 pav.) yra ypač naudingas kuriant sistemas, kurios kaip maitinimo šaltinį naudoja baterijas. Naudojant *PPK2* galima įvertinti energijos suvartojimą skirtingais kuriamos sistemos veikimo etapais – žinant šią informaciją galima optimizuoti atskiras kuriamos sistemos dalis.

Power Profiler Kit II gali matuoti platų srovės diapazoną – nuo 200 nA iki 1 A (*Nordic Semiconductor ASA*, 2022). Įrenginys taip pat geba automatiškai perjungti matuojamos srovės diapazoną, taip užtikrinant tikslų srovės pokyčių fiksavimą. *PPK2* pasižymi aukšta duomenų priėmimo sparta, kuri siekia iki 100 tūkst. matavimų per sekundę. Ši savybė leidžia fiksuoti net ir labai trumpus, greitai kintančius srovės šuolius, kurie atliekant matavimus su mažesne mėginių rinkimo sparta gali likti

nepastebėti. PPK2 įrenginys taip pat pasižymi galimybe tiekti maitinimo įtampą nuo 0,8 V iki 5 V iš įrenginio viduje integruoto maitinimo šaltinio.

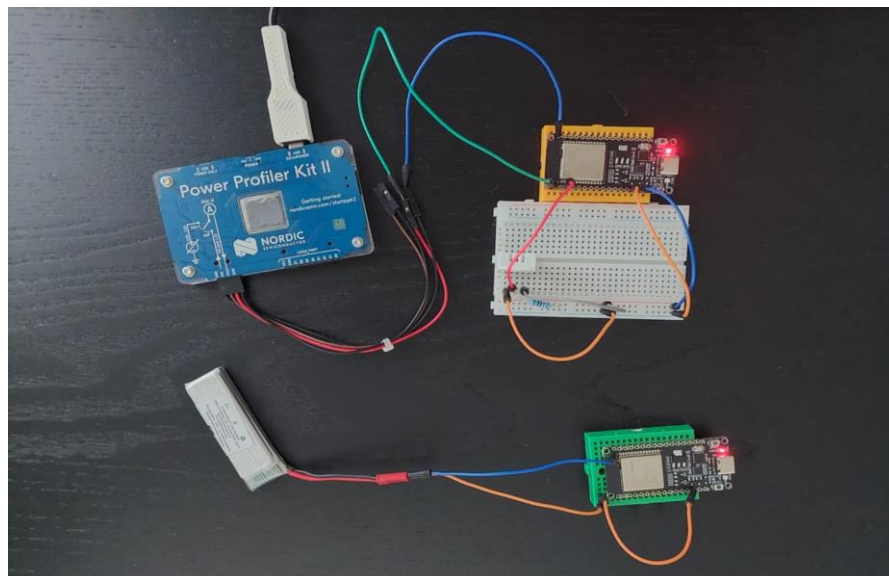


2.3 pav. Power Profiler Kit 2 srovės matavimo įranga (Nordic Semiconductor ASA, 2022)

PPK2 yra naudojamas kartu su „nRF Connect for Desktop“ programine įranga. Naudojant minėtąją programinę įrangą, matavimai atvaizduojami realiu laiku grafinėje sąsajoje, kurioje taip pat galima peržiūrėti .ppk2 formato failus, juos eksportuoti ar išsaugoti kitu formatu. Programoje integruoti įrankiai automatiškai apskaičiuoja vidutines, minimalias ir maksimalias matuojamo signalo vertes.

2.4. ESP32-C6 energijos sąnaudų palyginimas su gamintojo specifikacijomis

Prieš atliekant belaidžių ryšio protokolų energijos sąnaudų matavimus, įgyvendintas pačio tiriamojo įrenginio energijos sąnaudų įvertinimas. Šio įvertinimo metu tikrinama ar ESP32-C6 mikrovaldiklis generuoja panašias, ar didesnes sąnaudų vertes, lyginant su oficialioje mikrovaldiklio specifikacijoje (Espressif Systems, 2025) pateikiama informacija. Matavimams naudota sistema, kurią sudaro du ESP32-C6 mikrovaldikliai, DHT22 jutiklis bei PPK2 matavimo įranga (2.4 pav.):



2.4 pav. Energijos sąnaudų tyrimo atlikimas

Tokio pobūdžio mikrovaldiklio patikrinimas leidžia nustatyti, ar pasirinktas mikrovaldiklis neturi gamyklinių defektų, ar pasirinkta matavimo įranga ir metodika nedemonstruoja akivaizdžių trūkumų.

Naudojant *PPK2* yra fiksuojamos mikrovaldiklio lusto srovės sąnaudos ir papildomi sistemos srovės nuostoliai. Tyrimo metu kiekvienas matavimas pakartotas keletą kartų. Toliau pateiktos vertės – tai atliktų penkių matavimų srovės sąnaudų vidurkiai. Atliekant *EPP32-C6* mikrovaldiklio srovės sąnaudų palyginimą su specifikacijoje pateikiamomis vertėmis buvo siekiama išmatuoti maksimalias apkrautos sistemos sąnaudas. Atliekamų matavimų metu siekiama sukelti maksimalią mikrovaldiklio *CPU* apkrovą.

2.4.1. Srovės sąnaudos aktyviojo režimo metu

ESP32-C6 specifikacijoje pateikiamas skyrelis, kuriame detalizuojamos elektros srovės sąnaudos skirtingų belaidžio ryšio protokolų veikimo metu. Pateikiamose lentelėse detalizuojamos *WiFi* (2,4 GHz), *BLE* bei *802.15.4* standartų srovės sąnaudos tiek duomenų siuntimo, tiek gavimo metu. Duomenų siuntimo srovės sąnaudų lentelėse pateikiamos vertės, gautos taikant skirtingus radijo siųstuvo galios lygius.

Techniniame dokumente nėra nurodyta, su kokiomis ryšio parametrų konfigūracijomis buvo gautos *WiFi*, *BLE* ir *802.15.4* srovės sąnaudų vertės. Nėra aišku, kokio dydžio, kiek bei koku dažniu yra siunčiami duomenų paketai, koks atstumas tarp siuntėjo ir gavėjo, ar yra pritaikyti saugumo parametrai, ar įgyvendintas duomenų gavimo patvirtinimo mechanizmas, koks įrenginio *CPU* veikimo dažnis. Vis dėlto yra žinoma, jog visi matavimai buvo atlikti 25°C aplinkos temperatūroje bei naudojant 3,3 V įtampos maitinimo šaltinį. Duomenų siuntimo (*TX*) metu generuojamas srovės suvartojimas matuotas įgyvendinant 100% darbo ciklą, o duomenų gavimo (*RX*) srovės suvartojimas išmatuotas, kai periferiniai įrenginiai yra išjungti, o *CPU* nėra aktyvaus darbo režime.

Toliau pateikiamos duomenų lentelės, kuriose nurodomos ryšio protokolų srovės sąnaudos, pritaikius skirtingus belaidžio ryšio protokolus, siųstuvų galias. Lentelėse pateikiamos srovės sąnaudos: oficialioje *ESP32-C6 SoC* specifikacijoje nurodytos vertės ir eksperimento, atlikto su *Power Profiler Kit II*, metu išmatuotos reikšmės.

Lentelėje (2.1 lentelė) pateikiamos 2,4 GHz *WiFi* srovės sąnaudos, atliekant duomenų paketų siuntimą:

2.1 lentelė. *WiFi* srovės sąnaudos duomenų siuntimo metu

<i>TX</i> (duomenų siuntimas) maksimalios sąnaudos (mA)		
	Specifikacija	<i>PPK2</i>
<i>802.11b</i> , 1 Mbps, DSSS @ 21.0 dBm	354	416,15

802.11g, 54 Mbps, OFDM @ 19.5 dBm	300	371,92
802.11n, HT20, MCS7 @ 18.5 dBm	280	304,53
802.11n, HT40, MCS7 @ 18.0 dBm	268	276,56
802.11ax, MCS9, @ 16.5 dBm	252	264,13

Iš lentelės matoma, kad tyrimo metu išmatuotos *WiFi* srovės sąnaudos yra didesnės negu nurodyta oficialioje specifikacijoje. Atlikus praktinius matavimus matoma, kad išlieka oficialioje dokumentacijoje pateikiama verčių tendencija – naudojant mažesnę siųstuvo galią bei naujesnę protokolo versiją srovės sąnaudos mažėja. Didžiausias procentinis nuokrypis tarp išmatuotų bei specifikacijoje pateikiamų verčių yra apie 24 %. Prieduose pateikiamas *WiFi 802.11b* srovės sąnaudų matavimo profilis (**2 priedas**).

Toliau pateikiamoje lentelėje (**2.2 lentelė**) pristatomos *WiFi* srovės sąnaudos duomenų gavimo metu:

2.2 lentelė. *WiFi* srovės sąnaudos duomenų gavimo metu

RX (duomenų gavimas) maksimalios sąnaudos (mA)		
	Specifikacija	PPK2
802.11b/g/n, HT20	78	82,30
802.11n, HT40	82	82,20
802.11ax, HE20	78	81,85

Iš *WiFi* srovės sąnaudas, duomenų gavimo ir siuntimo metu, atvaizduojančių lentelių matoma, kad su *PPK2* išmatuoti rezultatai yra panašūs į specifikacijoje deklaruojamus. Duomenų gavimo metu yra matomas mažesnis bendras verčių nuokrypis nuo specifikacijoje pateikiamų skaičių nei duomenų siuntimo metu (**2.1 lentelė**).

Lentelėje (**2.3 lentelė**) pateikiamos *BLE* srovės sąnaudos duomenų siuntimo metu:

2.3 lentelė. *BLE* srovės sąnaudos duomenų siuntimo metu

TX (duomenų siuntimas) maksimalios sąnaudos (mA)		
	Specifikacija	PPK2
Bluetooth LE @ 20.0 dBm	315	382,72
Bluetooth LE @ 9.0 dBm	190	246,02
Bluetooth LE @ 0 dBm	130	203,46
Bluetooth LE @ -15.0 dBm	94	124,33

Pateikiamoje *BLE* duomenų siuntimo sąnaudų lentelėje matoma, kad gauti rezultatai yra didesni nei specifikacijoje pateikiamos vertės. Pagal specifikacijoje pateikiamus duomenis matoma, kad srovės sąnaudos mažėja su mažesne siųstuvo galia. Ši tendencija išlieka ir praktiniuose matavimuose.

Toliau pateikiamoje lentelėje (**2.4 lentelė**) pristatomos *BLE* srovės sąnaudos duomenų gavimo metu:

2.4 lentelė. *BLE* srovės sąnaudos duomenų gavimo metu

<i>RX</i> (duomenų gavimas) maksimalios sąnaudos (mA)		
	Specifikacija	<i>PPK2</i>
<i>Bluetooth LE</i>	71	79,53

2.4 lentelėje matoma, kad išmatuotos duomenų gavimo srovės sąnaudos yra panašios į specifikacijoje deklaruotas vertes. Išmatuota vertė yra 12 % didesnė.

Lentelėje (**2.5 lentelė**) pateikiamos *802.15.4* srovės sąnaudos duomenų siuntimo metu:

2.5 lentelė. *802.15.4* srovės sąnaudos duomenų siuntimo metu

<i>TX</i> (duomenų siuntimas) maksimalios sąnaudos (mA)		
	Specifikacija	<i>PPK2</i>
<i>802.15.4 @ 20.0 dBm</i>	305	374,67
<i>802.15.4 @ 12.0 dBm</i>	187	229,84
<i>802.15.4 @ 0 dBm</i>	119	149,84
<i>802.15.4 @ -15.0 dBm</i>	92	107,46

Iš *802.15.4* duomenų siuntimo srovės sąnaudas atvaizduojančios lentelės matoma, kad išmatuotos srovės sąnaudos yra didesnės nei pateikiama specifikacijoje. Didžiausias nuokrypis tarp specifikacijoje pateiktų bei išmatuotų *802.15.4* verčių siekia 25,9 %. Prieduose pateikiamas *802.15.4* srovės sąnaudų matavimo profilis (**3 priedas**).

Toliau pateikiamoje lentelėje (**2.6 lentelė**) pristatomos *802.15.4* srovės sąnaudos duomenų gavimo metu:

2.6 lentelė. *802.15.4* srovės sąnaudos duomenų gavimo metu

<i>RX</i> (duomenų gavimas) maksimalios sąnaudos (mA)		
	Specifikacija	<i>PPK2</i>
<i>802.15.4</i>	74	89,38

2.6 lentelėje matoma, kad *802.15.4* protokolo srovės sąnaudos duomenų gavimo metu yra apie 20,8 % didesnės nei pateikiama oficialioje mikrovaldiklio dokumentacijoje.

Naudojant *Power Profiler Kit II*, skirtingų ryšio protokolų duomenų siuntimo ir gavimo metu gautos srovės sąnaudos yra didesnės nei oficialioje *ESP32-C6* specifikacijoje nurodytos vertės. Duomenų gavimo metu išmatuotos srovės yra panašios į specifikacijoje pateikiamas teorines vertes. Duomenų paketų siuntimo metu gautos reikšmės yra kur kas didesnės. Didžiausias procentinis nuokrypis siekia net 56 %.

Srovės sąnaudų palyginimo metu gaunamos vertės rodo, kad *WiFi* duomenų siuntimo srovės sąnaudos yra didesnės nei kitų dviejų ryšio protokolų. Pirmoje magistro darbo dalyje pateikiamoje literatūros apžvalgoje taip pat yra matoma tendencija, jog *WiFi* ryšio protokolas generuoja didžiausias srovės sąnaudas. Šis pastebėjimas praktiškai atkartotas atliktuose duomenų siuntimo sąnaudų matavimuose. Visų trijų ryšio protokolų energijos sąnaudos atkartoja specifikacijoje pateikiamą logiką – duomenų siuntimo metu srovės sąnaudos mažėja kartu su mažesniu siųstuvo galios lygiu.

2.4.2. Srovės sąnaudos radijo modulio miego režimo metu

ESP32-C6 specifikacijoje pateikiamas skyrelis, kuriame detalizuojamos elektros srovės sąnaudos radijo modulio (specifikacijoje pristatomo kaip „modemo“) miego režimo metu. Modemo miego režimas (angl. *modem-sleep mode*) – tai būseną, kai radijo modulis yra išjungiamas arba laikomas žemos galios būsenoje. Radijo modulio miego režime srovės suvartojimas priklauso nuo *CPU* dažnio, *CPU* aktyvumo būsenos bei įgalintos mikrovaldiklio periferijos.

Lentelėje (2.7 lentelė) pateikiamos srovės sąnaudos radijo modulio miego metu:

2.7 lentelė. Srovės sąnaudos radijo modulio miego metu

Radijo modulio miego režimo vidutinės sąnaudos (mA)					
		Specifikacija		PPK2	
<i>CPU</i> dažnis (MHz)	<i>CPU</i> būsena	Visa periferija yra išjungta	Visa periferija yra įjungta	Visa periferija yra išjungta	Visa periferija yra įjungta
160	<i>CPU</i> veikia	27	38	39,33	47,68
	<i>CPU</i> neaktyvus	17	28	28,12	36,69
80	<i>CPU</i> veikia	19	30	30,63	35,28
	<i>CPU</i> neaktyvus	14	25	25,96	28,25

Lentelėje matoma, kad išmatuotos srovės sąnaudos yra didesnės nei specifikacijoje pateikiamos vertės. Praktiškai atliekamo tyrimo metu didesnės srovės sąnaudos yra tikėtinos. Prieduose

pateikiamas radijo modulio miego režimo srovės sąnaudų matavimo profilis, kai yra pritaikytas 160 MHz *CPU* veikimo dažnis bei išjungta visa periferija (**4 priedas**).

2.4.3. Srovės sąnaudos mažos galios režimų metu

ESP32-C6 specifikacijoje pateikiamas skyrelis, kuriame detalizuojamos srovės suvartojimas įvairiuose mažos galios režimuose. Šie režimai – tai gilaus bei lengvo miego būsenos.

Gilaus miego metu yra įgyvendinamas maksimalus energijos taupymas. Šio režimo metu dauguma sistemos komponentų yra išjungiami – veikia tik *RTC* laikrodis bei *LP* (žemos galios) atmintis. Pritaikius gilų miegą sistema gali pabusti tik pagal *RTC* laikmačio signalą.

Tuo tarpu lengvo miego režime mikrovaldiklis pereina į energijos taupymo būseną, tačiau išlaiko dalį funkcionalumą aktyvius. Lengvo miego metu *CPU*, belaidžio ryšio moduliai ir periferiniai įrenginiai yra išjungiami. *GPIO* jungtys išlieka aktyvios. Lengvo miego metu sistema gali greitai pabusti gavus išorės signalą bei toliau tęsti programos veiklą. Dėl galimybės reaguoti į išorės signalus, energijos sąnaudos šio režimo metu yra mažesnės negu aktyvaus darbo metu, tačiau didesnės nei gilaus miego būsenoje.

Lentelėje (**2.8 lentelė**) pateikiamos srovės sąnaudos gilaus bei lengvo miego metu:

2.8 lentelė. *ESP32-C6* srovės sąnaudos mažos galios režimų metu

Mažos galios režimų vidutinės sąnaudos (mA)			
		Specifikacija	PPK2
Lengvas miegas (angl. <i>light sleep</i>)	<i>CPU</i> , belaidžio ryšio moduliai ir periferinių įrenginių laikrodžiai yra išjungti, visos <i>GPIO</i> jungtys yra aktyvios.	0,180	2,46
	<i>CPU</i> , belaidžio ryšio moduliai ir periferiniai įrenginiai yra išjungti, visos <i>GPIO</i> jungtys yra aktyvios.	0,035	1,98
Gilus miegas (angl. <i>deep sleep</i>)	<i>RTC</i> laikmatis ir <i>LP</i> atmintis yra įjungti.	0,007	1,25

Mažos galios režimų srovės sąnaudų lentelėje yra matoma, kad specifikacijoje pateikiamos ir praktiškai išmatuotos vertės skiriasi. Lyginant gilaus miego sąnaudas, pastebimas net 178 kartų skirtumas tarp verčių. Atliekami srovės sąnaudų matavimai apima visus mikrovaldiklio komponentus, todėl tikėtina gauti didesnes srovės sąnaudas. Prieduose pateikiami gilaus (**5 priedas**) bei lengvo (**6 priedas**) miego srovės sąnaudų matavimo profiliai.

2.4.4. Srovės sąnaudos prijungus DHT22 jutiklį

Toliau pateikiamos ESP32-C6 mikrovaldiklio elektros srovės sąnaudos, kai prie jo yra prijungtas DHT22 temperatūros ir drėgmės jutiklis. DHT22 jutiklis turi atskirą specifikaciją, kurioje yra pateikiamos vidutinės suvartojamos srovės vertės miego bei aplinkos matavimų atlikimo metu. Atliekant jutiklio srovės sąnaudų matavimą buvo įjungta tik ta mikrovaldiklio periferija, kuri yra reikalinga DHT22 jutikliui veikti (ant mikrovaldiklio esančius jungtys, skirtos jutikliui maitinti bei duomenims gauti). Žemiau pateikiama lentelė, kurioje nurodomos vidutinės srovės sąnaudos matavimų atlikimo bei miego režimo metu (**2.9 lentelė**):

2.9 lentelė. ESP32-C6 srovės sąnaudos prijungus DHT22 jutiklį

DHT22 vidutinės sąnaudos (mA)		
	Specifikacija	PPK2
Matavimai	1,2	30,67
Miego režimas	0,015	26,75

Lentelėje pateikiamos DHT22 jutiklio specifikacijoje nurodytos individualios bei išmatuotos ESP32-C6 ir DHT22 kombinacijos srovės sąnaudos. Prieduose pateikiamas gilaus DHT22 srovės sąnaudų matavimo profilis (**7 priedas**).

2.4.5. Bendros sistemos srovės sąnaudos

Toliau pateikiama lentelė, kurioje nurodytos ESP32-C6 mikrovaldiklio bendros srovės sąnaudos šiais veikimo etapais: pabudimas iš miego režimo, programos iniciavimas ir perėjimas į miego stadiją. Pateikiamos srovės sąnaudos (**2.10 lentelė**):

2.10 lentelė. ESP32-C6 bendros srovės sąnaudos

Bendro pobūdžio sąnaudos (mA)		
	Vidutinės sąnaudos	Maksimalios sąnaudos
Pabudimas iš miego	21,85	29,44
Programinio kodo iniciavimas	70,84	83,50
Pasiruošimas miegui	44,26	59,86

Lentelėje pateiktos išmatuotos vidutinės bei maksimalios veiksmų srovės sąnaudos. Šios lentelės duomenys yra aktualūs imituojamų daiktų interneto scenarijų sąnaudoms skaičiuoti.

2.4.6. Poskyrio apibendrinimas

Atlikus *ESP32-C6* mikrovaldiklio generuojamų energijos sąnaudų nustatymą, šios vertės palygintos su oficialioje specifikacijoje nurodytais skaičiais. Matoma, kad mikrovaldiklis generuoja panašias ar didesnes sąnaudų vertes.

Skirtingų protokolų duomenų gavimo bei radijo modulio miego režimo metu matomos sąnaudos, kurios yra panašios į specifikacijoje pateikiamas vertes. Duomenų siuntimo bei mažos galios (lengvo bei gilaus miego) režimų metu matomos vertės yra didesnės ir viršija gamintojo specifiкуotas srovės sąnaudos. Dėl aplinkos sąlygų, signalo kelyje pasitaikančių kliūčių ar trikdžių, skirtingų testavimo metodų bei matavimo įrangos ypatumų didesnės srovės sąnaudos yra laikomos natūraliu ir tikėtinu reiškiniu praktiniuose bandymuose. Svarbu atkreipti dėmesį, jog praktinių matavimų atlikimo metu yra įvertinamos ne tik pačio mikrovaldiklio lusto srovės sąnaudos, bet ir papildomų mikrovaldiklio komponentų srovės suvartojimas. Panašus specifikacijos bei praktiškai atliktų matavimų verčių nesutapimas pristatomas ir pirmoje magistro darbo dalyje pateikiamoje literatūros analizėje. Tai patvirtina poreikį individualiai įvertinti mikrovaldiklio veikimo srovės sąnaudas.

Šio sąnaudų palyginimo metu taip pat patikrintas pasirinktos matavimo įrangos tinkamumas tolimesniam tyrimui įgyvendinti. *PPK2* įrankis leido tiksliai išmatuoti generuojamas srovės sąnaudas skirtingais mikrovaldiklio veikimo režimais.

3. TYRIMO MATAVIMAI

Tyrimo metu išmatuotas *BLE* ir *ZigBee* belaidžių ryšio protokolų srovės suvartojimas įvairiuose veikimo etapuose bei pritaikius įvairias ryšio konfigūracijas. Šių matavimų tikslas – palyginti *BLE* ir *ZigBee* protokolų srovės suvartojimą skirtingais veikimo etapais bei nustatyti, kokios pritaikytos ryšio konfigūracijos ar bendrosios veikimo taktikos yra efektyviausios siekiant įgyvendinti energijos taupymą. Visi matavimai įgyvendinti naudojant *ESP32-C6* mikrovaldiklį bei *Power Profiler Kit II* srovės sąnaudų matavimo įrangą.

3.1. *BLE* srovės sąnaudų matavimai

ESP32-C6 mikrovaldiklis turi pilnai integruoja *Bluetooth Low Energy* palaikymą. Šio protokolo energijos sąnaudų tyrimo metu programinis kodas kurtas *Arduino IDE* aplinkoje. Norint pasinaudoti egzistuojančiomis ir *BLE* funkcionalumą palaikančiomis bibliotekomis, naudotas „ESP32 Arduino Core“ programinis paketas. Šis paketas suteikia prieigą prie skirtingų *BLE* bibliotekų, tokių kaip „*BLEDevice*“, „*BLEServer*“, „*BLEClient*“ ar „*BLEUtils*“. Šios ir daugelis kitų jau egzistuojančių bibliotekų supaprastina *BLE* funkcionalumo įgyvendinimą.

Bluetooth Low Energy komunikacijos protokolo tyrimo metu atliktas skirtingų konfigūracijų pritaikymas bei skirtingų veikimo etapų analizė. Tai leidžia įvertinti energijos suvartojimo efektyvumą bei nustatyti, kurie parametrų deriniai leidžia užtikrinti didesnę energijos taupymą.

3.1.1. Duomenų siuntimas ir gavimas

Atliktas srovės sąnaudų matavimas, pritaikius skirtingus siųstuvo galios lygius. Galios lygių vertės pasirinktos pagal *ESP32-C6* specifikaciją. Duomenų siuntimo metu pritaikyta konfigūracija:

- CPU veikia 160 MHz dažniu.
- Siunčiama 100 duomenų paketų, kurių dydis yra 20 baitų. Duomenų siuntimas trunka 10 sekundžių, duomenys išsiunčiami kas 100 milisekundžių.
- Nėra įgyvendinti jokie saugumo parametrai.
- Duomenų gavimo patvirtinimas atliekamas žemiausiame *BLE* lygmenyje.
- Pritaikytas standartinis *MTU* dydis – 23.

Lentelėje (3.1 lentelė) pateikiamos *BLE* srovės sąnaudos duomenų siuntimo metu:

3.1 lentelė. *BLE* srovės sąnaudos duomenų siuntimo skirtingais atstumais metu

Signalų galios lygis	TX (duomenų siuntimas) vidutinės sąnaudos (mA)	
	Vidutinės sąnaudos	Maksimalios sąnaudos
<i>Bluetooth LE @ 20.0 dBm</i>	161,01	320,51

<i>Bluetooth LE @ 9.0 dBm</i>	142,13	220,74
<i>Bluetooth LE @ 0 dBm</i>	116,05	177,61
<i>Bluetooth LE @ -15.0 dBm</i>	97,02	112,65

Pateiktoje lentelėje matoma, kad pritaikius didesnę siųstuvo galią duomenų siuntimo srovės sąnaudos auga. Atliekant *BLE* duomenų siuntimo lentelėse (**3.1 lentelė** bei **2.3 lentelė**) esančių duomenų palyginimą matoma, kad išmatuotos srovės sąnaudos skiriasi. Specifikacijos ir išmatuotų verčių palyginimo metu (**2.3 lentelė**) buvo matuojamos maksimaliai apkrauto mikrovaldiklio srovės sąnaudos. Atliekant ryšio protokolų srovės sąnaudų tyrimą (skirtingai nei palyginimo su specifikacijos vertėmis metu) nebuvo taikyta maksimali sistemos apkrova.

Toliau pateikiama lentelė su *BLE* protokolo srovės sąnaudomis duomenų gavimo metu (**3.2 lentelė**):

3.2 lentelė. *BLE* srovės sąnaudos duomenų gavimo skirtingais atstumais metu

	<i>RX</i> (duomenų gavimas) vidutinės sąnaudos (mA)	
	Vidutinės sąnaudos	Maksimalios sąnaudos
<i>Bluetooth LE</i>	79,53	205,36

Šioje lentelėje pateikiamos imtuvo srovės sąnaudos duomenų paketų gavimo metu. Siekiant matyti pilną vaizdą, susijusį su duomenų siuntimu ir gavimu naudojant *BLE* ryšio protokolą, naudinga atsižvelgti į signalo stiprumą. Signalo stiprumą nusako *RSSI* vertės. Signalo stiprumas – tai parametras, kuris nusako kiek energijos yra signale, kuris pasiekia imtuvą iš siųstuvo. *RSSI* yra išreiškiamas matavimo vienetais decibelai-milivatuose (*dBm*). Paprastai *RSSI* reikšmės yra neigiama ir svyruoja nuo maždaug -30 *dBm* (tai reiškia, jog matuojamas stiprus signalas) iki -100 *dBm* (silpnas signalas). Kuo arčiau nulio yra išmatuojama *RSSI* reikšmė, tuo šis signalas yra stipresnis.

Žemiau pateikiama lentelė (**3.3 lentelė**), kurioje nurodomos signalo stiprumo reikšmės atliekant duomenų siuntimą skirtingais atstumais:

3.3 lentelė. Signalo stiprumo vertės skirtingais atstumais

	<i>RSSI</i> (signalų stiprumas)			
	20.0 <i>dBm</i>	9.0 <i>dBm</i>	0 <i>dBm</i>	-15.0 <i>dBm</i>
<i>Bluetooth LE</i>	-46,92	-58,08	-63,04	-63,52

Lentelėje yra pateikiamos išmatuotos *RSSI* reikšmės, pritaikius skirtingus *BLE* siųstuvo galios lygius. Matoma, kad mažesnė siųstuvo galia nulemia mažesnį signalo stiprumą, tačiau kartu ir mažesnes duomenų perdavimo sąnaudas (**3.1 lentelė**).

Mikrovaldiklio *CPU* dažnis nurodo, kiek operacijų per sekundę gali atlikti centrinis procesorius. *CPU* dažnis tiesiogiai lemia atliekamų skaičiavimų greitį bei sistemos energijos suvartojimą. *ESP32-C6* mikrovaldiklis veikia naudodamas 160 MHz procesoriaus dažnį. Šią vertę galima sumažinti iki 80 MHz, 40MHz ar 20 MHz. Palyginta, kaip kinta duomenų siuntimo metu gaunamos srovės sąnaudos, kai yra pritaikytas 160 MHz bei 80 MHz procesoriaus dažnis (**3.4 lentelė**):

3.4 lentelė. *BLE* srovės sąnaudos duomenų siuntimo metu, pritaikius skirtingus *CPU* dažnius

	TX (duomenų siuntimas) vidutinės sąnaudos (mA)	
	160 MHz	80 MHz
<i>Bluetooth LE @ 20.0 dBm</i>	161,01	91,26
<i>Bluetooth LE @ 9.0 dBm</i>	142,13	86,72
<i>Bluetooth LE @ 0 dBm</i>	116,05	80,93
<i>Bluetooth LE @ -15.0 dBm</i>	97,02	73,07

Pateiktos duomenų siuntimo, gavimo bei signalo stiprumo lentelės suteikia pilną vaizdą apie *BLE* technologijos generuojamas srovės sąnaudas pritaikius skirtingas veikimo sąlygas – ši informacija tinkama naudoti kuriant naujas mažai energijos naudojančias daiktų interneto sistemas. Prieduose pateikiamas *BLE 9 dBm* srovės sąnaudų matavimo profilis (**8 priedas**).

3.1.2. *BLE* tinklo reklama

Atliekant *BLE* reklamos srovės sąnaudų matavimą, pritaikytos skirtingos proceso konfigūracijos. Išmatuotos srovės sąnaudos skirtingais reklamavimo proceso intervalais, naudojant skirtingą kanalų skaičių bei pritaikius skirtingas išplėstinio reklamavimo taktikas. Žemiau pateikiama lentelė, atvaizduojanti *BLE* reklamavimo proceso atlikimą skirtingais intervalais (**3.5 lentelė**):

3.5 lentelė. *BLE* reklamos, atliekamos skirtingais intervalais, srovės sąnaudos

Skirtingi reklamos intervalai	Srovės sąnaudos (mA)	
	Vidutinės sąnaudos	Maksimalios sąnaudos
Dažnas reklamos intervalas (20 ms)	94,36	239,78
Retas reklamos intervalas (1000 ms)	49,34	209,20

Pateikiamoje lentelėje yra matoma, kad sumažinus *BLE* reklamos dažnį 50 kartų vidutinės sistemos srovės sąnaudos sumažėja apie 47,7 %. Tuo tarpu maksimalios sistemos srovės sąnaudos sumažėjo apie 12,75 %. Šis srovės sąnaudų pakitimas rodo, kad retesnis reklamos vykdymas yra efektyvus sprendimas energijos sąnaudoms sumažinti.

Toliau pateikiama *BLE* reklamavimo proceso srovės sąnaudų lentelė. Lentelėje pateikiamos srovės vertės naudojant skirtingą reklamos kanalų skaičių (**3.6 lentelė**):

3.6 lentelė. *BLE* reklamos, atliekamos skirtingame reklamos kanalų skaičiuje, srovės sąnaudos

Skirtingi reklamos kanalų kiekiai	Srovės sąnaudos (mA)	
	Vidutinės sąnaudos	Maksimalios sąnaudos
3 reklamos kanalai	94,36	239,78
1 reklamos kanalas	61,79	220,75

Pateikiamoje lentelėje matyti, jog *BLE* reklamos atlikimas naudojant vieną ryšio kanalą generuoja mažesnes vidutines srovės sąnaudas palyginti su reklamavimo atlikimu trejuose kanaluose. Vieno kanalo pasirinkimas generuoja mažesnes srovės sąnaudas, tačiau šis reklamavimo įgyvendinimas yra mažiau atsparus aplinkos trikdžiams.

BLE 4.0 standartas bei naujesnės protokolo versijos (jei nenurodyta kitaip) naudoja tris reklamavimo kanalus (37, 38 ir 39). Toks reklamavimo įgyvendinimas yra numatytas tam, jog sumažintų *WiFi* skleidžiamų trikdžių įtaką. Vis dėlto toks pasirinkimas generuoja didesnes energijos sąnaudas. Kuriant baterijų pagrindu veikiančias sistemas, aktualu užtikrinti energijos taupymą – šiuo atveju pasirinkus vieną reklamos kanalą, galima sutaupyti energijos.

Toliau pateikiamos *BLE* reklamavimo proceso atlikimo, pritaikius skirtingas reklamavimo taktikas, srovės sąnaudos (**3.7 lentelė**):

3.7 lentelė. *BLE* reklama, pritaikius skirtingas reklamavimo taktikas

Skirtingos reklamos taktikos	Srovės sąnaudos (mA)	
	Vidutinės sąnaudos	Maksimalios sąnaudos
Senoji reklamos forma	94,36	239,78
Mažos apimties išplėstinė reklama	54,99	62,14
Didelės apimties išplėstinė reklama	119,56	248,02

Lentelėje pateikiamos trijų skirtingų *BLE* reklamos taktikų srovės sąnaudos. *BLE* senoji reklamos forma (angl. *legacy advertising*) – tai *BLE* reklamavimo metodika, kuri buvo nurodyta *Bluetooth 4.0* specifikacijoje. Šios reklamos metu yra naudojami trys reklamos kanalai bei galima siųsti tik iki 31 baido duomenų viename reklaminiame pakete. Senoji reklamos forma išlieka svarbi dėl plataus suderinamumo su jau egzistuojančiais, senesnį *BLE* standartą palaikančiais įrenginiais bei sistemomis. Jei programiniame kode nėra nurodoma kitaip, automatiškai naudojama senoji *BLE* reklamos forma.

Mažos ir didelės apimties išplėstinės reklamos – tai naujausios *BLE* reklamavimo formos, kurios pristatytos kartu su *Bluetooth 5.0* specifikacija. Mažos apimties išplėstinės reklamos forma,

kaip ir prieš tai minėtoji senoji reklamos forma, palaiko reklamavimo atlikimą trijuose kanaluose, tačiau leidžia siųsti didesnę duomenų kiekį – 255 baitus viename reklaminiame pakete. Tuo tarpu didelės apimties išplėstinė reklama suteikia galimybę perduoti iki 1650 baitų duomenų bei naudoja papildomus kanalus (nuo 0-to iki 36-to) kaip antrinius reklamos kanalus. Matavimų atlikimo metu naudoti trys skirtini duomenų paketų dydžiai: 21 baito paketai su senąja reklamos forma, 35 baitų paketai su mažos apimties bei 227 baitai su didelės apimties išplėstine reklama.

Iš lentelėje (3.7 lentelė) pateikiamų reikšmių yra matoma, kad mažos apimties išplėstinė reklamos formos pasižymi mažiausiomis vidutinėmis bei maksimaliomis sąnaudomis. Ši reklamos forma demonstruoja daugiau negu dvigubai mažesnes vidutines bei beveik keturis kartus mažesnes maksimalias srovės sąnaudas palyginti su didelės apimties išplėstine reklama. Senoji reklamos forma demonstruoja tarpinius rezultatus – 1,7 karto didesnes vidutines srovės sąnaudas nei mažos apimties reklama bei 1,2 karto mažesnes srovės sąnaudas nei didelės apimties reklama. Šiuo atveju matoma, kad (jei sistemos reikalavimai leidžia) pasirinkus mažos apimties išplėstinę reklamos formą galima reikšmingai sumažinti energijos sąnaudas.

3.1.3. BLE tinklo skenavimas

BLE tinklo skenavimas – tai procesas, kurio metu įrenginys ieško aplinkinių BLE įrenginių. BLE tinklo skenavimą galima atlikti taikant du pagrindinius būdus – aktyvųjį bei pasyvųjį skenavimą.

Aktyvaus skenavimo metu, įrenginys priima transliuojamus reklaminius paketus, siunčia specialias užklausas ir laukia atsakymų iš netoliese esančių BLE įrenginių, kurie atlieka reklamavimo procesą. BLE įrenginiai, kurie veikia reklamos režimu, atsako į šiuos signalus su papildomos informacijos duomenų paketais – tokiu būdu skenuojantysis įrenginys gauna informaciją apie kiekvieną aptiktą įrenginį. Dėl šios papildomos veikimo logikos aktyvaus skenavimo metu įrenginys naudoja daugiau energijos.

Tuo tarpu pasyvaus skenavimo metu įrenginys klausos ir fiksuoja aplinkoje transliuojamus reklaminius paketus, tačiau nesiunčia jokių papildomų užklausų. Tokiu būdu yra atliekamas energijos taupymas.

Be aktyvaus ir pasyvaus skenavimo būdų, taip pat galima pritaikyti greito bei lėto skenavimo parametrus. Šie parametrai apibrėžia, kaip dažnai atliekamas skenavimas ir kiek laiko jis trunka. Greito skenavimo metu įgyvendinami trumpesni intervalai tarp skenavimo ciklų ir ilgesnis pačio skenavimo atlikimas. Tai leidžia aptikti aplinkinius įrenginius greičiau, tačiau kartu generuoja didesnes energijos sąnaudas. Priešingai, lėtas skenavimas naudoja ilgesnius intervalus tarp skenavimo ciklų ir trumpesnius skenavimo langus, taip taupant energiją.

Greito bei lėto skenavimo parametrai gali būti derinami su aktyviuoju bei pasyviuoju skenavimo režimais, sukuriant įvairias skenavimo konfigūracijas. Žemiau pateikiamos lentelės, kuriose nurodomos srovės sąnaudos pritaikius greitą aktyvų ir pasyvų (**3.8 lentelė**) bei lėtą aktyvų ir pasyvų (**3.9 lentelė**) skenavimo metodus:

3.8 lentelė. Greitojo, aktyvaus bei pasyvaus, skenavimo srovės sąnaudos

Greitas skenavimas	Srovės sąnaudos (mA)	
	Vidutinės sąnaudos	Maksimalios sąnaudos
Aktyvus skenavimas	74,59	228,13
Pasyvus skenavimas	51,37	56,44

3.9 lentelė. Lėtojo, aktyvaus bei pasyvaus, skenavimo srovės sąnaudos

Lėtas skenavimas	Srovės sąnaudos (mA)	
	Vidutinės sąnaudos	Maksimalios sąnaudos
Aktyvus skenavimas	53,81	223,21
Pasyvus skenavimas	49,80	55,06

Abiejose lentelėse matoma, kad pasyvus skenavimas tiek greitime, tiek lėtame režimuose demonstruoja mažesnes srovės sąnaudas negu aktyvus skenavimas. Greitas bei lėtas pasyvūs skenavimai generuoja panašias srovės sąnaudas – tarpu šių verčių yra tik 3,15 % skirtumas. Tarp greito bei lėto aktyvių skenavimų matomas didesnis 38,6 % sąnaudų skirtumas. Kaip ir tikėtasi, **3.8** bei **3.9** lentelėse matoma tendencija, jog greito skenavimo atlikimas naudoja daugiau elektros srovės sąnaudų nei lėtas skenavimas.

3.1.4. Prisijungimas prie BLE tinklo

Bluetooth Low Energy prisijungimas – tai procesas, kurio metu *BLE* įrenginiai užmezga abipusį tarpusavio ryšį. *BLE* prisijungimo procesas prasideda nuo periferinio įrenginio siunčiamų reklaminių paketų. Centrinis įrenginys atlieka skenavimą bei aptikęs tinkamą periferinį įrenginį inicijuoja prisijungimo procesą. Toliau šio proceso metu minėtasis centrinis įrenginys siunčia užklausą su periferiniam įrenginiui siūlomais ryšio parametrais.

Periferinis įrenginys, gavęs centrinio įrenginio užklausą, pereina į prisijungimo režimą. Toliau derybų metu atliekamas ryšio parametrų nustatymas. Užmezgus tarpusavio ryšį, įrenginiai pradeda keistis duomenimis. Duomenims apsikeisti naudojama dažnio šuolių technologiją, kurios pritaikymo metu yra atliekamas periodiškasis kanalų keitimas. Tai yra atliekama tam, jog būtų išvengiama ryšio trikdžių bei užtikrinamas stabilus ir energetiškai efektyvus ryšys.

BLE prisijungimo metu galima pritaikyti du skirtingus greičio tipus – greitąjį bei lėtąjį. Greito prisijungimo metu pritaikomas trumpas prisijungimo intervalas, svyruojantis nuo 7,5 iki 100 milisekundžių. Šio srovės sąnaudų tyrimo metu pritaikytas 7,5 milisekundžių prisijungimo intervalas. Lėtas prisijungimas naudoja ilgesnį prisijungimo intervalą, kuris svyruoja nuo 100 milisekundžių iki kelių sekundžių. Šio sąnaudų matavimo metu pritaikytas 800 milisekundžių lėto prisijungimo intervalas.

Toliau pateikiamos lentelės, kuriose nurodomas tiek *BLE* kliento (periferinio įrenginio) (**3.10 lentelė**), tiek *BLE* serverio (centrinio įrenginio) (**3.11 lentelė**) srovės sąnaudos greito ir lėto prisijungimo metu:

3.10 lentelė. *BLE* kliento srovės sąnaudos prisijungimo metu

<i>BLE</i> kliento prisijungimas	Srovės sąnaudos (mA)	
	Vidutinės sąnaudos	Maksimalios sąnaudos
Greitas prisijungimas (7,5 ms)	94,46	224,43
Lėtas prisijungimas (800 ms)	75,78	219,52

3.11 lentelė. *BLE* serverio srovės sąnaudos prisijungimo metu

<i>BLE</i> serverio prisijungimas	Srovės sąnaudos (mA)	
	Vidutinės sąnaudos	Maksimalios sąnaudos
Greitas prisijungimas (7,5 ms)	121,56	238,22
Lėtas prisijungimas (800 ms)	108,87	235,01

Iš pateiktų lentelių matyti, jog *BLE* kliento ir *BLE* serverio greito prisijungimo metu yra generuojamos didesnės srovės sąnaudos negu atliekant lėtą prisijungimą. Kaip ir tikėtasi, lėtas prisijungimas prie tinklo generuoja mažesnes srovės sąnaudas. Iš lentelėse apteikiamų duomenų taip pat yra matoma, kad prisijungimo metu *BLE* serveris generuoja didesnes srovės sąnaudas nei *BLE* klientas.

BLE prisijungimo metu gali būti naudojamas įrenginio delsos (angl. *slave latency*) parametras. Šis parametras leidžia periferiniam įrenginiui be atsako praleisti tam tikrą kiekį ryšio įvykių, jei šis neturi jokių naujų duomenų. Tyrimo metu pritaikyta parametro vertė yra 10. Tai reiškia, jog periferinis įrenginys galės praleisti 10 iš eilės įvyksiančių ryšio įvykių. Pritaikius šį parametą yra sumažinamos sistemos energijos sąnaudos, kadangi periferinis įrenginys gali daugiau laiko praleisti miego būsenoje. Jei nebūtų pritaikytas įrenginio delsos parametras, periferinis įrenginys, net ir neturint naujų duomenų, privalės sureaguoti į naują ryšio įvykį. Šios reakcijos metu periferinis įrenginys privalo prisijunti prie centrinio įrenginio ir atsakyti išsiunčiant tuščią duomenų paketą. Tokiu būdu atliekamas papildomas energijos švaistymas.

Toliau pateikiama lentelė, kurioje nurodomos *BLE* kliento atliekamo greito prisijungimo pritaikius įrenginio delsos parametą srovės sąnaudos (**3.12 lentelė**):

3.12 lentelė. *BLE* kliento srovės sąnaudos prisijungimo metu taikant delsos parametą

<i>BLE</i> kliento prisijungimas su delsa	Srovės sąnaudos (mA)	
	Vidutinės sąnaudos	Maksimalios sąnaudos
Be delsos	94,46	224,43
Su delsa	52,36	237,06

Iš lentelėje pateikiamų srovės sąnaudų matyti, jog generuojamos vidutinės srovės sąnaudos atitinka delsos parametro naudojimo logiką. Prisijungimo metu taikant delsos parametą yra gaunamos 44,58 % mažesnės vidutinės srovės sąnaudos.

Toliau pateikiama lentelė, kurioje nurodomos *BLE* kliento atliekamo ryšio nutraukimo srovės sąnaudos (**3.13 lentelė**):

3.13 lentelė. *BLE* kliento srovės sąnaudos ryšio nutraukimo metu

<i>BLE</i> kliento ryšio nutraukimas	Srovės sąnaudos (mA)	
	Vidutinės sąnaudos	Maksimalios sąnaudos
<i>BLE</i> ryšio nutraukimas	49,96	55,66

Išmatuotos *BLE* kliento ryšio nutraukimo srovės vertės yra aktualios atliekant *IoT* scenarijų sąnaudų skaičiavimą. Iš *BLE* prisijungimo sąnaudas pateikiančių lentelių yra matoma, kad ryšio nutraukimo maksimalios srovės sąnaudos yra apie 4 kartus mažesnės nei prisijungimo metu.

3.1.5. Skirtingo dydžio duomenų paketų siuntimas

Tyrimo metu atliktas srovės sąnaudų matavimas siunčiant tiek didelio, tiek mažo dydžio duomenų paketus. Didelių duomenų paketų dydis yra 200 baitų, mažų paketų – 20 baitų. Šio tyrimo metu pritaikyta konfigūracija:

- CPU veikia 160 MHz dažniu.
- Siųstuvo galia 9 dBm.
- Duomenų paketo dydis yra 200 baitų (dideli paketai) arba 20 baitų (maži paketai).
- Duomenų siuntimo intervalas – 1000 ms (lėtas duomenų perdavimas).
- Nėra įgyvendinti jokie saugumo parametrai.
- Duomenų gavimo patvirtinimas žemiausiame *BLE* lygmenyje.

Lentelėje (**3.14 lentelė**) pateikiamos *BLE* srovės sąnaudos duomenų paketų siuntimo metu:

3.14 lentelė. *BLE* srovės sąnaudos skirtingo dydžio duomenų paketų siuntimo metu

Skirtingų dydžių paketų siuntimas	Srovės sąnaudos (mA)	
	Vidutinės sąnaudos	Maksimalios sąnaudos
Dideli paketai (200 baitų)	119,68	243,82
Maži paketai (20 baitų)	99,75	238,44

Iš lentelėje pateiktų srovės sąnaudų matyti, kad siunčiant 10 kartų mažesnius duomenų paketus gaunamos srovės sąnaudos yra 20 % mažesnės. Šio matavimo metu gauti rezultatai atitinka literatūros apžalos (Shahzad & Oelmann, 2014) metu pristatytą koncepciją, jog siunčiant mažo dydžio duomenų paketus yra generuojamos mažesnės srovės sąnaudos. Prieduose pateikiamas *BLE* didelio duomenų paketo siuntimo srovės sąnaudų matavimo profilis (**9 priedas**).

3.14 lentelėje pateikiamos skirtingų dydžių duomenų paketų lėto siuntimo srovės sąnaudos. Šioje lentelėje pateikiami duomenys atvaizduoja lėtą paketų siuntimą, kuris yra atliekamas kas 1000 ms. Šią lentelę galima palyginti su **3.1** lentele, kurioje atvaizduojami srovės sąnaudų duomenys, atliekant greitą mažo dydžio duomenų paketų siuntimą. Šioje lentelėje duomenys yra siunčiami kas 100 ms.

Remiantis **3.1** lentelės duomenimis, vidutinės srovės sąnaudos, pritaikius 9 dBm siųstuvo galios lygį, yra 142,13 mA. Tuo tarpu **3.14** lentelėje pateikiami duomenys rodo, kad mažo paketo perdavimo metu naudojama 99,75 mA srovės. Iš šių verčių palyginimo yra matoma, kad įgyvendinus identiško dydžio duomenų paketo lėto siuntimą, srovės sąnaudos sumažėja 29,8 %. Šis skirtumas demonstruoja, jog lėtas duomenų paketų siuntimas sumažina bendras sistemos energijos sąnaudas. Lėto siuntimo metu tarpas tarp dviejų ryšio įvykių pailgėja, todėl mikrovaldiklis gali ilgiau būti mažos galios režime ir taip sumažinti bendrą energijos suvartojimą.

3.1.6. Skirtingos duomenų perdavimo metodikos

Tyrimo metu atliktas srovės sąnaudų nustatymas taikant skirtingas *BLE* duomenų perdavimo metodikas. Skirtingos duomenų perdavimo metodikos – tai nuolatinis duomenų perdavimas (angl. *continuous streaming*), duomenų perdavimas juos grupuojant (angl. *data batching*) bei periodinių duomenų užklausų siuntimas (angl. *periodic polling*).

Nuolatinis duomenų perdavimas – tai metodika, kai duomenys siunčiami nepertraukiamai. Duomenų grupavimas – tai duomenų perdavimo metodas, kai surinkti duomenys yra kaupiami tam tikrą laiką ir siunčiami kaip bendras duomenų rinkinys. Šio metodo pritaikymo metu, išvengiama duomenų paketų siuntimo atskirai – jie yra grupuojami ir siunčiami kartu. Periodinės apklausos – tai metodas, kurio metu įrenginys atlieka periodišką užklausų siuntimą, siekiant gauti naujausius

duomenis. Periodinių užklausų pritaikymo metu sistema neatlieka nuolatinės komunikacijos – ji tik tam tikrais laiko tarpais prisijungia ir patikrina, ar atsirado naujų duomenų.

Žemiau pateikiamoje duomenų lentelėje (**3.15 lentelė**), kurioje nurodomos srovės sąnaudos skirtingų duomenų perdavimo metodikų taikymo metu:

3.15 lentelė. BLE srovės sąnaudos duomenų perdavimo metu

Skirtingos duomenų perdavimo metodikos	Srovės sąnaudos (mA)	
	Vidutinės sąnaudos	Maksimalios sąnaudos
Nuolatinis duomenų perdavimas	142,13	220,74
Duomenų grupavimas	117,25	198,52
Periodinės apklausos	132,96	217,34

Iš trijų skirtingų duomenų perdavimo metodikų, nuolatinis perdavimas generuoja didžiausias srovės sąnaudas. Nuolatinis duomenų siuntimas suvartoja daugiausia srovės, nes šio metodo metu radijo modulis bei mikrovaldiklio procesorius dirba be pertraukų ir negali pereiti į energiją taupančius miego režimus.

Iš lentelėje (**3.15 lentelė**) pateikiamų duomenų matoma, kad nuolatinis duomenų perdavimas pasižymi didžiausiomis vidutinėmis bei maksimaliomis sąnaudomis. Tuo tarpu duomenų grupavimas generuoja mažiausias tiek vidutines, tiek maksimalias srovės sąnaudas. Periodinių apklausų metodas demonstruoja tarpinį rezultatą.

3.1.7. Saugumo parametrai

Atliktas srovės sąnaudų palyginimas pritaikius skirtingus BLE saugumo sprendimus. BLE saugumo parametrais pasirinktas duomenų šifravimas bei MITH sprendimai.

Tyrimo metu, atliekant srovės sąnaudų matavimą, siekiama nustatyti, ar pasirinkimas siųsti neapsaugotus duomenis yra optimaliausias kompromisas tarp saugumo lygio ir energijos sąnaudų. Tyrimo metu pritaikytas AES-CCM (angl. *Advanced Encryption Standard with Counter CBC-MAC*, AES-CCM) algoritmas duomenims šifruoti.

Be duomenų šifravimo taip pat įvertintos energijos sąnaudos pritaikius MITH sprendimą. MITH (angl. *Message Integrity and Trust Handler*, MITH) – tai kartu su BLE technologija naudojamas saugumo mechanizmas, kuris užtikrina pranešimų vientisumą bei apsaugą nuo duomenų klastojimo. Pritaikius MITH sprendimą, duomenų siuntėjas atlieka patikrinimo kodo įtraukimą į BLE duomenų paketą. Kai duomenų paketas pasiekia gavėją, tikrinama, ar šis kodas yra nepakitęs.

Žemiau pateikiamoje lentelėje (**3.16 lentelė**) nurodomos elektros srovės sąnaudos pritaikius tris skirtingus saugumo sprendimus – jokie šifravimo algoritmo netaikymas, *AES-CCM* šifravimo bei *AES-CCM* šifravimas kartu su *MITH* mechanizmu taikymas:

3.16 lentelė. *BLE* srovės sąnaudos, pritaikius skirtingus saugumo parametrus

<i>BLE</i> saugumo parametrai	Srovės sąnaudos (mA)	
	Vidutinės sąnaudos	Maksimalios sąnaudos
Jokio šifravimo	142,13	220,74
<i>AES-CCM</i> šifravimas be <i>MITH</i>	146,78	229,13
<i>AES-CCM</i> šifravimas su <i>MITH</i>	203,23	298,29

Iš lentelėje pateikiamų duomenų matoma, kad nenaudojant jokio šifravimo sprendimo vidutinės ir maksimalios srovės sąnaudos yra panašios į tas, kurios yra generuojamos taikant šifravimą be *MITH* metodo. Lentelėje matoma, kad pritaikius šifravimą su *MITH* generuojamos srovės sąnaudos yra 43% didesnės nei nenaudojant jokio šifravimo sprendimo.

Atlikti matavimai rodo, jog šifravimo be *MITH* naudojimas nesukelia reikšmingų srovės sąnaudų pokyčių. Todėl šio saugumo parametro naudojimas gali būti kompromisas tarp minimalaus saugumo užtikrinimo ir energijos sąnaudų. Naudojant tokį sprendimą, sistemos vidutinės srovės sąnaudos būtų beveik tokios pačios kaip ir nepritaikius jokio šifravimo metodo.

3.1.8. MTU dydis

BLE technologijoje naudojamas *MTU* (angl. *Maximum Transmission Unit*, *MTU*) – tai parametras, kuris apibrėžia maksimalų duomenų kiekį, kuris gali būti perduodamas vienu duomenų paketu. Standartiškai, *BLE* naudoja 23 baitų *MTU* dydį, tačiau ši reikšmė gali būti keičiama iki 512 baitų.

Didesnis *MTU* dydis leidžia perduoti daugiau duomenų viename pakete. Naudojant didesnę *MTU* reikšmę galima sumažinti siunčiamų duomenų paketų skaičių. Tai gali būti naudojama kaip taktika siekiant sumažinti bendras sistemos energijos sąnaudas. Žemiau pateikiama duomenų lentelė (**3.17 lentelė**), kurioje nurodomos duomenų siuntimo srovės sąnaudos, pritaikius skirtingus *MTU* dydžius:

3.17 lentelė. *BLE* srovės sąnaudos pritaikius skirtingus *MTU* dydžius

Skirtingi <i>MTU</i> dydžiai	Srovės sąnaudos (mA)	
	Vidutinės sąnaudos	Maksimalios sąnaudos
23 <i>MTU</i>	142,13	220,74
185 <i>MTU</i>	184,05	254,75

Pateikiamojo duomenų lentelėje matoma, kad pritaikius mažesnę *MTU* vertę yra gaunamos 29,5 % efektyvesnės vidutinės srovės sąnaudos. Vis dėlto svarbu atkreipti dėmesį, kad siunčiant didelius duomenų kiekius ir pritaikius mažesnę *MTU* vertę, teks siųsti daugiau duomenų paketų.

3.1.9. *PHY* vertė

PHY – tai *BLE* technologijoje naudojamas fizinio ryšio lygmens (angl. *Physical Layer*) parametras. Šis parametras apibrėžia, kaip duomenys yra fiziškai perduodami radijo bangomis tarp įrenginių.

Tyrimo metu pritaikytos dvi skirtingos *PHY* vertės: *1M PHY* bei *2M PHY*. *1M PHY* – tai *Bluetooth 4.0* versijoje naudojamas *PHY* tipas, kuris užtikrina 1 Mbps duomenų perdavimo greitį. *2M PHY* – tai *Bluetooth 5.0* versijoje pristatytas *PHY* tipas, kuris užtikrina didesnę duomenų perdavimo greitį – 2 Mbps. Svarbu pabrėžti, kad naujausiose *Bluetooth* protokolo versijoje yra įgyvendinamas dinamiškas *PHY* režimų perjungimas.

Žemiau pateikiama duomenų lentelė (**3.18 lentelė**), kurioje nurodomos vidutinės ir maksimalios srovės sąnaudos, pritaikius skirtingus *PHY* tipus:

3.18 lentelė. *BLE* srovės sąnaudos pritaikius skirtingus *PHY* tipus

Skirtingos <i>PHY</i> vertės	Srovės sąnaudos (mA)	
	Vidutinės sąnaudos	Maksimalios sąnaudos
<i>1M PHY</i>	142,13	220,74
<i>2M PHY</i>	163,44	263,06

Tikėtina, jog *2M PHY* režimas, kuris užtikrina greitesnį duomenų perdavimą, generuos didesnes srovės sąnaudas. Tyrimo metu gauti rezultatai tai patvirtina. Iš lentelėje pateikiamų duomenų matoma, kad pritaikius *2M PHY* tipą yra gaunamos 15% didesnės vidutinės srovės sąnaudos.

3.2. *ZigBee* srovės sąnaudų matavimai

ESP32-C6 mikrovaldiklis turi integruotą *ZigBee* protokolo palaikymą. *ZigBee* funkcionalumus įgyvendinantis programinis kodas kurtas naudojant *Arduino IDE* aplinką. *Arduino IDE* aplinka neturi oficialios programinio kodo bibliotekos, skirtos *ESP32-C6 ZigBee* funkcionalumams įgyvendinti. Programoms kurti pasitelktas *Arduino IDE* aplinkai skirtas *Arduino-ESP32* programinis paketas. Tai mėgėjų bendruomenės kuriamas ir palaikomas projektas, kurio tikslas yra adaptuoti ir perkelti *ESP-IDF* funkcionalumus į *Arduino IDE* aplinką. Minėtasis projektas dar neturi pilnaverčio palaikymo

visoms *ESP-IDF* funkcijoms. Dėl dabartinės projekto stadijos neįmanoma atlikti kai kurių protokolo funkcionalumų srovės sąnaudų matavimų.

3.2.1. Duomenų siuntimas ir gavimas

Atliktas srovės sąnaudų matavimas, pritaikius skirtingus siųstuvo galios lygius. Duomenų siuntimo metu pritaikyta konfigūracija:

- CPU veikia 160 MHz dažniu.
- Siunčiama 100 duomenų paketų, kurių dydis yra 4 baitų. Duomenų siuntimas trunka 10 sekundžių, duomenys išsiunčiami kas 100 milisekundžių.
- Naudojami standartiniai saugumo parametrai.

Lentelėje (**3.19 lentelė**) pateikiamos srovės sąnaudos gaunamos naudojant *ZigBee* protokolą duomenims siųsti:

3.19 lentelė. Srovės sąnaudos, naudojant *ZigBee* protokolą duomenims siųsti

Signalų galios lygis	TX (duomenų siuntimas) vidutinės sąnaudos (mA)	
	Vidutinės sąnaudos	Maksimalios sąnaudos
<i>ZigBee</i> @ 20.0 dBm	220,36	459,25
<i>ZigBee</i> @ 9.0 dBm	110,28	356,74
<i>ZigBee</i> @ 0 dBm	89,09	203,61
<i>ZigBee</i> @ -15.0 dBm	76,73	112,72

Iš lentelėje pateikiamų duomenų matoma, kad pritaikius didesnę siųstuvo galios lygį duomenų siuntimo srovės sąnaudos didėja. Prieduose pateikiamas *ZigBee* 9 dBm srovės sąnaudų matavimo profilis (**10 priedas**). Žemiau pateikiama lentelė (**3.20 lentelė**) su srovės sąnaudomis, kurios yra gaunamos pritaikius *ZigBee* protokolą duomenims gauti:

3.20 lentelė. Srovės sąnaudos, naudojant *ZigBee* protokolą duomenims gauti

	RX (duomenų gavimas) vidutinės sąnaudos (mA)	
	Vidutinės sąnaudos	Maksimalios sąnaudos
<i>ZigBee</i>	209,82	412,4

Lentelėje yra matoma, kad duomenų gavimo metu generuojamos srovės sąnaudos yra didesnės negu konkrečiais duomenų siuntimo atvejais. Tik pritaikius 20 dBm siųstuvo galią, duomenų siuntimo srovės sąnaudos yra didesnės negu duomenų gavimo metu.

Žemiau pateikiama lentelė, kurioje atvaizduojamos duomenų siuntimo metu generuojamos srovės sąnaudos, pritaikius skirtingus procesoriaus veikimo dažnius (**3.21 lentelė**):

3.21 lentelė. *ZigBee* srovės sąnaudos duomenų siuntimo metu, pritaikius skirtingus *CPU* dažnius

	TX (duomenų siuntimas) vidutinės sąnaudos (mA)	
	160 MHz	80 MHz
<i>ZigBee</i> @ 20.0 dBm	220,36	169,28
<i>ZigBee</i> @ 9.0 dBm	110,28	98,14
<i>ZigBee</i> @ 0 dBm	89,09	75,53
<i>ZigBee</i> @ -15.0 dBm	76,73	64,36

Iš lentelėje pateikiamų duomenų yra matoma, kad duomenų siuntimas pritaikius mažesnį mikrovaldiklio veikimo dažnį generuoja mažesnes srovės sąnaudas.

3.2.2. Skirtingo dydžio duomenų paketų siuntimas

Tyrimo metu atliktas srovės sąnaudų matavimas siunčiant tiek didelio, tiek mažo dydžio duomenų paketus. Dėl *Arduino-ESP32* programinio paketo ribojimų, matavimo atlikimo metu didelių duomenų paketų dydis yra 20 baitų, mažų paketų – tik 4 baitai. Šio tyrimo metu pritaikyta konfigūracija:

- *CPU* veikia 160 MHz dažniu.
- Siųstuvo galia 9 dBm.
- Duomenų paketo dydis yra 20 baitų (dideli paketai) arba 4 baitų (maži paketai).
- Duomenų siuntimo intervalas – 1000 ms.
- Naudojami standartiniai saugumo parametrai.

Lentelėje (3.22 lentelė) pateikiamos srovės sąnaudos duomenų siuntimo metu, naudojant *ZigBee* komunikacijos protokolą:

3.22 lentelė. Skirtingo dydžio duomenų perdavimo srovės sąnaudos, naudojant *ZigBee* protokolą

Skirtingų dydžių paketų siuntimas	Srovės sąnaudos (mA)	
	Vidutinės sąnaudos	Maksimalios sąnaudos
Dideli paketai (20 baitų)	94,56	602
Maži paketai (4 baitai)	83,42	596

Iš lentelėje pateikiamų srovės sąnaudų duomenų matoma, kad mažo dydžio duomenų paketų siuntimas generuoja mažesnes srovės sąnaudas, nei siunčiant didelio dydžio duomenų paketus. Atliekant *BLE* srovės sąnaudų matavimus matoma ta pati tendencija – siunčiant mažesnio dydžio duomenų paketus generuojamos mažesnės srovės sąnaudos (3.14 lentelė). Prieduose pateikiamas

ZigBee protokolo atliekamo mažo duomenų paketo siuntimo srovės sąnaudų matavimo profilis (**12 priedas**).

Taip pat matoma, kad vidutinės paketų siuntimo sąnaudos yra žymiai mažesnės nei maksimalios srovės sąnaudos. Tai reiškia, jog *ZigBee* protokolo naudojimo metu yra patiriami dideli srovės sąnaudų šuoliai.

3.2.3. Skirtingos duomenų perdavimo metodikos

Tyrimo metu atliktas skirtingų duomenų perdavimo metodikų pritaikymas, siekiant nustatyti jų metu generuojamas srovės sąnaudas. Pritaikytos nuolatinio duomenų perdavimo bei duomenų grupavimo metodikos. Šių matavimų metu naudota konfigūracija:

- CPU veikia 160 MHz dažniu.
- Siųstuvo galia 9 dBm.
- Siunčiami 4 baitų duomenų paketai nuolatinio siuntimo būdu arba 20 baitų duomenų paketai pritaikius duomenų grupavimą.
- Duomenų siuntimo intervalas – 1000 ms įgyvendinant nuolatinį siuntimą bei 5000 ms įgyvendinant duomenų grupavimą.
- Naudojami standartiniai saugumo parametrai.

Žemiau pateikiamoje duomenų lentelėje (**3.23 lentelė**) nurodomos srovės sąnaudos skirtingų duomenų perdavimo metodikų atlikimo metu:

3.23 lentelė. Srovės sąnaudos skirtingose *ZigBee* duomenų perdavimo metodikose

Skirtingos duomenų perdavimo metodikos	Srovės sąnaudos (mA)	
	Vidutinės sąnaudos	Maksimalios sąnaudos
Nuolatinis siuntimas	83,42	596
Duomenų grupavimas	67,28	530

Tiek nuolatinį, tiek grupuojamų duomenų siuntimo metu atliekamas tokio paties duomenų paketų kiekio perdavimas. Iš lentelėje pateikiamų duomenų matoma, kad duomenų grupavimas generuoja mažesnes vidutines bei maksimalias srovės sąnaudas. Kaip ir *BLE* srovės sąnaudų matavimo metu matoma, jog duomenų grupavimas generuoja mažesnes sąnaudas nei nuolatinis duomenų perdavimas (**3.15 lentelė**). Tai lauktas rezultatas.

3.23 lentelėje matoma tendencija, jog *ZigBee* protokolo veikimo metu įvyksta dideli srovės sąnaudų šuoliai. Vidutinės skirtingų duomenų perdavimo metodikų srovės sąnaudos yra net 7 kartus

mažesnės negu maksimalios. Šios maksimalios srovės vertės – tai *ZigBee* protokolo matavimuose matomos pasikartojančios anomalijos.

Daiktų interneto sistemose dažna energijos sąnaudų mažinimo strategija – retesnis duomenų perdavimas. Tyrimo metu pritaikyti skirtingi duomenų perdavimo dažniai, siekiant patikrinti, ar retesnis duomenų perdavimas generuoja mažesnės srovės sąnaudos. Šio tyrimo metu pritaikyta konfigūracija:

- CPU veikia 160 MHz dažniu.
- Siųstuvo galia 9 dBm.
- Duomenų paketo dydis yra 20 baitų.
- Duomenų siuntimo intervalas – 1s, 10s, 30s bei 60s.
- Naudojami standartiniai saugumo parametrai.

Žemiau pateikiamoje lentelėje (3.24 lentelė) nurodomos srovės sąnaudos:

3.24 lentelė. Duomenų perdavimas skirtingais laiko intervalais naudojant *ZigBee* protokolą

Duomenų perdavimo dažnis	Srovės sąnaudos (mA)		
	Vidutinės sąnaudos	Maksimalios sąnaudos	Laiko tarpas (s)
Labai dažnas siuntimas (kas 1s)	94,56	602	500
Dažnas siuntimas (kas 10s)	90,67	542	500
Vidutinio dažnumo siuntimas (kas 30s)	84,14	461,28	500
Retas siuntimas (kas 60s)	62,76	424,15	500

Iš lentelėje pateikiamų duomenų matoma, kad rečiau atliekamas duomenų siuntimas generuoja mažesnes vidutines srovės sąnaudas. Mažinant duomenų perdavimo dažnį nuo 1 iki 10 sekundžių, vidutinės srovės sąnaudos sumažėja 4,11 %. Nuo 10 iki 30 sekundžių, vidutinės srovės sąnaudos sumažėja maždaug 7,2 %, o sumažinus dažnį iki 60 sekundžių – apie 25,41 %. Šis srovės sąnaudų sumažėjimas patvirtina literatūros analizės metu paminėto retesnio duomenų paketų siuntimo taktikos efektyvumą.

3.2.4. Tinklo skenavimas

ZigBee tinklo skenavimo metu įrenginys atlieka dvi funkcijas: esamų *ZigBee* tinklų paiešką bei laisvesnių ryšio kanalų nustatymą. Skenavimo metu įrenginys tikrina ryšio kanalus ir juose ieško *ZigBee* koordinatoriaus ar maršrutizatoriaus įrenginių. Tinklo skenavimo metu yra surenkama

informacija apie egzistuojančių tinklų identifikatorius, kanalų numerius, signalo stiprumą bei naudojamus saugumo parametrus. Skenavimo metu aptikus tinklą, galima prie jo prisijungti.

Skenavimas taip pat atliekamas kanalų foniniam triukšmui nustatyti. Tai naudojama siekiant nustatyti mažiausiai užimtą ryšio kanalą.

Tinklo skenavimas yra skirstomas į aktyvųjį ir pasyvųjį. Aktyvaus skenavimo metu yra siunčiami užklauskos paketai. Juos gavę tinklo valdymo įrenginiai atsako atgal siųsdami paketą, kuriame yra tinklo parametrų informacija. Šie užklauskų paketai yra siunčiami visais ryšio kanalais.

Taip pat egzistuoja pasyvus skenavimas. Šio skenavimo metu įrenginys nesiunčia užklauskos paketų, o atlieka radijo eterio klausymąsi. Įrenginys pasyvaus skenavimo metu klausos kitų įrenginių siunčiamų aptikimo paketų. Šis skenavimo būdas yra energetiškai efektyvesnis, tačiau jei tinkle nėra siunčiamų aptikimo paketų, skenavimo metu nebus surasti egzistuojantys *ZigBee* tinklai.

Žemiau pateikiama aktyvaus bei pasyvaus skenavimo srovės sąnaudas atvaizduojanti duomenų lentelė (**3.25 lentelė**):

3.25 lentelė. *ZigBee* vykdomo aktyvaus bei pasyvaus tinklo skenavimo srovės sąnaudos

Tinklo skenavimas	Srovės sąnaudos (mA)	
	Vidutinės sąnaudos	Maksimalios sąnaudos
Aktyvus skenavimas	94,84	548
Pasyvus skenavimas	78,03	598

Lentelėje matoma, kad pasyvus skenavimas generuoja 17,7 % mažesnes srovės sąnaudas nei aktyvus tinklo skenavimo būdas. Šios lentelės duomenys pagrindžia pasyvaus skenavimo energetinį efektyvumą.

Atliekant *ZigBee* tinklo skenavimą galima pasirinkti, kuriuos kanalus norima patikrinti. Pagal numatytuosius nustatymus skenavimas yra atliekamas visuose 16 kanalų. Konkrečių kanalų skenavimas leidžia pagreitinti skenavimo procesą bei kartu taupyti energijos sąnaudas.

Žemiau pateikiama lentelė, kurioje atvaizduojamas skirtingų kanalų kiekio skenavimo sąnaudos (**3.26 lentelė**):

3.26 lentelė. *ZigBee* srovės sąnaudos tinklo skenavimo metu

Aktyvus tinklo skenavimas	Srovės sąnaudos (mA)	
	Vidutinės sąnaudos	Maksimalios sąnaudos
5-ių kanalų skenavimas	78,59	568
1-ieno kanalo skenavimas	77,31	602

Lentelėje matoma, kad vieno bei penkių ryšio kanalų skenavimo metu gaunamos vidutinės srovės sąnaudos yra panašios. Atliekant šios (**3.26 lentelė**) bei **3.25** lentelių palyginimą matoma, kad

pasyvaus skenavimo, kurio metu yra patikrinami visi 16 kanalų, srovės sąnaudos yra panašios į aktyvaus skenavimo, kurio metu yra patikrinami tik keli kanalai, sąnaudas. Norint optimizuoti *ZigBee* tinklo skenavimo generuojamas energijos sąnaudas, gali būti pritaikyta pasyvi skenavimo strategija arba, žinant aktualius kanalus, selektyvus skenavimas. Prieduose pateikiamas *ZigBee* kelių kanalų skenavimo srovės sąnaudų matavimo profilis (**11 priedas**).

3.2.5. Prisijungimas prie tinklo

ZigBee ryšio protokolas leidžia atlikti greitą bei lėtą prisijungimą prie *ZigBee* tinklo. Greito prisijungimo metu prisijungiantysis įrenginys žino pagrindinius tinklo parametrus. Dėl šios priežasties prie tinklo galima prisijungti išvengiant skenavimo proceso bei paties tinklo paieškos. Lėto prisijungimo metu įrenginys nežino tinklo parametrų, todėl yra atliekama tinklo paieška. Skenavimo metu yra tikrinami visi 16 kanalų, aptikus tinklą yra gaunama jo informacija bei atliekamas prisijungimas.

Žemiau pateikiama lentelė, kurioje atvaizduojamos galinio įrenginio prisijungimo prie tinklo srovės sąnaudos (**3.27 lentelė**):

3.27 lentelė. *ZigBee* srovės sąnaudos galinio įrenginio prisijungimo metu

<i>ZigBee</i> galinio įrenginio prisijungimas	Srovės sąnaudos (mA)	
	Vidutinės sąnaudos	Maksimalios sąnaudos
Greitas prisijungimas	165,88	610
Lėtas prisijungimas	260,23	620

Iš lentelėje pateikiamų sąnaudų verčių yra matoma, kad greitas prisijungimas prie tinklo generuoja 36,26 % mažesnes srovės sąnaudas palyginti su lėto prisijungimo atlikimu. Lėto prisijungimo metu dėl atliekamo papildomo tinklo skenavimo gaunamos srovės sąnaudos yra didesnes.

Toliau pateikiama lentelė, kurioje nurodomos *ZigBee* galinio įrenginio ryšio nutraukimo srovės sąnaudos (**3.28 lentelė**):

3.28 lentelė. *ZigBee* srovės sąnaudos galinio įrenginio ryšio nutraukimo metu

<i>ZigBee</i> galinio įrenginio ryšio nutraukimas	Srovės sąnaudos (mA)	
	Vidutinės sąnaudos	Maksimalios sąnaudos
<i>ZigBee</i> ryšio nutraukimas	147,82	570

Lentelėje matomos *ZigBee* ryšio nutraukimo metu generuojamos srovės sąnaudos. Šios srovės vertės yra naudojamos daiktų interneto scenarijų sąnaudų skaičiavime.

3.3. Skyriaus apibendrinimas ir išvados

Atlikus *BLE* komunikacijos protokolo srovės sąnaudų matavimą, galima padaryti šias išvadas:

1. *BLE* mažos apimties išplėstinės reklamos taktika demonstruoja mažiausias vidutines ir maksimalias srovės sąnaudas. Šis *BLE* reklamos būdas yra efektyvesnis nei senoji reklamos forma ir naudoja mažesnio dydžio reklaminius paketus nei didelės apimties išplėstinė reklama. Mažų reklaminių paketų naudojimas generuoja 41,7 % mažesnes vidutines srovės sąnaudas nei naudojant senąją reklamos formą bei 54 % mažesnes vidutines srovės sąnaudas nei naudojant didelės apimties išplėstinę reklamos formą.
2. Greitas pasyvus ir lėtas (tiek aktyvus, tiek pasyvas) skenavimas rodo geresnes srovės sąnaudas nei greitas aktyvus skenavimo režimas. Greitas aktyvus skenavimas generuoja 45 % didesnes srovės sąnaudas nei kiti skenavimo režimai.
3. *BLE* duomenų grupavimas sumažina bendras įrenginio srovės sąnaudas, dėl atliekamo retesnio duomenų paketų siuntimo. Duomenų grupavimo metu gautos sąnaudos yra 17,5 % mažesnės nei atliekant nuolatinį duomenų perdavimą.
4. Atliekant *BLE* įrenginio prijungimą prie *BLE* tinklo, lėtas prisijungimas arba prisijungimas su delsa padeda sumažinti energijos sąnaudas. *BLE* kliento atliekamas lėtas prisijungimas prie tinklo naudoja 24 % mažiau srovės nei greitas prisijungimas. *BLE* kliento prisijungimas su delsa naudoja 32 % mažesnes srovės sąnaudas nei prisijungimas be uždelimo.
5. Saugumo mechanizmų taikymas (šifravimas be *MITM* apsaugos) neturi reikšmingo poveikio srovės sąnaudoms. Pritaikius šifravimą be *MITM* srovės sąnaudos išliko praktiškai nepakitusios palyginti su jokia saugumo metodo netaikymu. Srovės sąnaudų pokyčio nebuvimas rodo, jog kuriant daiktų interneto sistemas verta taikyti bent minimalų saugumo sprendimą, nesukeliant papildomų energijos sąnaudų.
6. Tyrimo metu nustatyta, kad *ESP32-C6* modulis *BLE* ryšio metu, kai vykdomas duomenų perdavimas, generuoja didesnę srovės suvartojimą nei duomenų gavimo fazėje. Tokią pat tendenciją pristatyta ir literatūros analizės metu Suomijos mokslininkų darbe (Siekkinen et al., 2012).

Pilnavertis *ZigBee* ryšio protokolo srovės sąnaudų matavimas buvo neįmanomas dėl naudojamos programinio kodo bibliotekos techninių apribojimų. Atlikus galimus *ZigBee* srovės sąnaudų matavimus, buvo suformuluotos šios išvados:

1. *ZigBee* tinklo skenavimo metu pritaikyta pasyvaus skenavimo būdas generuoja 21 % mažesnes srovės sąnaudas lyginant su aktyvaus skenavimo būdu. Selektivus, ne visų 16 kanalų, skenavimas taip pat demonstruoja 21 % mažesnes srovės sąnaudas.
2. Naudojant *ZigBee* protokolą atliekamas duomenų grupavimas generuoja mažesnes srovės sąnaudas nei nuolatinis duomenų siuntimas. Šis duomenų siuntimo metodas gali būti naudojamas kaip efektyvus sprendimas sistemos energijos sąnaudų mažinimui.
3. Mažų duomenų paketų siuntimas sumažina energijos sąnaudas. Nors dėl naudojamos bibliotekos ribojimų testavimo galimybės siunčiant skirtingo dydžio paketus buvo ribotos, rezultatai rodo, kad mažesnių paketų siuntimas yra efektyvesnis energijos požiūriu.
4. Rečiau atliekamas duomenų siuntimas generuoja mažesnes vidutinės srovės sąnaudas. Sumažinus duomenų paketų perdavimo dažnį nuo 1 iki 60 sekundžių, vidutinės srovės sąnaudos sumažėja 33,65 %.
5. Greitas prisijungimas prie *ZigBee* tinklo, kurio atlikimo metu iš anksto yra žinomi tinklo parametrai, generuoja 36,26 % mažesnes srovės sąnaudas palyginti su lėto prisijungimo atlikimu.
6. *ZigBee* protokolo veikimo metu pastebėti srovės piko reiškiniai, kurie neigiamai veikia energijos sąnaudų efektyvumą. Visų *ZigBee* parametrų matavimo metu fiksuotos maksimalios srovės sąnaudos yra kelis kartus didesnės nei vidutinės. Šie trumpalaikiai, bet intensyvūs srovės šuoliai turi būti detalieji tiriami bei vertinami projektuojant energiją taupančius sprendimus.

4. PRAKTINIAI DAIKTŲ INTERNETO SCENARIJAI

Atlikus *ESP32-C6* mikrovaldiklio srovės sąnaudų matavimą skirtingais *BLE* ir *ZigBee* ryšio protokolų veikimo momentais, įgyvendintas realių daiktų interneto scenarijų sudarymas ir jų sąnaudų patikrinimas. Šio patikrinimo metu siekiama įvertinti, ar bendros scenarijų generuojamos sąnaudos atitinka atskirai išmatuotų veikimo žingsnių sąnaudų kombinacijas.

BLE sąnaudų prognozavimo tikslumui įvertinti pasitelkti trys scenarijai, o *ZigBee* – du. Šių scenarijų sąnaudoms matuoti naudojamas *Power Profiler Kit II* įrenginys. Matavimų metu, *PPK2* pateikia išmatuoto signalo vidutinės ir maksimalios srovės vertes, viso signalo laiko trukmę bei energijos krūvį. Norint tiksliai apskaičiuoti sudarytų scenarijų sąnaudas, atliekamas kiekvieno atskiro žingsnio energijos krūvio skaičiavimas. Krūviui skaičiuoti pritaikyta formulė:

$$Q = I \times t$$

Šioje formulėje:

- Q – krūvis (kulonais, C).
- I – srovė (amperais, A).
- t – laikas (sekundėmis, s).

Krūviui skaičiuoti naudojamos tyrimo metu nustatytos *BLE* ir *ZigBee* protokolų vidutinės srovės sąnaudos. Apskaičiuotos skirtingų scenarijų atlikimo žingsnių krūvio sąnaudos yra sumuojamos ir padalinamos iš viso scenarijaus laiko trukmės. Vidutinės srovės skaičiavimui pritaikyta formulė:

$$I_{vid} = \frac{\sum Q}{\sum t}$$

Šioje formulėje:

- I_{vid} – vidutinė srovė (amperais, A);
- Q – krūvis (kulonais, C);
- t – laikas (sekundėmis, s).

Teoriškai apskaičiuotos scenarijų vidutinės srovės sąnaudų vertės yra palyginamos su praktiškai išmatuotomis.

4.1. *BLE* scenarijai

Pirmasis *BLE* scenarijus įgyvendina *DHT22* jutiklio duomenų perdavimą tarp dviejų įrenginių. Šio scenarijaus metu:

- *BLE* klientas periodiškai pabunda iš gilaus miego, atlieka aplinkos temperatūros ir drėgmės matavimą, inicijuoja *BLE* ryšį, atlieka išmatuotų duomenų siuntimą *BLE* serveriu bei vėl

pereina į gilų miegą. *BLE* klientas išbūna gilaus miego režime tris minutes ir pabudęs vėl kartoja tuos pačius žingsnius.

- *BLE* serveris yra nuolatos aktyvioje būsenoje, įrenginys laukia klientų prisijungimo, priima jų siunčiamus duomenis. Po įvykusio kliento atsijungimo, *BLE* serveris automatiškai vėl pradeda *BLE* reklamavimą, tam jog būtų pasiekiamas kitam klientui prisijungti.

BLE serveris vykdo nuolatinį reklamos siuntimą, todėl jo energijos sąnaudos yra pastovios bei nedemonstruoja srovės pokyčių. Toliau pateikiamas *BLE* kliento sąnaudų skaičiavimas.

Teorinėms sąnaudoms skaičiuoti išskirti scenarijaus metu atliekami veiksmai. Įvertintos veiksmų preliminaros trukmės bei, naudojantis tyrimo metu nustatytais vidutinėmis srovės sąnaudomis, apskaičiuotos visų žingsnių krūvių vertės. Žinant viso scenarijaus trukmę bei bendrą krūvio vertę, apskaičiuotos vidutinės srovės sąnaudos. Šios vertės palygintos su praktiškai išmatuotais rezultatais. Scenarijaus įgyvendinimo metu naudota tokia konfigūracija:

- CPU veikia 160 MHz dažniu.
- Siųstuvo galia 9 dBm.

Žemiau pateikiama lentelė (**4.1 lentelė**), kurioje pateikiami scenarijaus įgyvendinimo metu atliekami žingsniai, jų preliminaros trukmės, tyrimo metu nustatytos vidutinės srovės sąnaudos bei apskaičiuotas krūvis:

4.1 lentelė. Pirmojo *BLE* scenarijaus žingsnių teoriniai skaičiavimai

Žingsnis	Veiksmas	Trukmė (s)	Srovė (mA)	Krūvis (mC)
1	Pabudimas iš miego	2	21,85	43,7
2	Matavimai	1	30,67	30,67
3	<i>BLE</i> prisijungimas	2	94,46	188,92
4	Duomenų siuntimas	1	142,13	142,13
5	<i>BLE</i> atsijungimas	1	49,96	49,96
6	Pasiruošimas miegui	1	44,26	44,26
7	Gilus miegas	180	1,25	225
Rezultatai	-	188	-	724,64

Turint laiko ir krūvio vertes apskaičiuota vidutinė scenarijaus srovė. Žemiau pateikiama lentelė (**4.2 lentelė**), kurioje palyginamos teoriškai ir praktiškai gautos pirmojo scenarijaus vieno ciklo laiko, krūvio ir vidutinės srovės vertės:

4.2 lentelė. Pirmojo *BLE* scenarijaus vieno ciklo sąnaudų palyginimas

	Pirmojo <i>BLE</i> scenarijaus vieno ciklo sąnaudos
--	---

	Krūvis (mC)	Trukmė (s)	Vidutinė srovė (mA)
Teorinės apskaičiuotos vertės	724,64	188	3,85
Praktiškai išmatuotos vertės	660	187,5	3,52

Vienas scenarijaus ciklas trunka 3 minutes, 7 sekundes ir 5 milisekundes. Atliktas ilgesnis sąnaudų matavimas, kurio metu atliekami keli ciklo įgyvendinimai. Per 18min 51s trunkantį matavimo laikotarpį įvyksta šeši pilni ciklai, leidžiantys stebėti ir vertinti pasikartojančio proceso energijos sąnaudas. Teorinės sąnaudos apskaičiuotos vieno ciklo vertes padauginus iš įgyvendintų pilnų ciklų skaičiaus. Gavus viso scenarijaus trukmės ir krūvio vertes apskaičiuota vidutinė viso scenarijaus srovė (**4.3 lentelė**):

4.3 lentelė. Pirmojo BLE scenarijaus sąnaudų palyginimas

	Pirmojo BLE scenarijus sąnaudos		
	Krūvis (mC)	Trukmė (s)	Vidutinė srovė (mA)
Teorinės apskaičiuotos vertės	4347,84	1128	3,85
Praktiškai išmatuotos vertės	4240	1131	3,75

Matoma, kad tarp teorinių ir praktiškai apskaičiuotų pirmojo BLE scenarijaus (**13 priedas**) krūvio sąnaudų yra tik 2,54 % paklaida. Tuo tarpu tarp vidutinių srovės sąnaudų matoma 2,66 % paklaida.

Antrasis BLE scenarijus taip pat įgyvendina DHT22 jutiklio duomenų perdavimą tarp dviejų įrenginių. Šis scenarijus skiriasi nuo pirmojo tuo, jog yra įgyvendinamas tinklo skenavimas. Šio skenavimo metu yra ieškoma BLE serverio reklamos paketų pagal nurodytą UUID reikšmę. Pirmojo scenarijaus įgyvendinimo metu tinklo skenavimas nebuvo įgyvendinamas – BLE klientas jungėsi prie BLE serverio pagal iš anksto nurodytą MAC adresą. Antrojo scenarijaus metu yra atliekamas greitas aktyvios būsenos skenavimas. Antrojo scenarijaus žingsnių sąnaudos pateikiamos lentelėje (**4.4 lentelė**):

4.4 lentelė. Antrojo BLE scenarijaus žingsnių teoriniai skaičiavimai

Žingsnis	Veiksmas	Trukmė (s)	Srovė (mA)	Krūvis (mC)
1	Pabudimas iš miego	2	21,85	43,7
2	Matavimai	1	30,67	30,67
3	BLE skenavimas	3	74,59	223,77
4	BLE prisijungimas	2	94,46	188,92

5	Duomenų siuntimas	1	142,13	142,13
6	BLE atsijungimas	1	49,96	49,96
7	Pasiruošimas miegui	1	44,26	44,26
8	Gilus miegas	180	1,25	225
Rezultatai	-	191	-	948,41

Žemiau pateikiama lentelė (**4.5 lentelė**), kurioje palyginamos teoriškai ir praktiškai gautos antrojo scenarijaus vieno ciklo laikas ir krūvis bei apskaičiuota vidutinė srovės vertė:

4.5 lentelė. Antrojo BLE scenarijaus vieno ciklo sąnaudų palyginimas

	Antrojo BLE scenarijus vieno ciklo sąnaudos		
	Krūvis (mC)	Trukmė (s)	Vidutinė srovė (mA)
Teorinės apskaičiuotos vertės	948,41	191	4,96
Praktiškai išmatuotos vertės	890	191,4	4,64

Atrojo scenarijaus metu vienas ciklas trunka 3 minutes, 11 sekundžių ir 4 milisekundes. Atliktas ilgesnis scenarijaus sąnaudų matavimas. Įgyvendintas matavimas truko 1 valandą bei 40 sekundžių. Per šį laiko tarpą įvykta 19 pilnų ciklų. Skaičiuojant teorinę sąnaudų prognozę atliktas vieno ciklo sąnaudų padauginimas iš atliktų ciklų skaičiaus. Rezultatai pateikiami lentelėje (**4.6 lentelė**):

4.6 lentelė. Antrojo BLE scenarijaus sąnaudų palyginimas

	Antrojo BLE scenarijus sąnaudos		
	Krūvis (mC)	Trukmė (s)	Vidutinė srovė (mA)
Teorinės apskaičiuotos vertės	18019,79	3629	4,96
Praktiškai išmatuotos vertės	18080	3640	4,96

Teoriškai apskaičiuota devyniolikos ciklų krūvio vertė yra 0,33 % mažesnė, negu praktiškai išmatuota. Tuo tarpu teoriškai apskaičiuota ir praktiškai išmatuota vidutinės srovės vertės sutampa.

Trečiojo scenarijaus atlikimo metu taip pat įgyvendinamas jutiklio temperatūros ir drėgmės duomenų perdavimą tarp dviejų įrenginių. Šis scenarijus skiriasi nuo kitų tuo, kad vyksta atsakomojo ryšio siuntimas iš BLE serverio į BLE klientą. Trečiojo scenarijaus žingsnių seka bei sąnaudos pateikiamos lentelėje (**4.7 lentelė**):

4.7 lentelė. Trečiojo BLE scenarijaus žingsnių teoriniai skaičiavimai

Žingsnis	Veiksmas	Trukmė (s)	Srovė (mA)	Krūvis (mC)
----------	----------	------------	------------	-------------

1	Pabudimas iš miego	2	21,85	43,7
2	Matavimai	1	30,67	30,67
3	<i>BLE</i> prisijungimas	2	94,46	188,92
4	Duomenų siuntimas	1	142,13	142,13
5	Atsakymo gavimas	2	79,53	159,06
6	<i>BLE</i> atsijungimas	1	49,96	49,96
7	Pasiruošimas miegui	1	44,26	44,26
8	Gilus miegas	180	1,25	225
Rezultatai	-	190	-	883,7

Žemiau pateikiama lentelė (**4.8 lentelė**), kurioje palyginamos teoriškai ir praktiškai gautos trečiojo scenarijaus vieno ciklo laiko, krūvio ir vidutinės srovės vertės:

4.8 lentelė. Trečiojo *BLE* scenarijaus vieno ciklo sąnaudų palyginimas

	Trečiojo <i>BLE</i> scenarijus vieno ciklo sąnaudos		
	Krūvis (mC)	Trukmė (s)	Vidutinė srovė (mA)
Teorinės apskaičiuotos vertės	883,7	190	4,65
Praktiškai išmatuotos vertės	840	191,6	4,38

Trečio scenarijaus metu vienas ciklas trunka 3 minutes, 11 sekundžių ir 6 milisekundes. Atliktas ilgos trukmės trečiojo scenarijaus matavimas, kuris truko 2 valandas 1 minutę ir 19 sekundžių. Per šį laiko tarpą įvyksta 38 pilni scenarijaus ciklai. Teoriniai ir praktiniai skaičiavimai pateikiami lentelėje (**4.9 lentelė**):

4.9 lentelė. Trečiojo *BLE* scenarijaus sąnaudų palyginimas

	Trečiojo <i>BLE</i> scenarijus sąnaudos		
	Krūvis (mC)	Trukmė (s)	Vidutinė srovė (mA)
Teorinės apskaičiuotos vertės	33580,6	7220	4,65
Praktiškai išmatuotos vertės	31920	7279	4,38

Iš lentelėje pateikiamų skaičių matoma, kad ilgiausio *BLE* scenarijaus teorinės sąnaudos turėjo didžiausia nuokrypi nuo praktiškai išmatuotų verčių. Apskaičiuota 38 ciklų trukmė yra 59 sekundėms trumpesnė, nei realiai išmatuota. Taip pat matoma, kad teoriškai apskaičiuota ciklų krūvio vertė yra 5,2 % didesnė, o vidutinės srovės vertė net 6,16 % didesnė.

4.2. ZigBee scenarijai

ZigBee scenarijai įgyvendina *DHT22* jutiklio duomenų perdavimą tarp dviejų įrenginių. Pirmojo scenarijaus metu atliekami žingsniai:

- *ZigBee* galinis įrenginys pabunda iš gilaus miego, atlieka aplinkos temperatūros ir drėgmės matavimą, prisijungia prie *ZigBee* koordinatoriaus, atlieka išmatuotų duomenų siuntimą koordinatoriui bei vėl pereina į gilų miegą. *ZigBee* galinis įrenginys išbūna gilaus miego režime tris minutes ir pabudęs vėl kartoja tuos pačius žingsnius.
- *ZigBee* koordinatorius yra nuolatos aktyvioje būsenoje, įrenginys laukia *ZigBee* galinių įrenginių prisijungimo bei priima jų siunčiamus duomenis, siunčia atsakymus.

ZigBee koordinatorius nuolatos yra aktyvioje būsenoje, jo energijos sąnaudos yra pastovios. Dėl šios priežasties toliau yra pateikiami tik galinių įrenginių sąnaudų skaičiavimai. Kaip ir *BLE* scenarijų įvertinimo metu, atliekamas žingsnių trukmių įvertinimas bei krūvio skaičiavimas naudojantis per protokolą tyrimą nustatytomis sąnaudų vertėmis. Krūvio verčių skaičiavimo metu naudojamos preliminaros žingsnių atlikimo trukmės. *ZigBee* komunikacijos protokolo ryšio funkcijos (prisijungimas, duomenų siuntimas bei gavimas, atsijungimas) yra atliekamos greičiau nei naudojant *BLE* komunikacijos protokolą.

Pirmojo scenarijaus įgyvendinimo metu naudota tokia konfigūracija:

- CPU veikia 160 MHz dažniu.
- Siųstuvo galia 9 dBm.

Žemiau pateikiama lentelė (**4.10 lentelė**), kurioje nurodyti scenarijaus įgyvendinimo metu atliekami žingsniai, jų preliminaros trukmės, vidutinės srovės sąnaudos bei krūvio skaičiavimo rezultatai:

4.10 lentelė. Pirmojo *ZigBee* scenarijaus žingsnių teoriniai skaičiavimai

Žingsnis	Veiksmas	Trukmė (s)	Srovė (mA)	Krūvis (mC)
1	Pabudimas iš miego	1	21,85	43,7
2	Matavimai	1	30,67	30,67
3	<i>ZigBee</i> prisijungimas	0,5	165,88	82,94
4	Duomenų siuntimas	0,5	110,28	55,14
5	<i>ZigBee</i> atsijungimas	0,5	147,82	73,91
6	Pasiruošimas miegui	1	44,26	44,26
7	Gilus miegas	180	1,25	225
Rezultatai	-	185	-	555,62

Žemiau pateikiama lentelė (**4.11 lentelė**), kurioje palyginamos teoriškai ir praktiškai gautos pirmojo *ZigBee* scenarijaus vieno ciklo laiko, krūvio ir vidutinės srovės vertės:

4.11 lentelė. Pirmojo *ZigBee* scenarijaus vieno ciklo sąnaudų palyginimas

	Pirmojo <i>ZigBee</i> scenarijus vieno ciklo sąnaudos		
	Krūvis (mC)	Trukmė (s)	Vidutinė srovė (mA)
Teorinės apskaičiuotos vertės	555,62	184,5	3,01
Praktiškai išmatuotos vertės	520	184	2,82

Pirmojo scenarijaus metu vienas ciklas trunka 3 minutes ir 4 sekundes. Atliktas ilgesnis scenarijaus sąnaudų matavimas. Įgyvendintas matavimas truko 9 minutes bei 16 sekundžių. Per šį laiko tarpą įvykta 3 pilni scenarijaus ciklai. Skaičiuojant teorinę sąnaudų prognozę atliktas vieno ciklo sąnaudų padauginimas iš atliktų ciklų skaičiaus. Rezultatai pateikiami lentelėje (**4.12 lentelė**):

4.12 lentelė. Pirmojo *ZigBee* scenarijaus sąnaudų palyginimas

	Pirmojo <i>ZigBee</i> scenarijus sąnaudos		
	Krūvis (mC)	Trukmė (s)	Vidutinė srovė (mA)
Teorinės apskaičiuotos vertės	1666,86	553,5	3,01
Praktiškai išmatuotos vertės	1570	556,2	2,81

Lentelėje matoma, kad pirmojo *ZigBee* scenarijaus (**14 priedas**) teorinės krūvio sąnaudos yra 6,17 % didesnės nei praktiškai išmatuotos vertės. Tuo tarpu teoriškai apskaičiuota vidutinė srovės vertė yra net 7,12 % didesnė nei praktiškai išmatuota.

Antrojo *ZigBee* scenarijaus atlikimo metu taip pat įgyvendinamas jutiklio temperatūros ir drėgmės duomenų perdavimą tarp dviejų įrenginių. Šis scenarijus skiriasi nuo pirmojo tuo, jog yra atliekamas grįžtamojo ryšio siuntimas iš *ZigBee* koordinatoriaus atgal į *ZigBee* galinį įrenginį. Antrojo scenarijaus žingsnių seka bei sąnaudos pateikiamos lentelėje (**4.13 lentelė**):

4.13 lentelė. Antrojo *ZigBee* scenarijaus žingsnių teoriniai skaičiavimai

Žingsnis	Veiksmas	Trukmė (s)	Srovė (mA)	Krūvis (mC)
1	Pabudimas iš miego	1	21,85	43,7
2	Matavimai	1	30,67	30,67
3	<i>ZigBee</i> prisijungimas	0,5	165,88	82,94
4	Duomenų siuntimas	0,5	110,28	55,14
5	Atsako gavimas	0,5	209,82	104,91

6	<i>ZigBee</i> atsijungimas	0,5	147,82	73,91
7	Pasiruošimas miegui	1	44,26	44,26
8	Gilus miegas	180	1,25	225
Rezultatai	-	185	-	660,53

Žemiau pateikiama lentelė (**4.14 lentelė**), kurioje palyginamos teoriškai ir praktiškai gautos antrojo *ZigBee* scenarijaus vieno ciklo laiko, krūvio ir vidutinės srovės vertės:

4.14 lentelė. Antrojo *ZigBee* scenarijaus vieno ciklo sąnaudų palyginimas

	Antrojo <i>ZigBee</i> scenarijus vieno ciklo sąnaudos		
	Krūvis (mC)	Trukmė (s)	Vidutinė srovė (mA)
Teorinės apskaičiuotos vertės	660,53	185	3,57
Praktiškai išmatuotos vertės	660	186,4	3,54

Antrojo scenarijaus atliko metu vienas ciklas trunka 3 minutes, 6 sekundes bei 4 milisekundes. Atliktas ilgesnis scenarijaus sąnaudų matavimas, kuris truko 59 minutes, 6 sekundes ir 4 milisekundes. Per šį laiko tarpą įvykta 19 pilnų scenarijaus ciklų. Rezultatai pateikiami lentelėje (**4.15 lentelė**):

4.15 lentelė. Antrojo *ZigBee* scenarijaus sąnaudų palyginimas

	Antrojo <i>ZigBee</i> scenarijus sąnaudos		
	Krūvis (mC)	Trukmė (s)	Vidutinė srovė (mA)
Teorinės apskaičiuotos vertės	12550,07	3515	3,57
Praktiškai išmatuotos vertės	13215	3546,4	3,72

Lentelėje matoma, kad antrojo *ZigBee* scenarijaus teorinės krūvio sąnaudos yra 5,03 % mažesnės nei praktiškai išmatuotos vertės. Teoriškai apskaičiuotos vidutinės srovės vertės yra 4,12 % mažesnės nei praktiškai išmatuotos vertės.

4.3. Skyriaus apibendrinimas ir išvados

Atlikus protokolų veikimo sąnaudų matavimą, įgyvendintas nustatytų reikšmių tikslumo įvertinimas remiantis realiais daiktų interneto scenarijais. Teorinių sąnaudų skaičiavimo metu naudotos preliminaros žingsnių trukmės.

Atlikti teoriniai ir praktiniai matavimai parodė, kad teoriniu būdu skaičiuotos *BLE* scenarijaus vieno ciklo krūvio sąnaudos yra vidutiniškai apie 7,18 % didesnės, lyginant su praktiškai išmatuotomis ciklo krūvio vertėmis. Apskaičiuotos ir praktiškai išmatuotos vidutinės srovės sąnaudų vertės pasižymi apie 7,47 % siekiančiais svyravimais. Teorinių skaičiavimų metu nustatytos *BLE* vieno ciklo trukmės demonstravo nuo 0,4 iki 1,6 sekundžių paklaidas.

Daugkartinių ciklų teorinių ir praktinių sąnaudų palyginimo metu matoma, kad *BLE* teorinės krūvio sąnaudos pasižymi vidutiniu 2,69 % nuokrypiu. Tuo tarpu vidutinės srovės sąnaudos demonstruoja 2,94 % nuokrypį. Praktiniai ilgalaikių scenarijų matavimai rodo nuo 3 iki 59 sekundžių ilgesnę veikimo trukmę lyginant su atlikta teorine scenarijų trukmės prognoze.

ZigBee scenarijų matavimuose teorinė vieno ciklo krūvio vertės paklaida yra apie 3,46 %. Vidutinių srovės sąnaudų paklaida siekia apie 3,78 %. Fiksuota ciklo trukmės paklaida svyruoja tarp 0,5 ir 1,4 sekundžių lyginant su praktiniais matavimais. Atliekant daugelio ciklų matavimus, *ZigBee* scenarijaus teoriniai krūvio skaičiavimai pasižymėjo vidutine 5,6 %, srovės sąnaudos – 5,57 % paklaidomis, o laiko paklaida svyravo nuo 2,7 iki 31,4 sekundžių.

Atlikus teorinius ir praktinius scenarijų matavimus, galima daryti šias išvadas:

- *BLE* scenarijų matavimuose stebimos mažesnės vidutinės procentinės paklaidos, kai yra įgyvendinami daugelį veikimo ciklų atliekantys ilgalaikiai daiktų interneto scenarijai. Vis dėlto vieno ciklo sąnaudų skaičiavimo metu gaunamos didesnės procentinės paklaidos. Galima teigti, jog ilgalaikis teorinis sąnaudų prognozavimas buvo tikslesnis lyginant su trumpalaikiu.
- *ZigBee* scenarijų matavimo atveju vieno ciklo rezultatai yra tikslesni – gaunama procentinė krūvio paklaida yra mažesnė (3,46 %) nei *BLE* scenarijų atveju (7,18 %). Taip pat gaunama mažesnė vidutinės srovės sąnaudų paklaida: *ZigBee* – 3,78 %, *BLE* – 7,47 %. Vis dėlto yra gaunama didesnė vidutinė paklaida, atliekant ilgalaikį daugelio ciklų matavimą. Matuojant ilgalaikį *ZigBee* scenarijaus veikimą, gaunamos teorinių ir praktinių skaičiavimų krūvio paklaidos yra didesnės (5,6 %) nei *BLE* ilgalaikių matavimų metu (2,69 %). Ta pat ir su vidutinių srovės sąnaudų paklaidomis: *ZigBee* – 5,57 %, *BLE* – 2,94 %.
- Abi technologijos parodė, jog trumpalaikės trukmės paklaidos (vieno ciklo metu) svyruoja sekundžių ribose, o daugkartinių ciklų atveju laiko paklaidos gali pasiekti žymiai didesnes vertes (net iki 59 sekundžių). Kuo ilgesnis yra daugkartinis ciklo matavimas, tuo didesnė tampa bendro laiko paklaida. Teoriniuose skaičiavimuose naudotos laiko trukmės praktinių matavimų metu kito priklausomai nuo realių matavimo sąlygų.
- Tikslus scenarijaus metu atliekamų žingsnių trukmių nustatymas leidžia apskaičiuoti tikslesnes sistemos srovės sąnaudas. Matavimuose naudoti ilgesni periodai įnešė papildomų paklaidų į atliktus skaičiavimus.

IŠVADOS IR DARBO REZULTATAI

Atlikus literatūros analizę nustatyta, kad kuriant baterijomis maitinamas daiktų interneto sistemas būtina įvertinti energijos sąnaudas ir jų įtaką įrenginio veikimo trukmei. Baterijomis maitinamų įrenginių gyvavimo laikas priklauso nuo taikomo veikimo scenarijaus, pasirinktos programinės ir aparatinės įrangos. Įrenginių gamintojų pateikiami oficialūs energijos sąnaudų rodikliai neįvertina realių sistemos eksploatacijos sąlygų, todėl siekiant tiksliai įvertinti baterijos veikimo laiką būtina atlikti individualius energijos sąnaudų matavimus realiomis darbo sąlygomis. *BLE* ir *ZigBee* technologijos dažnai lyginamos energijos efektyvumo požiūriu, tačiau jų energijos sąnaudos priklauso nuo kuriamos sistemos veikimo scenarijaus – duomenų perdavimo dažnio, tinklo topologijos ir ryšio trukmės. Apžvelgtų tyrimų rezultatai rodo, kad *BLE* protokolas užtikrina didelį duomenų pralaidumą bei mažas energijos sąnaudas, kai atliekamas retas ryšio vykdymas bei mažų duomenų paketų siuntimas. *ZigBee* protokolas pranašesnis kuriant didelio dydžių sistemas, kurioms reikalinga plečiamumo galimybė bei savireguliuojančio tinklo valdymo užtikrinimas. Išanalizuotuose straipsniuose dažniausiai siūloma energijos tausojimo metodika – riboti įrenginių darbo intervalai bei retas duomenų siuntimas. Darbe atlikti detalūs eksperimentiniai tyrimai suteikia galimybę tiksliau įvertinti energijos sąnaudas realiomis eksploatacijos sąlygomis.

Energijos sąnaudoms tirti naudoti *ESP32-C6* mikrovaldiklis bei *Power Profiler Kit II* srovės matavimo įranga. Naudojant *PPK2* atliktas *ESP32-C6* mikrovaldiklio energijos sąnaudų įvertinimas skirtingais veikimo režimais, o gautos vertės palygintos su oficialioje specifikacijoje pateikiamais duomenimis. Nors rezultatai rodo tas pačias sąnaudų tendencijas kaip ir specifikacija, išmatuotos srovės vertės yra didesnės nei nurodo mikrovaldiklio gamintojas. Rezultatų nesutapimas su deklaruojamomis specifikacijos vertėmis yra galimas dėl skirtingų matavimo sąlygų, programų konfigūracijų ar papildomų mikrovaldiklio srovės nuostolių.

Atlikti matavimai skirtingais ryšio protokolo veikimo etapais: tinklo skenavimo, prisijungimo, atsijungimo, duomenų siuntimo ir gavimo metu. Taip pat pritaikyti skirtingi ryšio parametrai: greitas, lėtas, aktyvus bei pasyvus skenavimas, prisijungimas prie tinklo su delsa, mažų bei didelių paketų siuntimas, visų ar tik kelių ryšio kanalų skenavimas, skirtingos reklamos proceso taktikos, duomenų siuntimas juos grupuojant. Srovės sąnaudų matavimo metu patvirtintas reto bei mažo dydžio duomenų paketų siuntimo energijos efektyvumas. Tyrimo metu nustatyta, jog *BLE* mažos apimties išplėstinė reklama leidžia sumažinti srovės sąnaudas 53 %, greitas pasyvus skenavimas generuoja 45 % mažesnes srovės sąnaudas nei kiti skenavimo režimai, lėtas prisijungimas prie *BLE* tinklo naudoja 24 % mažiau srovės nei greitas prisijungimas. *ZigBee* srovės sąnaudų matavimo metu nustatyta, jog pasyvaus tinklo skenavimo taktika, kaip ir ne visu 16 ryšio kanalų tikrinimas, generuoja 21 % mažesnes srovės sąnaudas lyginant su visų kanalų aktyvaus skenavimo atlikimu.

Atlikus *BLE* ir *ZigBee* ryšio protokolų sąnaudų tarpusavio palyginimą duomenų siuntimo metu, nustatyta, jog *ZigBee* generuoja mažesnes srovės sąnaudas esant žemesniems siųstuvo galios lygiams. Pavyzdžiui, esant 0 dBm galiai, *ZigBee* protokolas naudojo 89,09 mA, tuo tarpu *BLE* – 116,05 mA. Šie rezultatai leidžia daryti išvadą, jog *ZigBee* technologija yra tinkamesnis pasirinkimas baterijomis maitinamiems įrenginiams, kai kuriama sistema įgyvendina žemo galingumo bei reto duomenų siuntimo scenarijus.

Atliktas išmatuotų *BLE* ir *ZigBee* komunikacijos protokolų srovės sąnaudų tikslumo įvertinimas, pasitelkiant realius daiktų interneto veikimo scenarijus. Atliktas preliminarus scenarijų žingsnių trukmės nustatymas bei pasitelkiant tyrimo metu nustatytas srovės sąnaudas suskaičiuotas kiekvieno scenarijaus suvartotas elektros srovės vidutinės sąnaudos. Palyginus teorinius skaičiavimus su praktiškai išmatuotomis vertėmis matoma, kad *BLE* protokolo scenarijų sąnaudos skiriasi 2,94 %, o *ZigBee* – 5,57 %. Procentinės paklaidų vertės rodo, jog sistema elgiasi prognozuojamai, net jei yra nežymus nuokrypis nuo tyrimo matavimais pagrįstų teorinių skaičiavimų.

Siekiant sumažinti kuriamų daiktų interneto sistemų energijos sąnaudas, retesnis arba mažų duomenų paketų siuntimas nėra vienintelė galima energijos taupymo strategija. Energijos suvartojimą taip pat galima optimizuoti pasirenkant konkrečias komunikacijos protokolo konfigūracijas (pvz., paketų siuntimo galios lygis, tinklo skenavimo strategija, prisijungimo prie tinklo būdas, duomenų siuntimo metodai).

LITERATŪROS SĄRAŠAS

Aboshosha, A., Haggag, A., George, N., & Hamad, H. A. (2019). IoT-based data-driven predictive maintenance relying on fuzzy system and artificial neural networks. *Scientific Reports*, 13, 12186. Paimta 2025 m. April 30 d. iš <https://www.nature.com/articles/s41598-023-38887-z>

Aosong Electronics Co. Ltd. (be datos). *DHT22 (AM2302) digital-output relative humidity & temperature sensor*. Aosong Electronics Co., Ltd. Paimta 2025 m. April 30 d. iš <https://cdn.sparkfun.com/assets/f/7/d/9/c/DHT22.pdf>

Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, 54(15), 2787–2805. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>

Barros, T. G., & Teixeira, E. S. (2023). Common Requirements for IoT Platforms. *2023 IEEE 9th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*. IEEE. Paimta 2025 m. April 30 d. iš <https://ieeexplore.ieee.org/document/10539561>

Bluetooth Special Interest Group. (2024). *Bluetooth Core Specification (Version 6.0)*. Bluetooth SIG. Paimta 2025 m. April 30 d. iš <https://www.bluetooth.com/specifications/specs/core-specification-6-0/>

Bluetooth Special Interest Group. (be datos). *Bluetooth security*. Paimta 2025 m. April 30 d. iš <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/key-attributes/bluetooth-security/>

Bocca, A., Chen, Y., Macii, A., Macii, E., & Poncino, M. (2022). A Cost-Benefit Analysis of Batteries for Internet-of-Things Applications. *2022 AEIT International Annual Conference (AEIT)*. IEEE. Paimta 2025 m. April 30 d. iš <https://ieeexplore.ieee.org/document/9951716>

Chang, K.-H. (2015). Bluetooth: BLE solution for IoT? [Industry Perspectives]. *IEEE Wireless Communications*, 6-7. Paimta 2025 m. April 30 d. iš <https://ieeexplore.ieee.org/document/7000963>

Connectivity Standards Alliance. (2023). *ZigBee specification*. Connectivity Standards Alliance. Paimta 2025 m. April 30 d. iš <https://csa-iot.org/wp-content/uploads/2023/04/05-3474-23-csg-ZigBee-specification-compressed.pdf>

Dementyev, A., Hodges, S., Taylor, S., & Smith, J. (2013). Power Consumption Analysis of Bluetooth Low Energy, ZigBee and ANT Sensor Nodes in a Cyclic Sleep Scenario. *2013 IEEE International Wireless Symposium (IWS)*. IEEE. Paimta 2025 m. April 30 d. iš <https://ieeexplore.ieee.org/document/6616827>

Espressif Systems. (2025). *ESP32-C6 series datasheet*. Espressif Systems. Paimta 2025 m. April 30 d. iš https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/ESP32-C6_datasheet_en.pdf

Fox, J., Donnellan, A., & Doumen, L. (2019). The deployment of an IoT network infrastructure, as a localised regional service. *2019 IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)* (p. 319-324). IEEE. Paimta 2025 m. April 30 d. iš <https://ieeexplore.ieee.org/document/8767188>

Haque, K. F., Abdelgawad, A., & Yelamarthi, K. (2022). Comprehensive performance analysis of ZigBee communication: An experimental approach with XBee S2C module. *Sensors*. Paimta 2025 m. April 30 d. iš <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9105712/pdf/sensors-22-03245.pdf>

IEEE 802 Working Group. (2024). *IEEE 802 LAN/MAN Standards Committee*. Paimta 2025 m. April 30 d. iš IEEE 802: <https://www.ieee802.org/>

Jagmohandas, Q., & Rosado, L. S. (2021). On the prediction of battery powered IoT devices lifetime. *2021 Telecoms Conference (ConfTELE)*. IEEE. Paimta 2025 m. April 30 d. iš <https://ieeexplore.ieee.org/document/9435529>

Jolly, B. (2019). The Last Thing IoT Device Engineers Think About: End of Battery Life Behavior for IoT Devices. *2019 IEEE 62nd International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*. IEEE. Paimta 2025 m. April 30 d. iš <https://ieeexplore.ieee.org/document/8885125>

Jolly, B. (2021). IoT Device Battery Life: Go Slow for Fast Insights Into Challenging Conditions. *2021 IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*. IEEE. Paimta 2025 m. April 30 d. iš <https://ieeexplore.ieee.org/document/9531705>

Kamath, S., & Lindh, J. (2012). *Measuring Bluetooth Low Energy power consumption*. Texas Instruments. Nuskaityta iš <https://www.ti.com/lit/an/swra347a/swra347a.pdf>

Kim, C. (2012). *Measuring power consumption of CC2530 with Z-Stack*. Texas Instruments. Paimta 2025 m. April 30 d. iš <https://www.ti.com/lit/an/swra292/swra292.pdf>

Kouche, A. E., Rashwan, A. M., & Hassanein, H. (2013). Energy consumption measurements and reduction of ZigBee based wireless sensor networks. IEEE. Paimta 2025 m. April 30 d. iš <https://ieeexplore.ieee.org/document/6831130>

Kulkarni, P. (2024 m. January 1 d.). *The most important IoT stats for 2024*. Paimta 2025 m. April 30 d. iš Bytebeam: <https://blog.bytebeam.io/blog/the-most-important-iot-stats/>

Lee, J.-S., Dong, M.-F., & Sun, Y.-H. (2015). A preliminary study of low power wireless technologies: ZigBee and Bluetooth Low Energy. *2015 IEEE 10th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. IEEE. Paimta 2015 m. April 30 d. iš <https://ieeexplore.ieee.org/document/7334098>

Lindh, J., Lee, C., Hernes, M., & Johnsrud, S. (2019). *Measuring CC13xx and CC26xx current consumption*. Texas Instruments. Paimta 2025 m. April 30 d. iš <https://www.ti.com/lit/an/swra478d/swra478d.pdf>

National Intelligence Council. (2021). *Disruptive technologies: 2020 and beyond*. Washington, D.C.: Federation of American Scientists. Paimta 2025 m. April 30 d. iš <https://irp.fas.org/nic/disruptive.pdf>

Nordic Semiconductor ASA. (2022). *Power Profiler Kit II user guide*. Nordic Semiconductor ASA. Nuskaityta iš https://docs.nordicsemi.com/bundle/ug_PPK2/page/UG/ppk/PPK_user_guide_Intro.html

O'Leary, C., & Vakaloudis, A. (2019). A framework for rapid integration of IoT systems with industrial environments. *2019 IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)* (p. 1–5). Limerick, Ireland: IEEE. Paimta 2025 m. April 30 d. iš <https://ieeexplore.ieee.org/document/8767224>

Purnama, B., Sharipuddin, Kurniabudi, Budiarto, R., Stiawan, D., & Hanapi, D. (2018). Monitoring Connectivity of Internet of Things Device on ZigBee Protocol. *2018 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICECOS)*. IEEE. Paimta 2025 m. April 30 d. iš <https://ieeexplore.ieee.org/document/8605225>

Qadir, Z., Al-Turjman, F., Khan, M. A., & Nesimoglu, T. (2018). ZIGBEE Based Time and Energy Efficient Smart Parking System Using IOT. *2018 18th Mediterranean Microwave Symposium (MMS)*. IEEE. Paimta 2025 m. April 30 d. iš <https://ieeexplore.ieee.org/document/8611810>

Rajotte, K., Wooding, A., Li, J., McDonald, B. E., Huang, X., & Farrell, T. R. (2023). Power Consumption and Maximum Number of Supported Nodes for BLE Biosensor Applications. *2023 IEEE 19th International Conference on Body Sensor Networks (BSN)*. IEEE. Paimta 2025 m. April 30 d. iš <https://ieeexplore.ieee.org/document/10331462>

Sadowski, S. (2018). Comparison of RSSI-Based Indoor Localization for Smart Buildings with Internet of Things. *2018 IEEE 9th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)*. IEEE. Paimta 2025 m. April 30 d. iš <https://ieeexplore.ieee.org/document/8614863>

Shahzad, K., & Oelmann, B. (2014). A Comparative Study of In-sensor Processing vs. Raw Data Transmission using ZigBee, BLE and Wi-Fi for Data Intensive Monitoring Applications. *2014 11th International Symposium on Wireless Communications Systems (ISWCS)*. IEEE. Paimta 2025 m. April 30 d. iš <https://ieeexplore.ieee.org/document/6933409>

Sharbaf, M. (2022). IoT Driving New Business Model and IoT Security, Privacy, and Awareness Challenges. *ResearchGate*. Paimta 2025 m. April 30 d. iš <https://ieeexplore.ieee.org/document/10152044>

Siekkinen, M., Hienkari, M., Nurminen, J. K., & Nieminen, J. (2012). How low energy is Bluetooth Low Energy? Comparative measurements with ZigBee/802.15.4. *2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*. IEEE. Paimta 2025 m. April 30 d. iš <https://ieeexplore.ieee.org/document/6215496>

Silicon Laboratories Inc. (2021). *Bluetooth LE Fundamentals*. Silicon Laboratories Inc. Paimta 2025 m. April 30 d. iš <https://www.silabs.com/documents/public/user-guides/ug103-14-fundamentals-BLE.pdf>

Tei, R., Yamazawa, H., & Shimizu, T. (be datos). BLE power consumption estimation and its applications to smart manufacturing. *2015 54th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE)*. IEEE. Paimta 2025 m. April 30 d. iš <https://ieeexplore.ieee.org/document/7285303>

Treurniet, J. J., Sarkar, C., Prasad, R. V., & Boer, W. D. (2015). Energy Consumption and Latency in BLE Devices under Mutual Interference: An Experimental Study. *2015 3rd International Conference on Future Internet of Things and Cloud*. Rome: IEEE. Paimta 2025 m. April 30 d. iš <https://ieeexplore.ieee.org/document/7300836>

Zenil, M. S., López, A. A., Mendoza, G. R., Victoria, V. T., & Tapia, V. B. (2023). Evaluation of communication protocols for medical device interoperability: BLE and ZigBee. *2023 Mexican International Conference on Computer Science (ENC)*. IEEE. Paimta 2025 m. April 30 d. iš <https://ieeexplore.ieee.org/document/10508654>

Zhang, X., Wang, Y., Lin, C., Zhang, L., & Wang, W. (2022). LPWAN for IoT. IEEE. Paimta 2025 m. April 30 d. iš <https://ieeexplore.ieee.org/document/9753563>

PRIEDAI

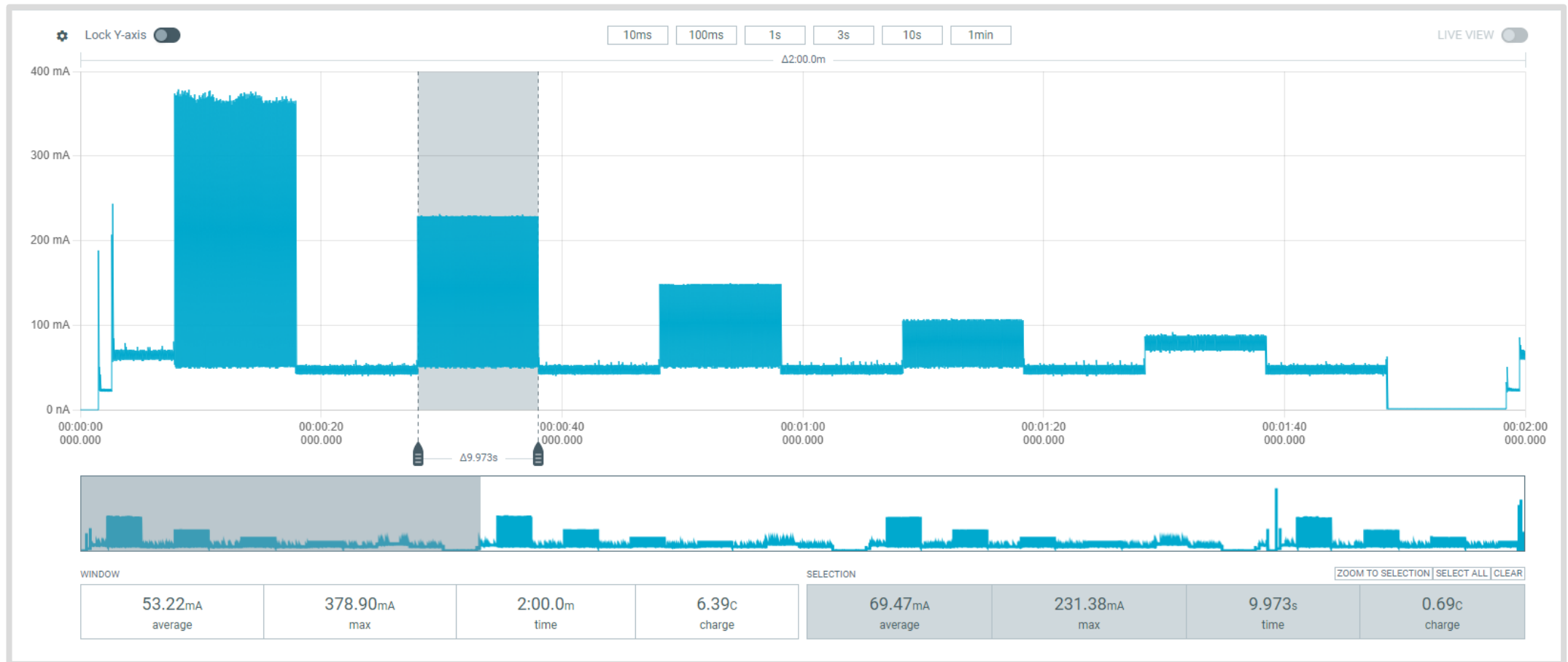
1 priedas. Programinės įrangos kodas

<https://github.com/panicball/LPWPAN-COMMUNICATION-STANDARDS-IN-THE-IOT>

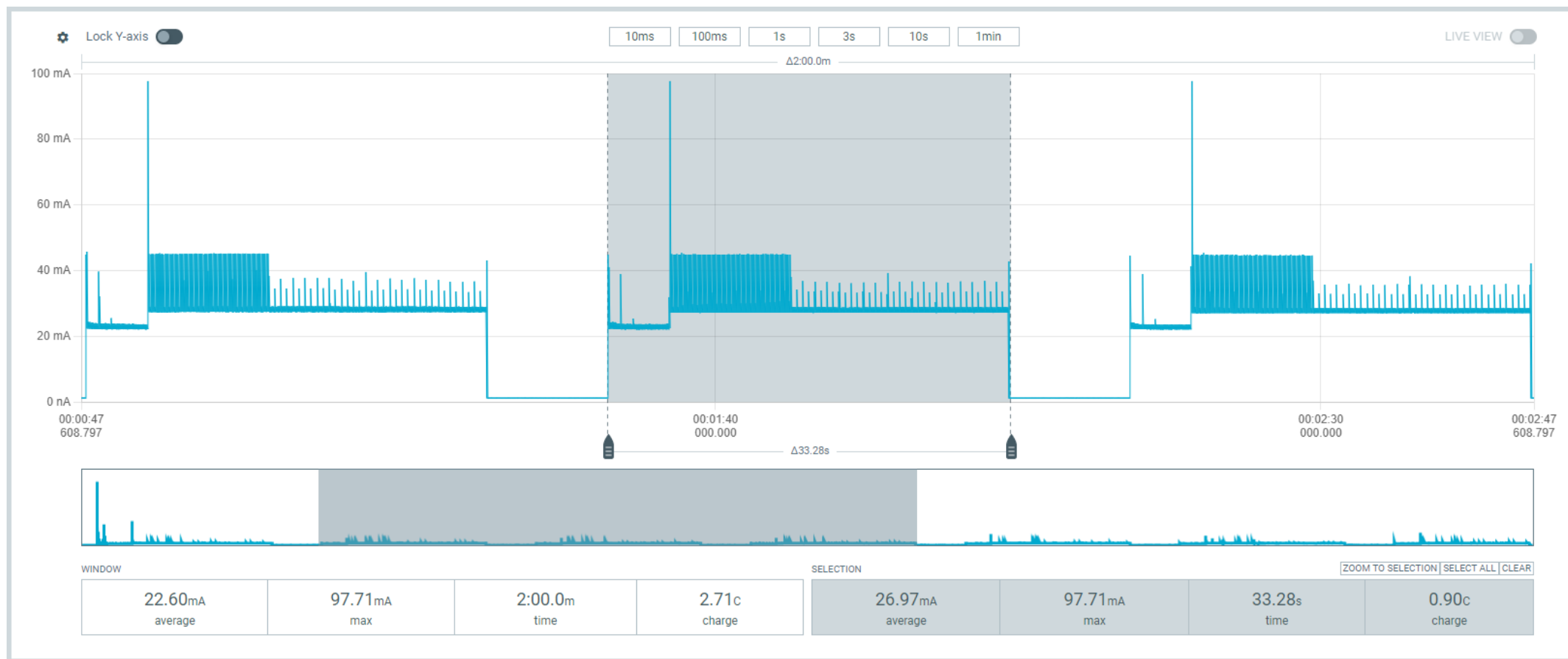
2 priedas. WiFi 802.11b srovės sąnaudų matavimo profilis



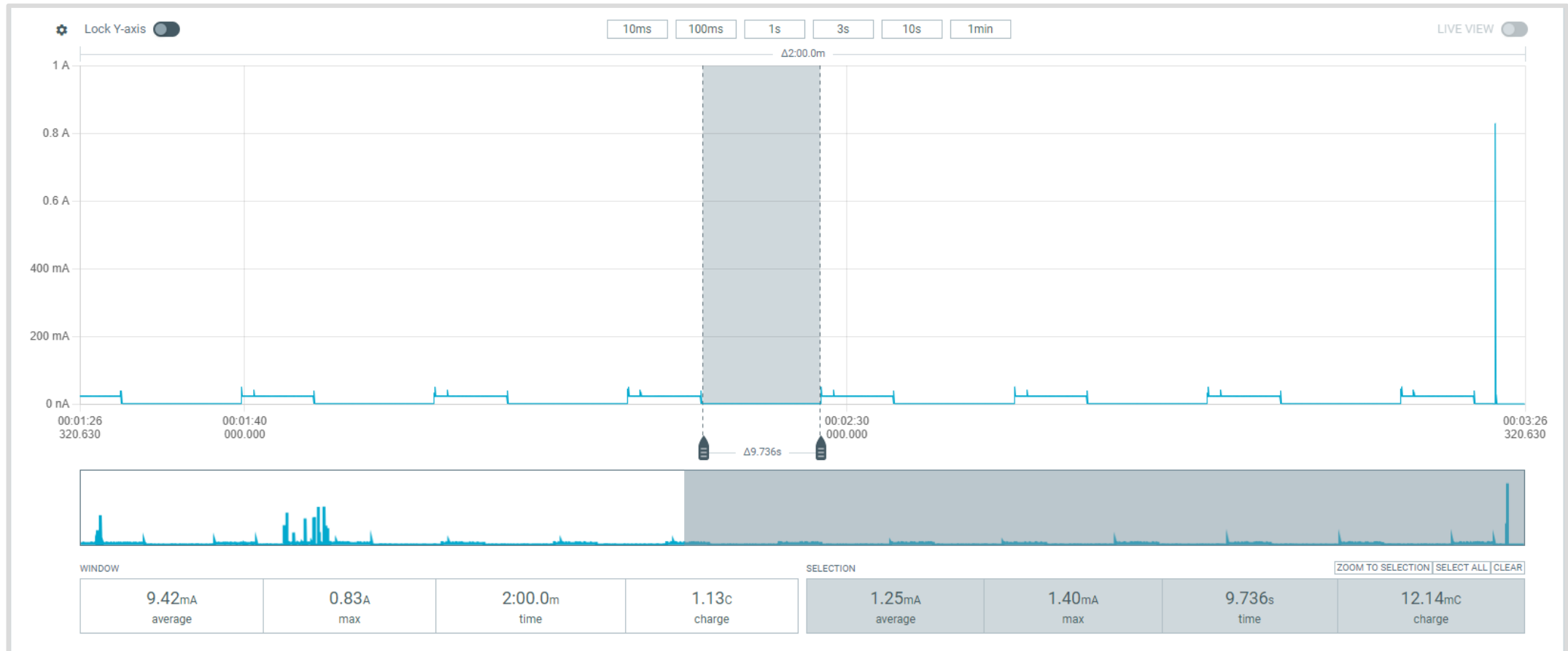
3 priedas. 802.15.4 srovės sąnaudų matavimo profilis (pažymėta teritorija – 12 dBm srovės sąnaudų testas)



4 priedas. Radijo miego režimo srovės sąnaudų matavimo profilis (160 MHz CPU dažnis, periferija išjungta)



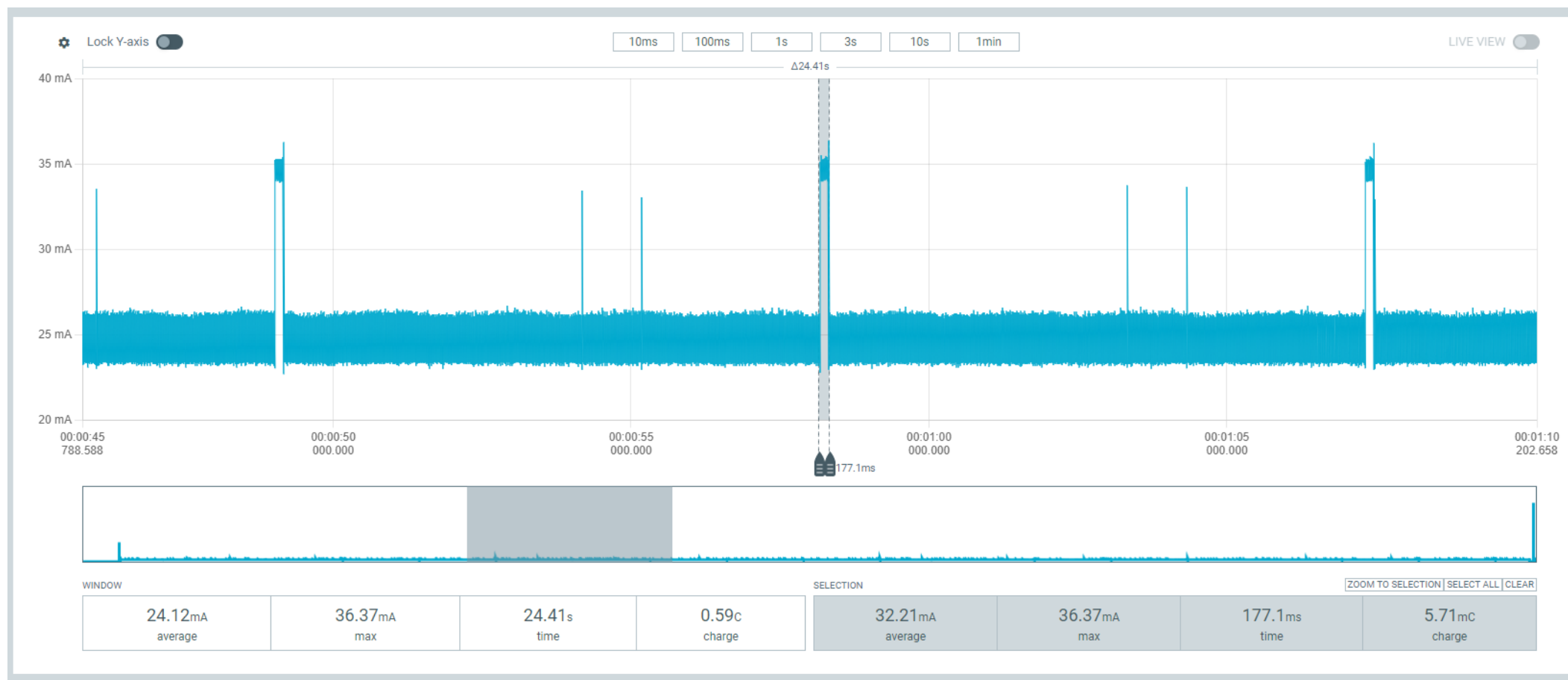
5 priedas. Gilaus miego srovės sąnaudų matavimo profilis



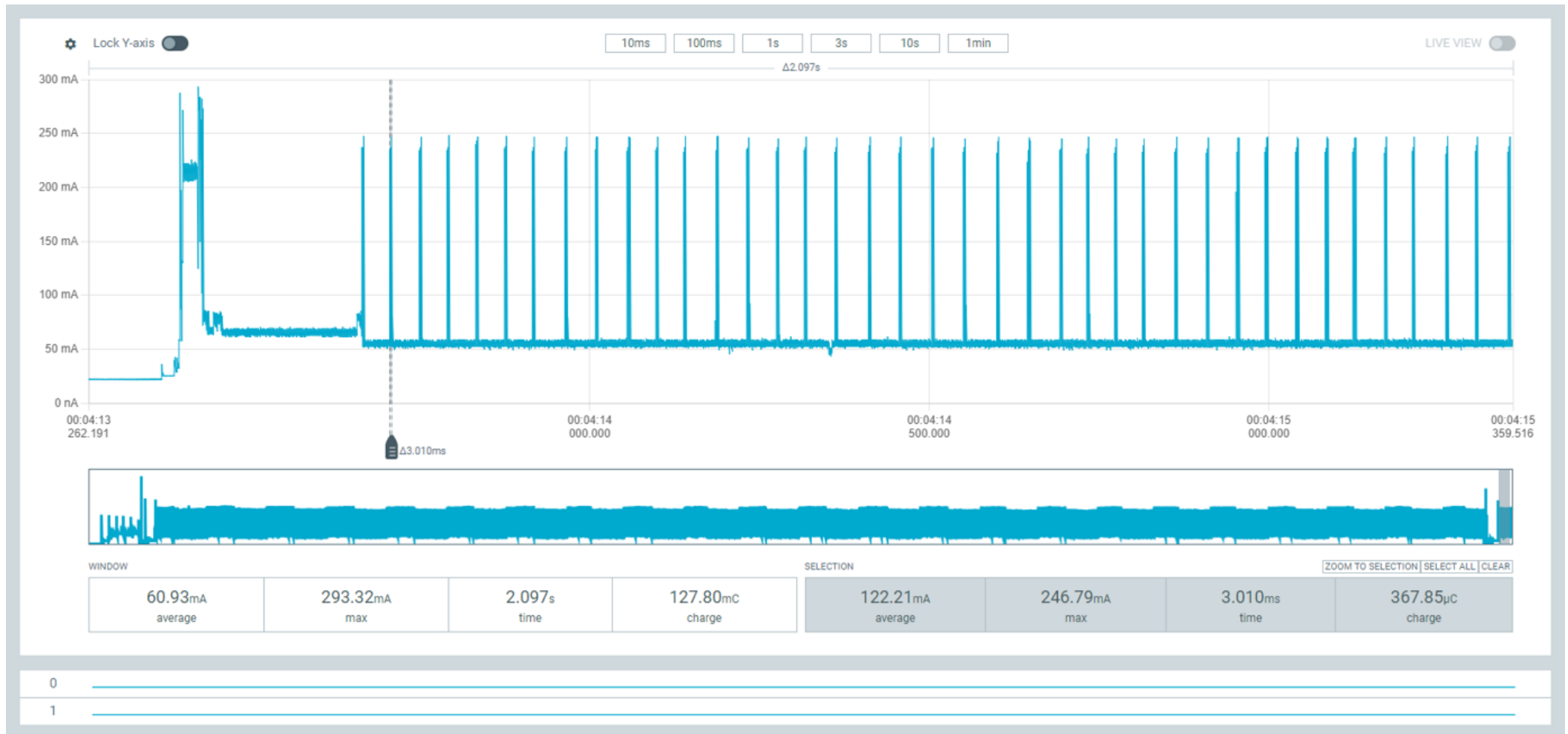
6 priedas. Lengvo miego srovės sąnaudų matavimo profilis



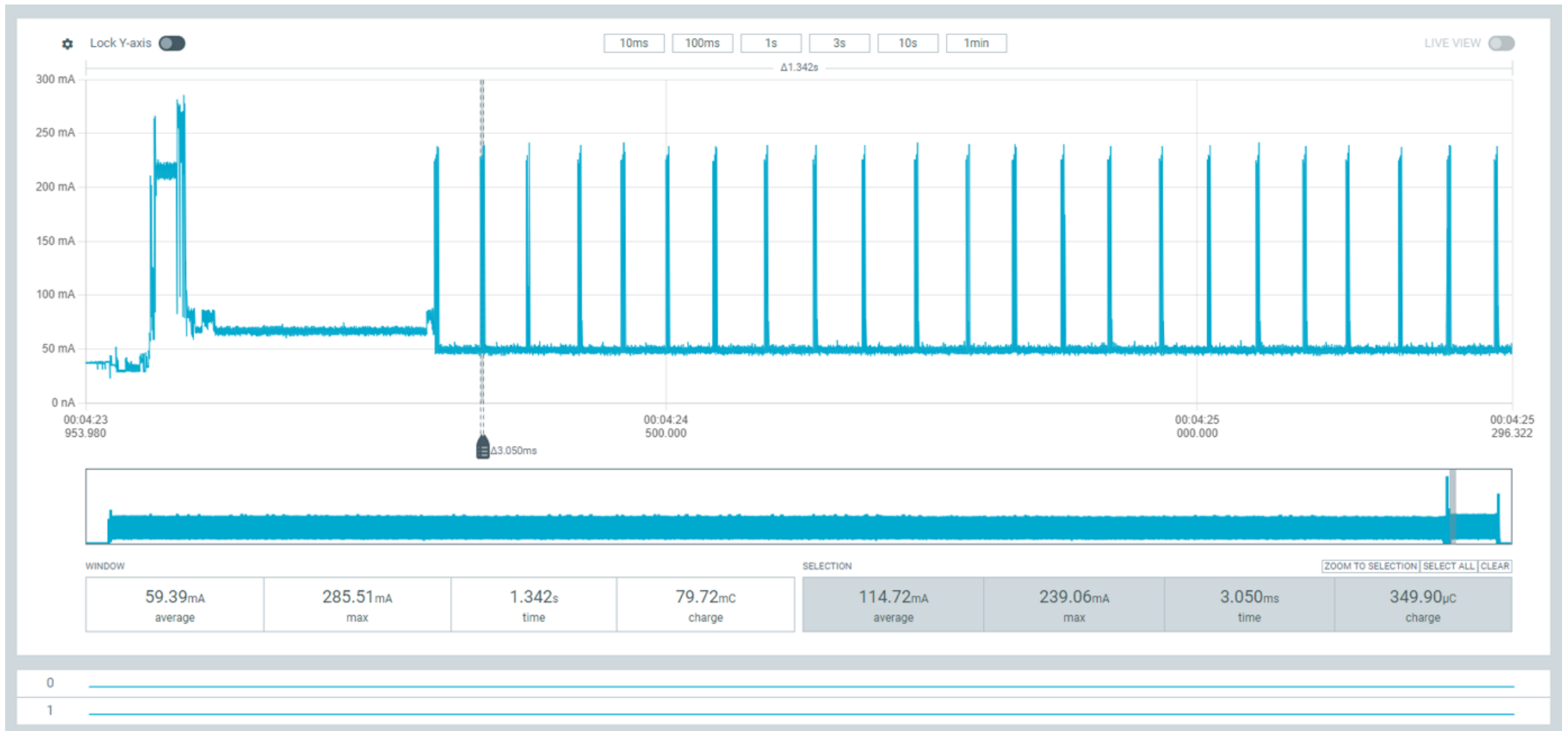
7 priedas. DHT22 jutiklio, prijungto prie ESP32-C6 mikrovaldiklio, srovės sąnaudų matavimo profilis



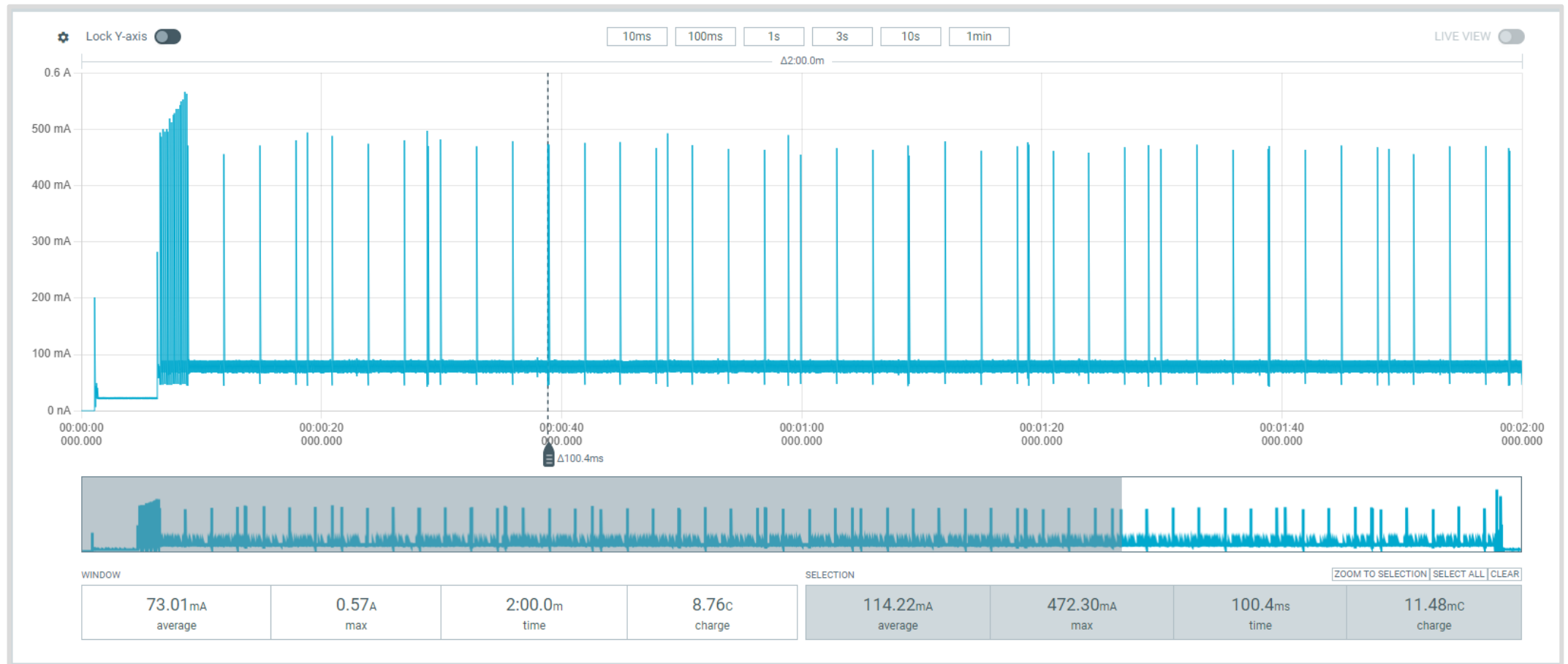
8 priedas. BLE siųstuvo, naudojančio 9 dBm siųstuvo galią, srovės sąnaudų matavimo profilis



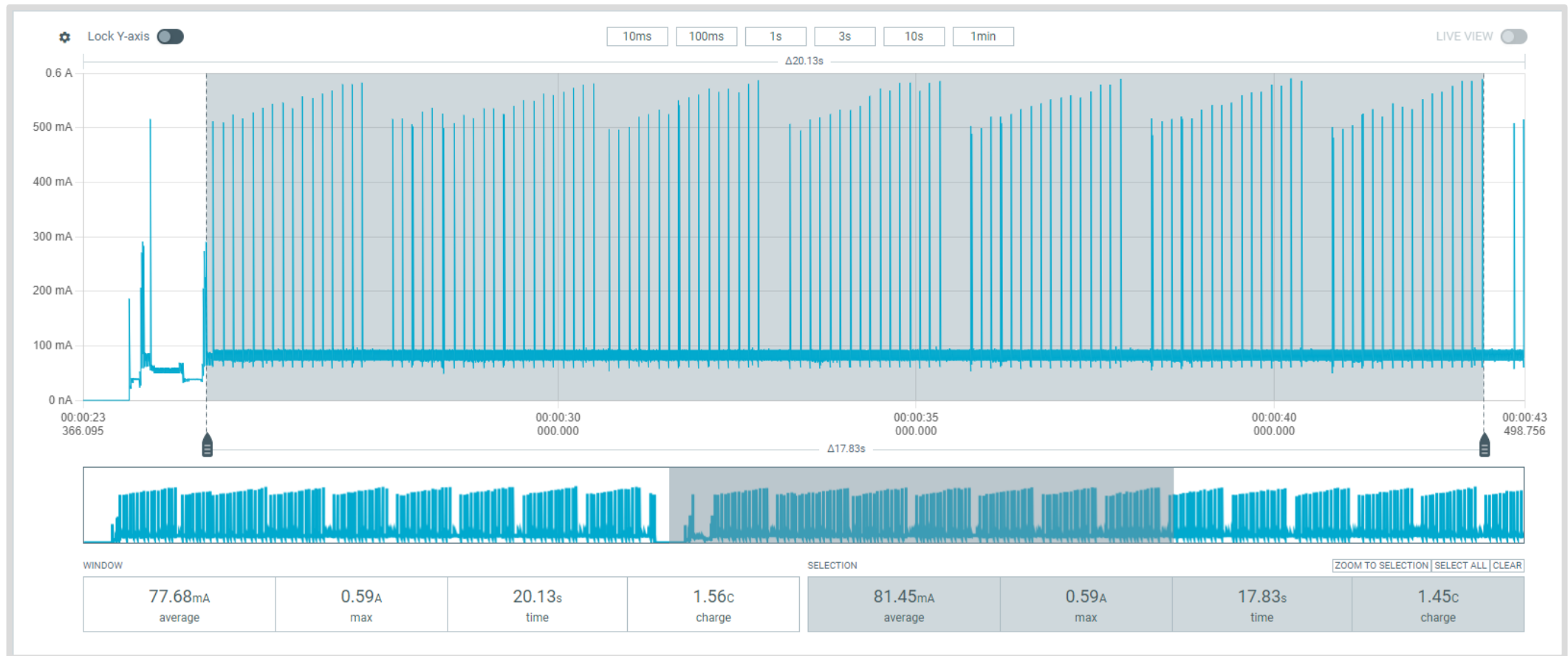
9 priedas. BLE siųstuvo atliekamo didelio duomenų paketo siuntimo srovės sąnaudų matavimo profilis



10 priedas. ZigBee siųstuvo, naudojančio 9 dBm siųstuvo galią, srovės sąnaudų matavimo profilis



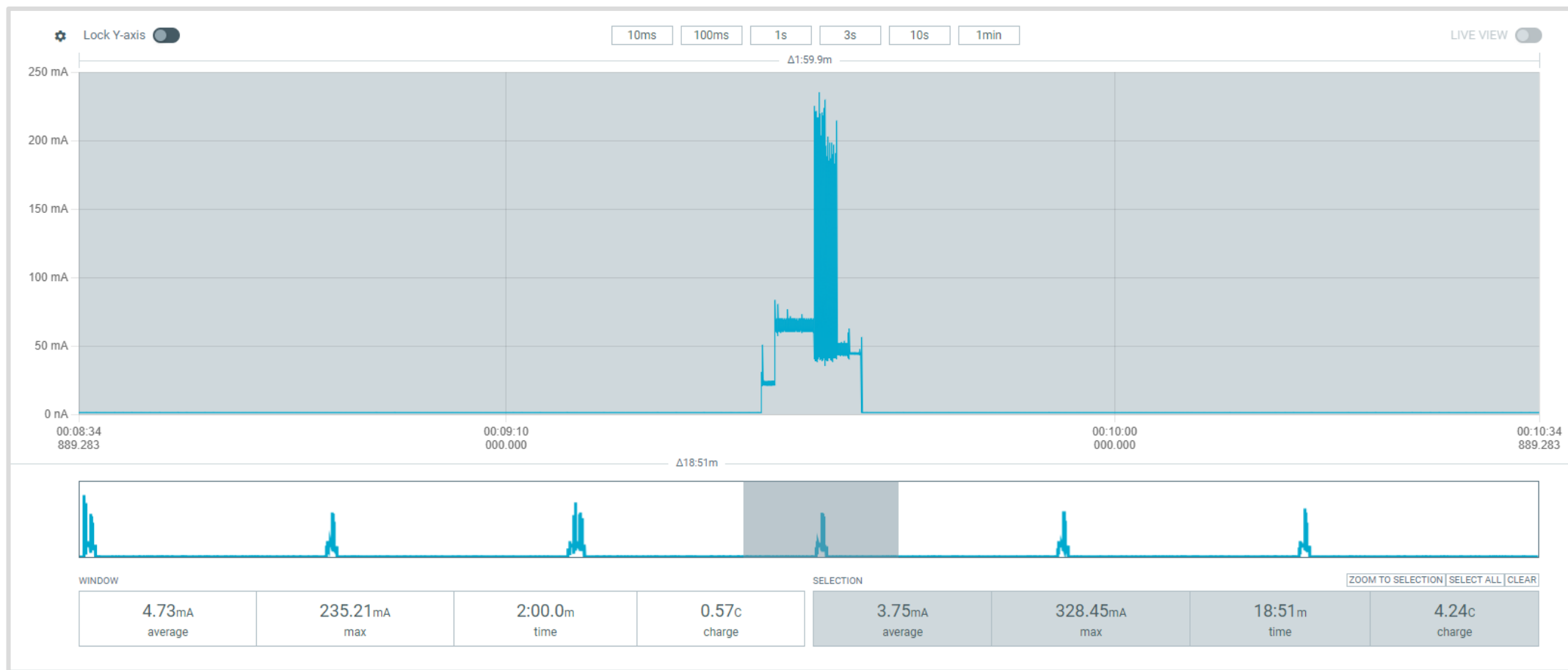
11 priedas. ZigBee kelių kanalų skenavimo srovės sąnaudų matavimo profilis



12 priedas. ZigBee mažo duomenų paketo siuntimo srovės sąnaudų matavimo profilis



13 priedas. Pirmojo BLE eksperimento srovės suvartojimo grafikas



14 priedas. Pirmojo ZigBee eksperimento srovės suvartojimo grafikas

