

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

Paulius Morkūnas

**BEVIELIŲ TEMPERATŪROS JUTIKLIŲ TINKLO
PROJEKTAVIMAS**

Baigiamasis bakalauro projektas

Vadovas

Prof. dr. Vytautas Markevičius

KAUNAS, 2015

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTRONIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

BEVIELIŲ TEMPERATŪROS JUTIKLIŲ TINKLO
PROJEKTAVIMAS

Baigiamasis bakalauro projektas
Elektronikos inžinerija (kodas 612H61002)

Vadovas

(parašas) Prof. dr. Vytautas Markevičius
(data)

Recenzentas

(parašas) Prof. dr. Darius Gailius
(data)

Projektą atliko

(parašas) Paulius Morkūnas
(data)

KAUNAS, 2015



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Paulius Morkūnas

(Studento vardas, pavardė)

Elektronikos inžinerija, 612H61002

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Bevielių temperatūros jutiklių tinklo projektavimas“
AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 ____ m. _____ d.
Kaunas

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

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Morkūnas, P. Bevielių temperatūros jutiklių tinklo projektavimas. Elektronikos inžinerijos baigiamasis projektas / vadovas Prof. dr. Vytautas Markevičius; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektronikos inžinerijos katedra.

Kaunas, 2015. 49 psl.

SANTRAUKA

Šio darbo metu buvo sukurta bei detaliai aprašyta sistema skirta nuotoliniam temperatūros matavimui naudojant bevielį ryšį. Darbe iškeliamą problema, bei suformuluojami pagrindiniai uždaviniai skirti problemos sprendimui:

- užtikrinti mažas bevielio jutiklio energijos sąnaudas, garantuojančias bent kelių metų darbą pasitelkus mobilius energijos šaltinius – baterijas ar akumuliatorių;
- parinkti bei realizuoti plačiai pritaikomą bei tikslų temperatūros daviklį;
- realizuoti galimybę nuskaityti įvairių tipų daviklius modifikuojant bevielio jutiklio mikrovaldiklio programą ir taip praplėsti tolesnio sistemos plėtojimo galimybes;
- užtikrinti maksimalų kuriamos sistemos ir kitų pramoninių įtaisų suderinamumą;
- sukurti veikiančią sistemos prototipą.

Atsižvelgiant į keliamus uždavinius atliekama analizė bei pateikiami sprendimai. Siekiant maksimaliai optimizuoti bevielio jutiklio energijos sąnaudas, pritaikomas specifinis duomenų apsikeitimo radijo ryšiu protokolas. Kuriant bevielį jutiklį pasirenkamas mažos galios radijo modulis bei valdiklis, suprojektuojama specifinė maitinimo schema užtikrinanti, jog maitinimo elementai būtų naudojami efektyviai. Temperatūros matavimui pasirenkama K tipo termopora bei 16 bitų analogas-kodas keitiklis. Termoporos kompensavimas atliekamas pasitelkiant analogas-kodas keitiklyje esantį temperatūros daviklį bei mikrovaldiklyje atliekant atitinkamus skaičiavimus. Šių skaičiavimų optimizavimui bei tikslumui skiriamas didelis dėmesys, panaudoti sprendimai pateikiami šiame darbe. Realizuota žvaigždės tipo tinklo topologija – duomenis iš jutiklių tiesiogiai priima koncentratorius. Siekiant aptarnauti didelį skaičių bevielių jutiklių, projektuojant koncentratorių pasirinktas našus 32 bitų mikrovaldiklis. Taip pat realizuotos USB, RS485 bei RS232 sąsajos, duomenų nuskaitymui pritaikytas pramoninis *Modbus* protokolas. Darbe pateikiami bevielio jutiklio bei koncentratoriaus programų algoritmai, schemas, sukurti prototipai. Aptariama sukurta programa skirta bevielių jutiklių sistemos konfigūravimui. Sukūrus prototipą atlikti temperatūros matavimo tikslumo bei vartojamos srovės tyrimai, pateikiami gauti rezultatai.

Reikšminiai žodžiai: temperatūros jutiklis, bevelis, pramoninis, termopora, Modbus, energijos taupymas.

Morkūnas, P. Design of wireless temperature sensor network. Electronics Engineering qualification degree / supervisor Prof. dr. Vytautas Markevičius; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Electronics engineering.

Kaunas, 2015. 49 psl.

SUMMARY

Main objective of this work is to design wireless temperature measurement system intended for industrial usage. System consists of data receiver and number of wireless temperature sensors. Main tasks and margins are formulated:

- wireless sensor has to use little energy and be capable of working autonomously for few years using battery;
- appropriate temperature sensor has to be selected which could measure wide temperature range and offer high accuracy;
- implement possibility to adapt different sensors only by modifying tiny portions of program code;
- ensure capability to connect this system to other multipurpose industrial devices;
- create working system prototype.

Considering these tasks analysis is done and decisions taken are provided. In order to reduce power consumption special wireless data exchange protocol is created. Wireless sensor consists of low power components and special power supply schematic which ensure effective usage of battery. For temperature measurement K type thermocouple is selected. Signal measurement is done using 16 bit analog-to-digital converter which has integrated temperature sensor used for thermocouple compensation. All calculations to avoid thermocouple non-linearity are done in microcontroller with highly optimized code. In this wireless temperature measurement system star network topology is used, thus measurement data is transmitted directly to data receiver. In order to maintain high number of wireless sensors, powerful 32 bit microcontroller is used. Data receiver has three *Modbus* protocol supporting communication interfaces – USB, RS232 and RS485. In this work program algorithms of wireless temperature sensor and data receiver are provided. Results of created system prototype are discussed as well.

Keywords: temperature sensor, wireless, industrial, thermocouple, Modbus, energy savings.

TURINYS

ĮVADAS	7
1. TECHNINIO (TECHNOLOGINIO) LYGIO ANALIZĖ	8
1.1 Kuriamos sistemos apžvalga	8
1.2 Egzistuojančios alternatyvos bei panašios paskirties prietaisai.....	8
2. TYRIMŲ DALIS	10
2.1 Radijo ryšio modulio parinkimas bei duomenų keitimosi protokolo sukūrimas.....	10
2.2 K tipo termoporos nuskaitymas bei kompensavimas	13
2.3 Sistemos topologija ir veikimo principas	17
3. PROJEKTINĖ DALIS	19
3.1 Bevielio jutiklio projektavimas	19
3.2 Bevielio jutiklio programinės įrangos kūrimas	22
3.3 Koncentratoriaus projektavimas	25
3.4 Koncentratoriaus programinės įrangos kūrimas	29
3.5 Programinės įrangos sistemos konfigūravimui kūrimas.....	34
4. REZULTATAI.....	37
5. IŠVADOS	41
INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS.....	42
PRIEDAI	44
P-1. Termoporos charakteristikos „tiesinimui“ bei kompensavimui skirti koeficientai.....	44
P-2. Bevielio jutiklio bei koncentratoriaus surinkimui reikalingų komponentų sąrašas	46
P-3. Suprojektuotos spausdintinio montažo plokštė „Altium Designer“ aplinkoje	48

IVADAS

Temperatūra – vienas svarbiausių parametru daugelyje technikos sričių. Siekiant optimizuoti įvairius pramonės procesus būtina išlaikyti nuolatinę temperatūros kontrolę, todėl natūralu, jog poreikis turėti tai užtikrinančią sistemą vis auga. Daugeliu atveju naudojamas fizinis temperatūros daviklių jungimas (naudojant kabelius) prie duomenis nuskaitančių bei apdorojančių sistemų, tačiau kai kuriais atvejais toks jungimas yra nepatogus arba apskritai neįmanomas. Priežastys gali būti labai įvairaus pobūdžio:

- sunaudojami dideli kiekiai kabelio bei reikalingos didelės išlaidos jo tiesimui, įrengti stacionarų tinklą tampa ekonomiškai nenaudinga;
- įvairios kliūtys ar kiti objektai, trukdantys nutiesti kabelius;
- daviklių montavimas ant besisukančių ar kitaip judančių objektų;
- panaudojus kabelius įdiegta temperatūros stebėjimo sistema praranda mobilumą, nes tampa sudėtinga operatyviai keisti daviklių išdėstymą;
- parinkus netinkamą kabelį ar nekorektiškai jį nutiesus gali pasireikšti pramoninėse patalpose būdingi elektromagnetiniai triukšmai ir sugadinti daviklių rodmenis.

Daugumą šių problemų galima pašalinti įdiegus bevielį temperatūros jutiklių tinklą, leidžiantį nuolat sekti temperatūrą bei jos pokyčius įvairiose sandėliavimo patalpose, konteineriuose, ertmėse. Tokia sistema nėra nauja koncepcija, rinkoje yra realizuotų alternatyvų, kurių dauguma palaiko tik tam tikro tipo daviklius bei yra komplektuojamos tik su gamintojų paruoštais priedais. Įmonė, kuriai kuriama ši sistema, tiekia įvairius daviklius skirtingoms pramonės sritims. Jų kuriami produktai apsiriboja davikliais, kuriems būtinas fizinis prijungimas prie duomenis nuskaitančių sistemų. Siekiant išlaikyti konkurenciją, įmonė belaides sistemas perka iš kitų gamintojų ir perparduoda. Tokios produkto kaina tampa didelė bei atsiranda daug problemų bandant priderinti lokaliai gaminamus daviklius. Taigi šio darbo tikslas sukurti pigią bei plačiai pritaikomą sistemą, galinčią registruoti pasirinktų tipų temperatūros daviklių rodmenis bei gautus duomenis bevieliu ryšiu perduoti į nutolusį kompiuterį ar kitą duomenis apdorojantį prietaisą. Kad būtų visapusiškai išnagrinėtas suformuluotas darbo tikslas keliami tokie uždaviniai:

- užtikrinti mažas bevielio jutiklio energijos sąnaudas, garantuojančias kelerių metų darbą pasitelkus mobilius energijos šaltinius – baterijas ar akumuliatorių;
- parinkti bei realizuoti plačiai pritaikomą bei tikslų temperatūros daviklį;
- realizuoti galimybę nuskaityti įvairių tipų daviklius modifikuojant bevielio jutiklio mikrovaldiklio programą ir taip praplėsti tolesnio sistemos plėtojimo galimybes;
- užtikrinti maksimalų kuriamos sistemos ir kitų pramoninių įtaisų suderinamumą;
- sukurti veikiančią sistemos prototipą.

1. TECHNINIO (TECHNOLOGINIO) LYGIO ANALIZĖ

1.1 Kuriamos sistemos apžvalga

Kuriamą sistemą sudaro bevieliai jutikliai, galintys nuskaityti skirtingų tipų daviklius, gautus matavimų duomenis apdoroti bei išsiųsti bevieliu ryšiu. Duomenis tiesiogiai priima koncentratorius, čia jie struktūrizuojami bei paruošiami tolesniam nuskaitymui, tačiau neinterpretuojami t. y. jokie sprendimai neatliekami. Bandytas kurti daugiafunkcinį koncentratorių pareikalautų labai daug žmogiškųjų išteklių, tad nuspręsta orientotis į vieną pagrindinę funkciją – prieigos prie nutolusių daviklių matavimo rezultatų užtikrinimą. Prieiga prie duomenų įgalinama naudojant fizines sąsajas bei *Modbus* duomenų apsikeitimo protokolą, kuris yra suderinamas su dauguma pramoninių prietaisų. Duomenis nuskaitančių prietaisų funkcijos gali būti labai įvairios – nuo paprasto duomenų kaupimo bei vaizdavimo iki duomenų interpretavimo bei procesų automatizavimo. Egzistuoja nemažai daugiafunkcinių pramoninių prietaisų, kuriuos galima sukongigūruoti pagal poreikį atitinkamo uždavinio sprendimui. Taigi koncentratorius, kombinuojamas su įvairių tipų duomenis nuskaitančiais bei apdorojančiais pramoniniais įrenginiais, įgauna labai daug taikymo galimybių. Bevieliai jutikliai orientuojami į maitinimą iš baigtinių energijos šaltinių, tad kuriant juos stengiamasi maksimaliai sumažinti energijos sąnaudas. Tai pasiekama naudojant mažai energijos vartojančius komponentus bei sukuriant specifinį duomenų apsikeitimo bevieliu ryšiu protokolą, užtikrinantį, jog didžiąją laiko dalį bevelis jutiklis praleistų veikdamas miego režime. Įvertinant galimą maitinimo elementų įtampos nukritimą imamasi specializuotos maitinimo schemos kūrimo. Ji užtikrina reikalingos maitinimo įtampos išlaikymą net esant gerokai mažesnei šaltinio įtampai. Tokiu būdu užtikrinamas stabilus bevelių jutiklių darbas net esant labai išsikrovusiems maitinimo elementams bei veikimo laiko pailginimas.

1.2 Egzistuojančios alternatyvos bei panašios paskirties prietaisai

Apžvelgus rinkoje egzistuojančias alternatyvas buvo išskirtos kelios panašaus pobūdžio sistemos, kurias verta aptarti plačiau.

Kompanija OleumTech gamina plataus spektro pramoninius bevelius jutiklius [1]. Jų siūlomą sistemą sudaro bevieliai jutikliai bei koncentratorius. Numatomas veikimo nuotolis esant tiesioginiam matomumui siekia 1,6 km. Sistema veikia 902-928 MHz dažnių diapazone, kuris yra licencijuotas Europos sąjungos šalyse. Esant poreikiui sistema prieinama ir su alternatyviu 2.4 GHz dažniu, tačiau gerokai mažesniu veikimo nuotoliu. Priklausomai nuo naudojimo galimas veikimo laikas gali siekti 10 metų. Galimi dviejų pavidalų bevieliai jutikliai – su LCD (angl. *Liquid-crystal display*) ir be, komplektuojami su įvairių tipų davikliais. Siūlomos komplektacijos:

- analoginių signalų siųstuvas – nuskaitomi 1-4 analoginiai įėjimai, galintys registruoti signalą 0-5 V intervale. Naudojamo analogas-kodas keitiklio skiriamoji geba yra 24 bitai;
- diskretinių signalų siųstuvas su palaikomais dviem diskretiniais įėjimais;
- skysčio lygio aptikimo siųstuvas su galimomis įvairaus montavimo komplektacijomis;
- slėgio matavimo siųstuvas;
- temperatūros siųstuvas su RTD (angl. *Resistance temperature detector*) tipo davikliu arba K tipo termopora.

Galimi kelių tipų duomenų koncentраторiai, besiskiriantys funkcionalumu. Atsižvelgiant į paskirtį ir galimybes artimiausias kuriamai sistemai yra DH2 bevielių duomenų imtuvas. Pagrindinė jo funkcija – kaupti duomenis iš bevielių jutiklių. Palaikomi RS485 bei RS232 nuoseklieji prievadai bei naudojamas *Modbus* komunikavimo protokolas. DH2 gali susijungti su kitais tokio tipo duomenų imtuvais bei dalintis sukauptais duomenimis. Naudojant šią funkciją galima sukurti platų tinklą ir duomenis pasiekti iš bet kurio šį tinklą sudarančio mazgo. Šio produkto funkcijos bei specifikacijos yra patrauklios, tačiau kaina nepriimtina didelė.

Kompanija Nokeval gamina plataus spektro pramoninius bevielius jutiklius. Atsižvelgiant į darbo užduotį randamas panašiausias funkcijas bei charakteristikas turinti sistema – pasirenkamas FTR264 keturių kanalų bevielis jutiklis naudojantis termoporas [2] bei FTR970B duomenų koncentраторius [3]. Sistema dirba 433 MHz nelicencijuojame dažnių diapazone, maksimalus pasiekiamas veikimo atstumas siekia 100 metrų esant tiesioginiam matomumui. Palaikomas duomenų persiuntimas naudojant tarpinius mazgus, taip praplečiant veikimo nuotolį. Periodinių matavimų intervalas gali būti keičiamas nuo 5 sekundžių iki 5 minučių. Veikimo laikas siekia 1,5 metų esant 90 sekundžių matavimo periodui. Koncentраторius FTR970B palaiko tris sąsajas: USB, RS232, RS485. Duomenų mainams per šias sąsajas naudojamas Nokeval SCL protokolas, dažnai nesuderinamas su kitais pramoniniais prietaisais. Dėl šios priežasties šis produktas daugeliu atveju yra nepatogus naudojimui.

2. TYRIMŲ DALIS

2.1 Radijo ryšio modulio parinkimas bei duomenų keitimosi protokolo sukūrimas

Rinkoje egzistuoja įvairių radijo modulių palaikančių skirtingus duomenų apsikeitimo protokolus, tačiau kalbant apie bevielį jutiklių realizavimą plačiausiai sutinkami ZigBee, Bluetooth ir ANT ryšio tipai. Egzistuoja skirtingos Bluetooth kartos bei jų versijos skirtos specifinių uždavinių sprendimui. Atsižvelgiant į mažas energijos sąnaudas, kuriamai bevielį jutiklių sistemai aktualiausia *Bluetooth v4.0 low energy (Bluetooth SMART)* versija. Detalesnės šių ryšio tipų specifikacijos pateiktos 2.1 lentelėje [4].

2.1 lentelė

Ryšio technologijų palyginimas

	ANT	Bluetooth SMART	ZigBee
Galimos tinklo sudarymo technologijos	Taškas-taškas (angl. <i>Point-to-Point</i>), žvaigždės (angl. <i>Star</i>), medžio (angl. <i>Tree</i>), tinklo (angl. <i>Mesh</i>)	Taškas-taškas (angl. <i>Point-to-Point</i>), žvaigždės (angl. <i>Star</i>)	Taškas-taškas (angl. <i>Point-to-Point</i>), žvaigždės (angl. <i>Star</i>), medžio (angl. <i>Tree</i>) ir tinklo, (angl. <i>Mesh</i>)
Atstumas	Iki 30 metrų	Iki 100 metrų	Iki 100 metrų
Maksimalus duomenų srautas	1 Mbit/s	1 Mbit/s	20 kbit/s naudojant 868 MHz dažnį 40 kbit/s naudojant 915 MHz dažnį 250 kbit/s naudojant 2,4 GHz dažnį

Nepaisant pateiktų ANT, Bluetooth Low Energy bei ZigBee charakteristikų, tenkinančių keliamo uždavinio reikalavimus, buvo nuspręsta modifikuoti anksčiau sukurtą bei projekte „Mobiliumis technologijomis grįstas įrankis mechaninio apdirbimo įrangai“ panaudotą duomenų apsikeitimo protokolą. Atsižvelgiant į tai, jog minėtame projekte kurtas prietaisas energiją gaudavo iš mechaninio apdirbimo įrangos vibracijų bei radijo ryšiu turėdavo siųsti duomenis, suvartojamos energijos mažinimui buvo skirtas ypatingai didelis dėmesys. Dėl ribotų energijos išteklių nuolatinio ryšio palaikymas tampo neįmanomas, dėl šios priežasties buvo svarstoma periodinė ryšio užmezgimo galimybė. Remiantis tyrimais atliktais ir aprašytais straipsnyje „Power Consumption Analysis of Bluetooth Low Energy, ZigBee and ANT Sensor Nodes in a Cyclic Sleep Scenario“ [5] buvo padaryta išvada, jog ANT, Bluetooth SMART ir ZigBee ryšio technologijos nėra optimalios tokio tipo prietaisui dėl ilgai trunkančio ryšio užmezgimo. Praktiškai gauti rezultatai teigia, jog *Bluetooth Low Energy* ryšio atnaujinimas užtrunka 1150 ms, *ZigBee* – 250 ms, *ANT* – 930 ms. Sukurtame duomenų apsikeitimo protokole ryšio užmezgimas nevykdomas, tad duomenys išsiunčiami apytikriai per 2 ms, taip sutaupoma didelė dalis energijos. Bevielyje jutiklyje taip pat labai svarbu pasiekti kuo geriau optimizuotas energijos sąnaudas, tačiau būtina užtikrinti, jog koncentratorius gautų siunčiamus duomenis. Dėl šios priežasties duomenų

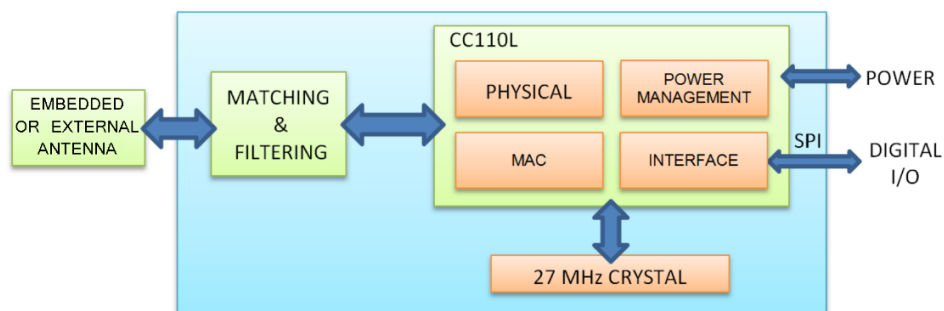
apsikeitimo protokole įvedama modifikacija – grįžtamasis ryšys, kuris bus plačiau aptariamas sekančiuose skyriuose.

Kadangi sudėtingos duomenų apsikeitimo technologijos kaip Bluetooth, ZigBee ar ANT palaikymas nėra reikalingas, paprastas, tačiau energetiškai efektyvus radijo modulis yra pakankamas. Taigi bevielių duomenų perdavimui buvo pasirinktas kompanijos „Anaren“ gaminamas A110LR09 radijo modulis, galintis dirbti 868-870 MHz arba 902-928 MHz dažnių diapazone. Galimos dvi modulario atmainos: A110LR09A – su integruota antena bei A110LR09C – su jungiama išorine antena. Šios radijo modulario atmainos pateiktos 2.1 paveiksle. Šių modulių bazę sudaro kompanijos „Texas Instruments“ gaminamas CC110L integruotas siųstuvai-imtuvai bei jo funkcionavimui reikalingi analoginiai elementai. A110LR09 blokinė schema pateikta 2.2 paveiksle. Šis radijo modulis yra CC1101 atmaina, pasižyminti mažesne kaina bei funkcionalumu. Teorinis CC110L duomenų perdavimo greitis gali būti keičiamas nuo 0,6 kbps iki 600 kbps. Atsižvelgiant į užduotį, pasirinktas radijo modulis pilnai tenkina keliamus duomenų spartos reikalavimus. A110LR09 būdingos energijos sąnaudos įvairiuose režimuose detalizuotos 2.3 paveiksle. Kitos svarbios šio radijo modulario savybės [6]:

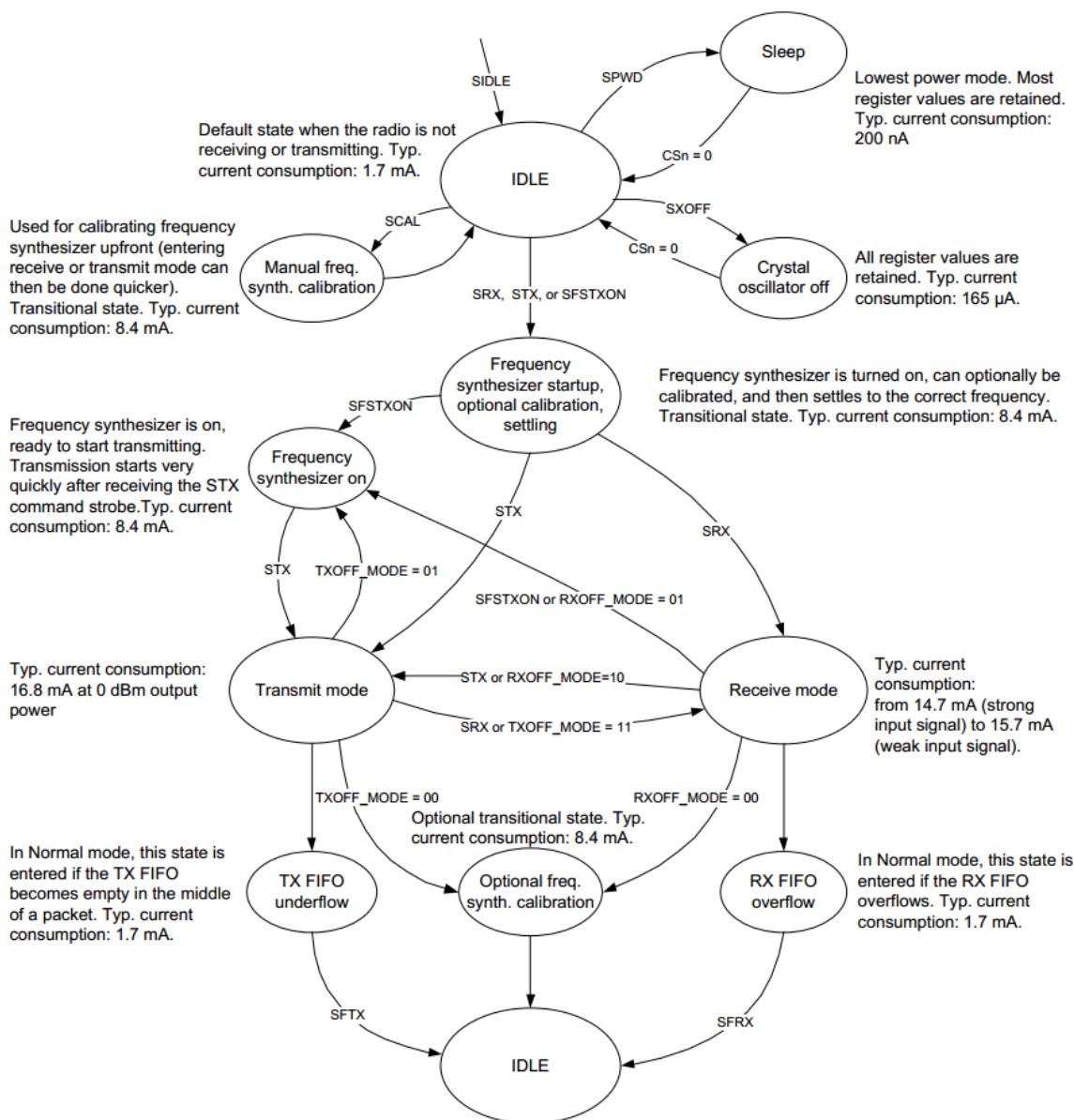
- skaitmeninis RSSI (angl. *Received signal strength indication*) išėjimas;
- programuojama siuntimo galia iki +12 dBm;
- didelis jautrumas (–112 dBm prie 1,2 kBaud su 1 % paketo klaidos tikimybe);
- SPI (angl. *Serial Peripheral Interface*) sąsaja;
- greitas pabudimas iš miego režimo trunkantis 240 μs;
- darbinė temperatūra nuo -40 °C iki +85 °C;
- maitinimo įtampa nuo 1,8 V iki 3,6 V;
- automatinis CRC (angl. *Cyclic redundancy check*) tikrinimas.



2.1 pav. Kompanijos „Anaren“ gaminami radijo moduliai A110LR09A ir A110LR09C [6]



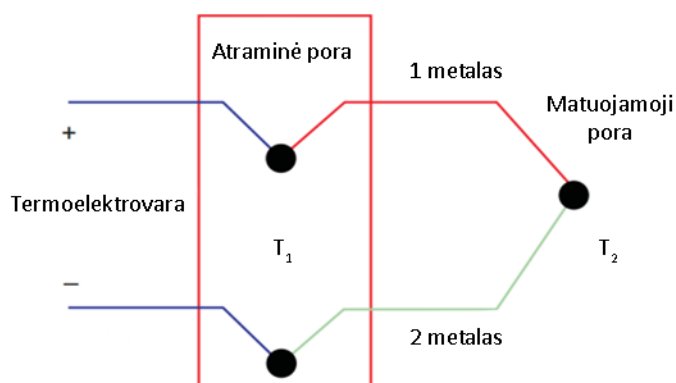
2.2 pav. A110LR09 blokinė schema [6]



2.3 pav. Detalizuota A110LR09 modulio energijos sąnaudų įvairiuose režimuose schema [7]

2.2 K tipo termoporos nuskaitymas bei kompensavimas

Siekiant realizuoti galimybę temperatūrą matuoti plačiame temperatūrų diapazone bei vertinant bevielių temperatūros jutiklių tinklo užsakovų poreikį buvo pasirinkta K tipo termopora. Ji yra pigi bei plačiai taikoma, tinkama daugelio pramonėje kylančių uždavinių sprendimui. Termoporos veikimas paremtas Zėbeko (T. J. Seebeck) efektu. Šis efektas pastebimas kai lygiagrečiai sujungiamos dviejų skirtingų laidininkų poros ir jos yra talpinamos skirtingose temperatūrose, tokiu atveju uždaroje grandinėje yra sukuriama termoelektrovaros jėga. Norint sužinoti šių temperatūrų skirtumą, reikia įvertinti atviroje atraminėje sandūroje susidarančią termoelektrovaros įtampą bei toje vietoje esančią temperatūrą. Ši sandūra atitinka vietą, kurioje termoporos laidai jungiasi su vieno tipo laidininku. Pagal žinomą termoporos charakteristiką suskaičiuojamas temperatūrų skirtumas tarp atraminio ir matuojamojo termoporos galo. Suskaičiuotas temperatūros skirtumas sumuojamas su išmatuotąja atraminėje termoporos gale ir taip gaunama tikslinės poros temperatūra. Termoporos struktūrinė schema pateikta 2.4 paveiksle.



2.4 pav. Termoporos struktūrinė schema [8]

Termoporos atraminėje poroje susidariusios termoelektrovaros įtampos matavimui pasirinktas ADS1118 16 bitų raiškos „Delta-Sigma“ tipo analogas-kodas keitiklis (angl. *Analog-to-digital converter*). Šis keitiklis pasižymi mažomis energijos sąnaudomis bei maža maitinimo įtampa – nuo 2 V iki 5,5 V. Šis keitiklis turi 4 konfigūruojamus matavimo kanalus bei programuojamą stiprinimą, tad gali būti panaudotas ir kito tipo davikliams nuskaityti [9]. Tam, kad išreikštume matuojamą įtampą šio keitiklio kodu toliau taikomi tokie skaičiavimai. Žinome, jog nuo 0 °C iki 1000 °C K tipo termoporos išėjimo įtampa apytikriai atitinka $40 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ santykį. Nustačius maksimalų 16 kartų stiprinimą gauname, jog ADS1118 įėjimo diapazonas gali kisti nuo -256 mV iki 256 mV. Atsižvelgiant į tai, jog turima keitiklio raišką yra 16 bitų, nustatome jog $\text{LSB} = 7,8125 \mu\text{V}$ (angl. *LSB - least significant bit*). Taigi apytikris konvertavimo koeficientas gaunamas $1^\circ\text{C} = 40/7,8125 = 5,12 \text{ LSB}$ [10]. Kadangi K tipo termoporos įtampos priklausomybė

nuo temperatūros yra netiesiška, reikalingas šios charakteristikos „ištiesinimas“. Ši priklausomybė pateikta 2.5 paveiksle. Pasirinktas aproksimavimo tiesėmis metodas, kadangi toks skaičiavimas mikrovaldiklyje yra atliekamas greičiau nei aukšto laipsnio polinomų skaičiavimas. „Tiesinimas“ atliekamas nuo -200 °C iki 1370 °C. Atsižvelgus į tai, jog didžiausias termoporos netiesiškumas pastebimas esant žemoms temperatūroms, šios dalies aproksimacija tiesėmis buvo atlikta skaidant charakteristiką į mažesnius intervalus nei aukštesnėse temperatūrose. Termoporos charakteristikos „tiesinimas“ buvo atliktas naudojant „Excel 2013“ programinį paketą, kurio aplinkoje atliktas koeficientų a ir b skaičiavimas. Tiesėmis aproksimuota K tipo termoporos charakteristika pateikta 2.6 paveiksle. Gauti slankiojo kabelio koeficientai naudojami temperatūros apskaičiavimui pagal 2.1 formulę.

$$temp = a \cdot code_{ADC} + b; \quad 2.1$$

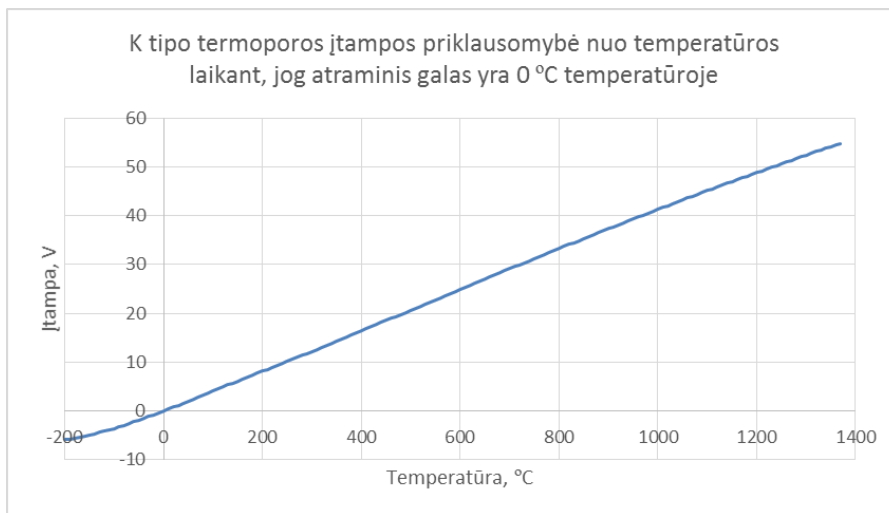
čia $temp$ – termoporos matuojamosios poros temperatūra laikant, jog atraminė pora yra patalpinta 0 °C temperatūroje, $code_{ADC}$ – ADS1118 konversijos rezultatas matuojant atraminėje sandūroje susidariusią termoelektrovaros įtampą, a ir b – suskaičiuoti slankiojo kabelio tipo koeficientai.

Mikrovaldiklyje operacijos su slankiojančio kabelio skaičiais yra atliekamos gerokai ilgiau nei su sveikaisiais. Siekiant sumažinti naudojamus mikrovaldiklio resursus, slankiojančio kabelio koeficientai buvo konvertuojami į atitinkamus sveikuosius skaičius taip realizuojant fiksuoto kabelio aritmetiką. Siekiant išlaikyti tikslumą, temperatūra padauginama iš 10, taip taikant sveikųjų skaičių aritmetiką išlaikomas vieno skaičiaus po kabelio tikslumas. Skaičiavimams naudojami 32 bitų ilgio kintamieji. Gauti fiksuoto kabelio koeficientai naudojami temperatūros apskaičiavimui pagal 2.2 formulę. Suskaičiuoti koeficientai pateikti P-1 priede.

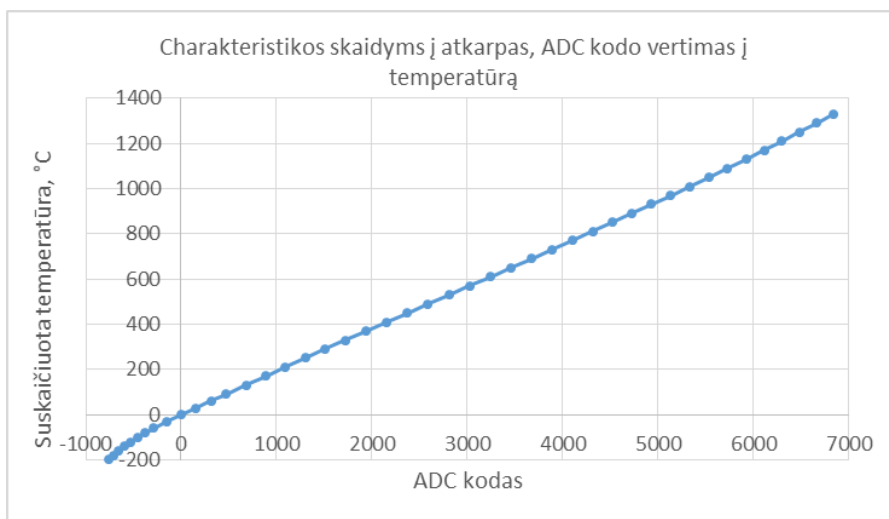
$$temp \cdot 10 = \frac{a \cdot code_{ADC} + b}{4096}; \quad 2.2$$

čia $temp$ – termoporos matuojamosios poros temperatūra laikant, jog atraminė pora yra patalpinta 0 °C temperatūroje, $code_{ADC}$ – ADS1118 konversijos rezultatas matuojant atraminėje sandūroje susidariusią termoelektrovaros įtampą, a ir b – suskaičiuoti fiksuoto kabelio tipo koeficientai.

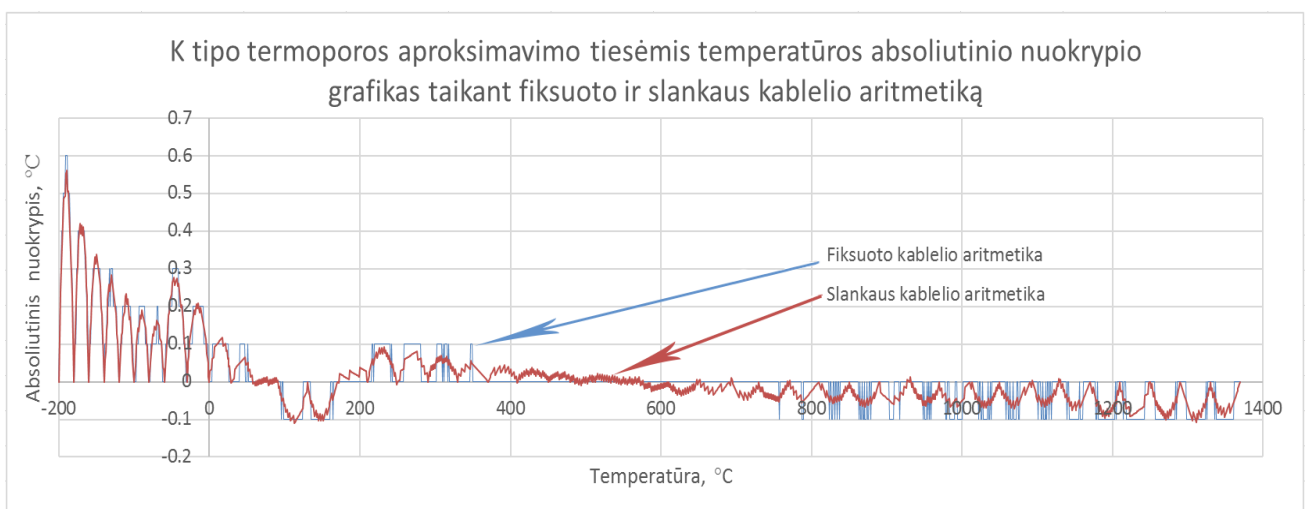
K tipo termoporos aproksimavimo tiesėmis absoliutinio nuokrypio grafikas pateiktas 2.7 paveiksle. Didžiausi aproksimavimo nuokrypiai pastebimi ten, kur termoporos charakteristika turi didžiausius išlinkimus, tačiau jie neviršija 0,6 °C.



2.5 pav. K tipo termoporos įtampos priklausomybė nuo temperatūros



2.6 pav. Į atkarpas suskaidyta K tipo termoporos temperatūros priklausomybė nuo ADC kodo



2.7 pav. K tipo termoporos aproksimavimo tiesėmis temperatūros absoliutinio nuokrypio grafikas taikant fiksuoto ir slankaus kabelio aritmetiką

Kadangi atraminė sandūra jungiasi netoli ADS1118 keitiklio mikroschemos, kompensavimui tinka joje integruotas temperatūros jutiklis, galintis matuoti nuo -40 °C iki 125 °C. Detalesnės šio jutiklio specifikacijos pateiktos 2.2 lentelėje [9]. Norint atlikti termoporos kompensaciją reikia išmatuoti atraminės sandūros temperatūrą bei suskaičiuoti kompensacinį kodą. Toliau šis kodas sumuojamas su ADS1118 analogas-kodas keitiklio rezultatu ($code_{ADC}$), gautu matuojant termoporos atraminėje sandūroje susidariusią termoelektrovaros įtampą bei verčiamas atgal į temperatūrą naudojant anksčiau aptartą 2.2 formule [11].

2.2 lentelė

ADS1118 vidinio temperatūros daviklio specifikacija

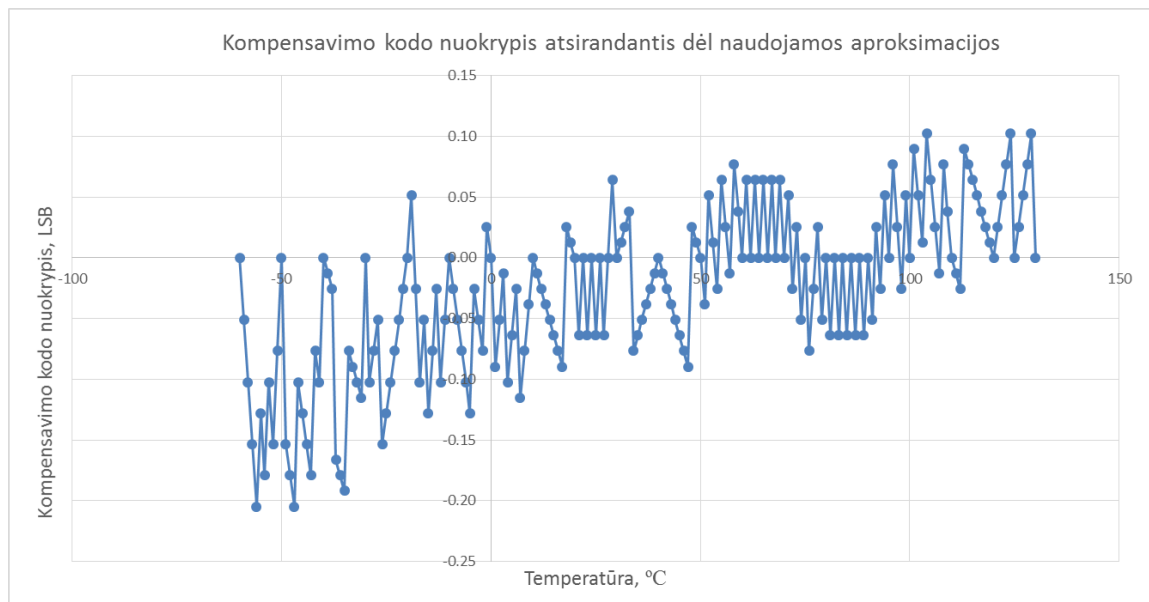
TEMPERATURE SENSOR				
Temperature sensor range		-40	+125	°C
Temperature sensor resolution		0.03125		°C/LSB
Temperature sensor accuracy	$T_A = 0^{\circ}\text{C to } +70^{\circ}\text{C}$	0.2	± 0.5	°C
	$T_A = -40^{\circ}\text{C to } +125^{\circ}\text{C}$	0.4	± 1	°C
	vs supply	0.03125	± 0.25	°C/V

Taigi atliekamas ADS1118 vidinio temperatūros jutiklio rodmenų vertimas į kompensavimo kodą atliekant aproksimaciją tiesėmis. Charakteristika skaidoma į atkarpas kas 10 °C. Naudojant slankaus kabelio aritmetiką gaunamas maksimalus kompensavimo kodo nuokrypis 0,205 LSB, grafikas pateiktas 2.8 paveiksle. Turint omenyje, kad kompensavimo kodas yra sveikasis skaičius, pereiname prie fiksuoto kabelio aritmetikos. Gauti fiksuoto kabelio koeficientai c ir d naudojami termoporos atraminės sandūros temperatūros kompensacijai, kurią vertinant gauname 2.3 formulę, skirtą pilnam matuojamos termoporos sandūros temperatūros apskaičiavimui. Suskaičiuoti koeficientai c ir d pateikti P-1 priede.

$$temp \cdot 10 = \frac{a \left(code_{ADC} + \frac{local_{temp} \cdot c + d}{4096} \right) + b}{4096}; \quad 2.3$$

čia $temp$ – termoporos matuojamos sandūros temperatūra, $code_{ADC}$ – ADS1118 konversijos rezultatas matuojant atraminėje sandūroje susidariusią termoelektrovaros įtampą, a , b , c , d – suskaičiuoti fiksuoto kabelio tipo koeficientai, $local_{temp}$ – išmatuota atraminės sandūros temperatūra.

Maksimalus kompensavimo kodo nuokrypis susideda iš aproksimavimo bei apvalinimo iki vienetų paklaidos: $0,205 + 0,5 = 0,705$ LSB. Žinome, jog $1^{\circ}\text{C} = 5,12$ LSB, taigi šis kompensavimo kodo nuokrypis apytikriai atitinka $0,705 \cdot 5,12 \approx 0,138$ °C.



2.8 pav. Kompensavimo kodo nuokrypis atsirandantis dėl naudojamos aproksimacijos

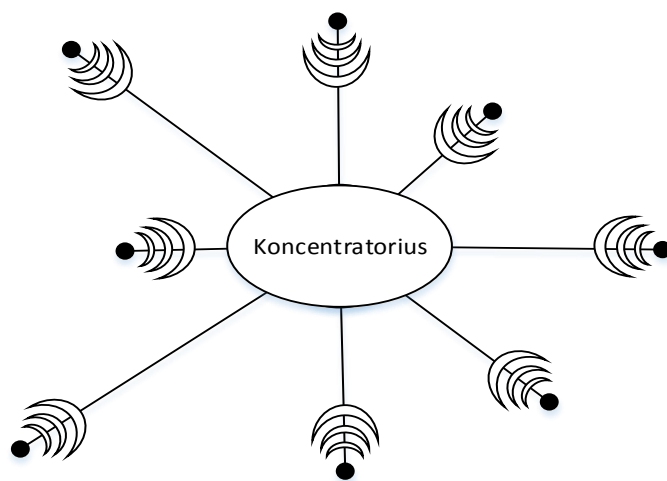
Taigi didžiausia absoliutinė temperatūros paklaida, galinti atsirasti dėl naudojamos fiksuoto kablelio aritmetikos, taikomo aproksimavimo tiesėmis bei naudojamo kompensavimo metodo negali viršyti $0,6 + 0,138 = 0,738$ °C. Atsižvelgiant į 2.7 paveiksle pateiktą grafiką matome, jog tokio nuokrypio tikimybė labai maža, o matuojant teigiamas temperatūras šis nuokrypis negali viršyti $0,1 + 0,138 = 0,238$ °C.

Remiantis ADS1118 dokumentacija [9], galimos papildomos dėl šio keitiklio netobulumo atsirandančios paklaidos. Jos susideda iš stiprinimo nuokrypio (angl. *Gain error*) bei nuolatinės dedamosios poslinkio (angl. *Offset error*). Taigi vertindami dokumentacijoje nurodytas charakteristikas gauname, jog stiprinimo nuokrypio didžiausia galima paklaida – 0,25 %, nuolatinės dedamosios poslinkio didžiausia galima paklaida – 2,5 LSB, kurią išreiškus temperatūra apytikriai gautume 0,5 °C, nes $1\text{ °C} \approx 5,12\text{ LSB}$.

Programuojant mikrovaldiklį buvo pasirinktas sąlygų tikrinimo sprendimas taikant greičiausio priartėjimo prie reikiamo intervalo metodą. Charakteristika padalinta į 46 intervalus, tad maksimalus tikrinamų sąlygų skaičius neviršija šešių, nes $2^6 = 64 > 46$. Kompensavimo kodo charakteristika padalinta į 19 intervalų, tad maksimalus tikrinamų sąlygų skaičius neviršija penkių, nes $2^5 = 32 > 19$.

2.3 Sistemos topologija ir veikimo principas

Sistemoje naudojama žvaigždės tipo tinklo struktūra, kiekvienas bevielis jutiklis siunčia duomenis tiesiogiai į koncentratorių. Kadangi sistemoje numatyta naudoti tik vieną ryšio kanalą, duomenų mainai vienu metu gali vykti tik viena kryptimi. Tinklo topologija pateikta 2.9 paveiksle.



2.9 pav. Sistemoje naudojama žvaigždės tipo tinklo topologija

Bevieliai jutikliai užprogramuojami aktyvuotis tam tikrais laiko intervalais, atlikti matavimus bei išsiųsti surinktus duomenis. Prabudimo laikai tarp jutiklių nėra sinchronizuojami, tad atsiranda maža, tačiau reali konfliktų tikimybė, kai keli bevieliai jutikliai siunčia duomenis vienu metu. Tokiu atveju koncentratorius gali siunčiamų duomenų nepriimti arba atmesti juos dėl jų turinio sugadinimo. Siekiant išvengti šio nepageidaujamo efekto bei dėl kitų priežasčių atsiradusių ryšio sutrikimų panaudojamas grįžtamasis ryšys, skirtas informuoti bevielį jutiklį apie gautus duomenis. Siekiant sumažinti bevielio jutiklio energijos suvartojimą, klausymosi režimas įjungiamas tik trumpą laiko tarpą po duomenų išsiuntimo. Jei per tą laiką negaunamas patvirtinimas iš koncentratoriaus apie priimtus duomenis, duomenų siuntimas kartojamas. Tam, kad konfliktuojantys bevieliai jutikliai toliau netrukdytų vienas kitam, siuntimų pakartojimas atliekamas po santykinai trumpo atsitiktinio laiko intervalo. Koncentratorius didžiąją laiko dalį dirba klausymosi režime. Į siuntimo režimą jis persijungia tik trumpą laiko tarpą, trunkantį kol išsiunčiamas patvirtinimas, jog duomenys buvo sėkmingai priimti iš bevielio jutiklio [12].

Bevielis jutiklis konfigūruojamas nuotoliniu būdu nustatant atitinkamą darbo režimą bei atsibudimo intervalą. Koncentratoriui priėmus duomenis iš bevielio jutiklio, atgal siunčiamas patvirtinimas prie kurio taip pat pridedami įvesti nustatymai. Taigi bevielio jutiklio perkonfigūravimas įvyksta tik po tam tikro laiko tarpo, priklausančio nuo prieš tai buvusios konfigūracijos.

Kiekvienas bevielis jutiklis turi savo identifikavimo adresą, skirtą jo atpažinimui bei individualiam ryšio užmezgimui. Siekiant jog koncentratorius komunikuotų tik su atitinkamu bevielų jutiklių rinkiniu, specialiai įvedamas aptarnaujamų adresų masyvas. Tokiu būdu galima realizuoti dvi lygiagrečiai veikiančias viena kitai netrukdančias sistemas turinčias savo aptarnaujamų bevielų jutiklių rinkinius.

3. PROJEKTINĖ DALIS

3.1 Bevielio jutiklio projektavimas

Norima, jog bevielis jutiklis būtų adaptyvus ir galėtų nuskaityti skirtingų tipų temperatūros daviklius, tačiau ekonomiškai nenaudinga daryti universalios, įvairiems temperatūros davikliams pritaikytos plokštės (labai retai atsiranda poreikis vienu metu naudoti kelių tipų temperatūros jutiklius). Dėl šios priežasties buvo nuspręsta pagaminti atskirą bevielio jutiklio dalį, atsakingą už duomenų nuskaitymą ir bevielį ryšį su koncentratoriumi. Šią dalį sudaro mikrovaldiklis, radijo modulis bei maitinimo schema. Projektuojant šią plokštę, numatomas didelis skaičius išvadų, prie kurių būtų galima jungti įvairius plėtinius, reikalingus norint nuskaityti skirtingų tipų daviklius. Taikant tokį sprendimą galima tikėtis ateityje pritaikyti įvairius kito tipo daviklius (drėgmės, slėgio, amoniako, apšviestumo ir t.t.).

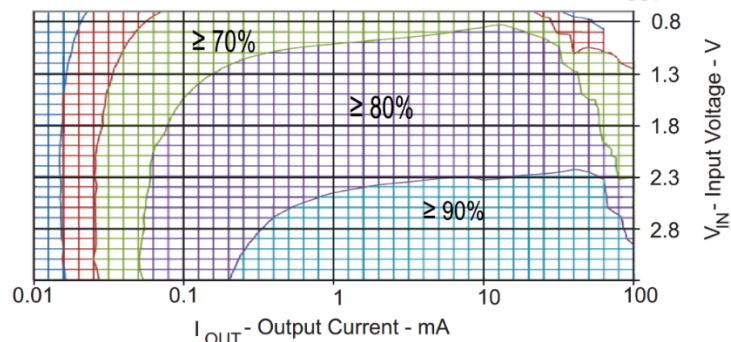
Bevielio jutiklio valdymui buvo pasirinktas MSP430 architektūros mikrovaldiklis, gaminamas kompanijos „Texas Instruments“. Šie mikrovaldikliai pasižymi galimybe efektyviai minimizuoti energijos sąnaudas. MSP430 mikrovaldiklių maitinamo įtampa gali kisti nuo 1,8 V iki 3,6 V – tai puikiai suderinama su pasirinktu radijo moduliu. Toliau buvo atsizvelgta į reikalingus mikrovaldiklio resursus bei turimą periferiją. Buvo pasirinktas MSP430G2553 mikrovaldiklis turintis du komunikacinius prievadus. Vienas jų naudojamas komunikacijai su radijo moduliu per SPI sąsają, o kitas rezervuojamas komunikacijai su skaitmeniniais davikliais. MSP430G2553 yra biudžetinės klasės mikrovaldiklis, tad jis išsiskiria savo maža kaina. Kitos uždavinio sprendimui svarbios šio mikrovaldiklio charakteristikos [13]:

- 16 MHz didžiausias taktinis dažnis;
- 512B SRAM (angl. *Static random-access memory*);
- 10 bitų raiškos SAR (angl. *Successive approximation*) tipo ADC (angl. *Analog-to-digital converter*);
- 0,5 μ A srovės suvartojimas parengties režime (angl. *Standby Mode*);
- mažas korpusas turintis 28 prievadus (28-TSSOP);
- darbinė temperatūra nuo -40 °C iki +85 °C.

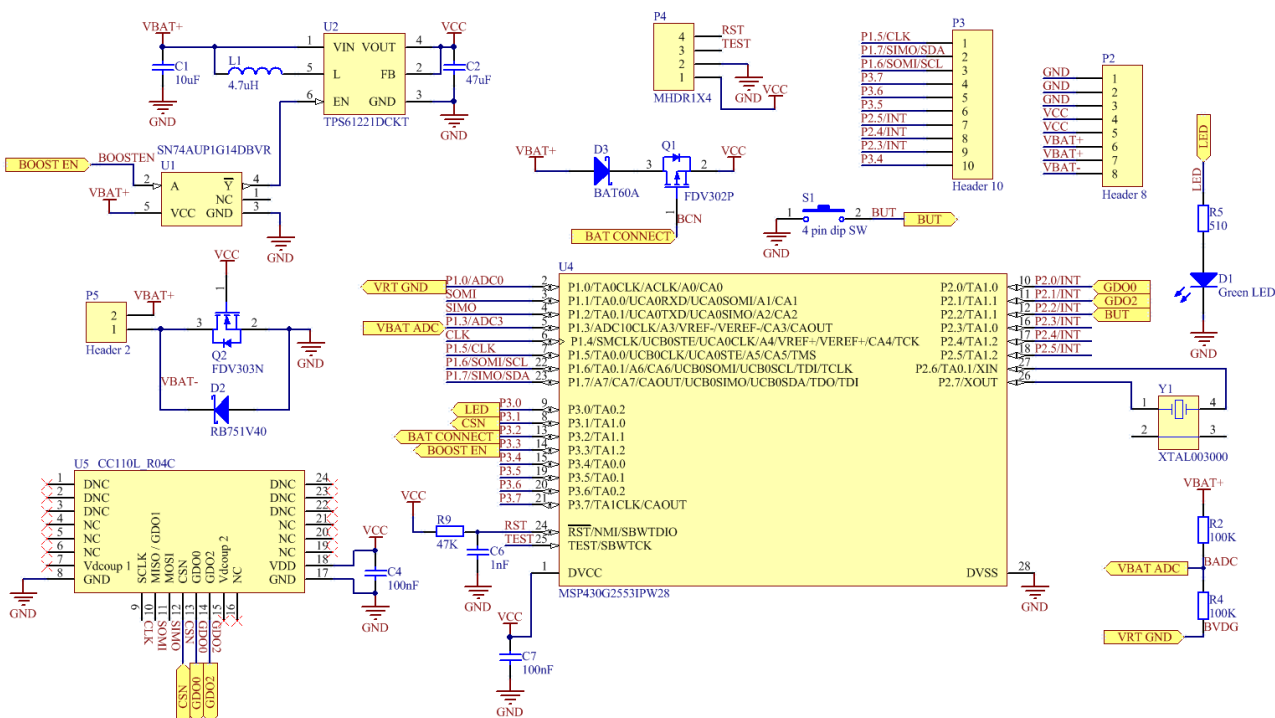
Projektuojamo bevielio jutiklio spausdintinio montažo plokštės matmenys orientuojami į kompanijos „Spelsberg“ gaminamą dėžutę „Abox 025-L“. Ši dėžutė yra hermetiška bei yra pritaikyta įvairiems montavimo sprendimams. Laidai gali būti išvesti patogioje pusėje pro tam skirtas hermetiškas angas. Ši dėžutė yra nebrangi, plačiai naudojama pramonės srityje

Daugumai daviklių reikalinga įtampa yra didesnė nei mažiausia galima bevielio jutiklio maitinimo įtampa, prie kurios dar užtikrinamas funkcionalumas. Tokiu atveju atsiranda sunkumų parenkant maitinimo elementus. Tarkime jog naudojamas daviklis, kuriam reikalinga minimali 3 V įtampa, o bevielis jutiklis gali dirbti įtampų diapazone nuo 1,8 V iki 3,6 V. Tokiu atveju reikalingas maitinimo elementas, užtikrinantis įtampą nuo 3 V iki 3,6 V. Daugeliu atvejų tokį elementą pritaikyti sudėtinga bei jis naudojamas neefektyviai – išsikrovus iki 3 V jis turi būti keičiamas. Dėl šios priežasties numatoma maitinimo schema, galinti pakelti maitinimo įtampą. Tam naudojama kompanijos Texas Instruments gaminama mikroschema TPS61221. Ji pasižymi tuo, jog esant mažoms apkrovoms gali pasiekti santykinai aukštą naudingumo koeficientą, kurio priklausomybė nuo maitinimo įtampos bei išėjimo srovės pateikta 3.1 paveiksle [14]. Taip pat labai svarbu, jog esant nykstamai mažai išėjimo apkrovai ši schema vartoja tik 5 μ A srovę bei reikalauja labai mažai išorinių komponentų. Pasirinktas fiksuotos 3,3 V išėjimo įtampos variantas, taip išvengiant išorinio varžų daliklio reikalingo kitu atveju. Šis įtampos daugintuvas gali dirbti esant įėjimo įtampai nuo 0,7 V iki 5,5 V. Taigi naudojant tokį komponentų rinkinį bevielio jutiklio maitinimo įtampa gali kisti daug didesniame intervale. Taip pat atsiranda daug daugiau galimybių komplektuojant bevielį jutiklį su skirtingų tipų davikliais, nes matavimo metu užtikrinama 3,3 V įtampa. Tačiau nuolatos naudojant įtampos daugintuvą labai išauga energijos sąnaudos (absoliuti dauguma įprastinių įtampos daugintuvų pasižymi labai prastu naudingumo koeficientu esant mažai apkrovai). Dėl šios priežasties nuspręsta realizuoti du galimus maitinimo režimus, kuriuos būtų galima kontroliuoti naudojant mikrovaldiklį: tiesioginis – tiesiai iš maitinimo elemento bei netiesioginis – naudojant įtampos daugintuvą. Mikrovaldikliui aptikus, jog maitinimo įtampa yra nepakankama jis gali perjungti maitinimo grandinę iš tiesioginės į netiesioginę ir atvirkščiai. Tokiu būdu smarkiai sumažinamos bevielio jutiklio energijos sąnaudos. Tačiau reikia turėti omenyje, jog pradiniu momentu bevielis jutiklis privalo maitintis per įtampos daugintuvą ir tik aptikęs pakankamą maitinimo elementų įtampą jis gali persijungti į tiesioginę maitinimo grandinę. Suprojektuota bevielio jutiklio schema pateikta 3.2 paveiksle. Sukurtas prototipas pateiktas 3.3 paveiksle. Suprojektuota bevielio jutiklio spausdintinio montažo plokštė pateikta P-3 priede. Pilnas naudojamų elementų sąrašas pateiktas P-2 priede. Taip pat buvo suprojektuotas ADS1118 priedėlis, skirtas temperatūros matavimui, jis pateiktas 3.4 paveiksle. Suprojektuota ADS1118 priedėlio spausdintinio montažo plokštė pateikta P-3 priede. Šis priedėlis užsimauna ant jungčių išvestų ant bevielio jutiklio.

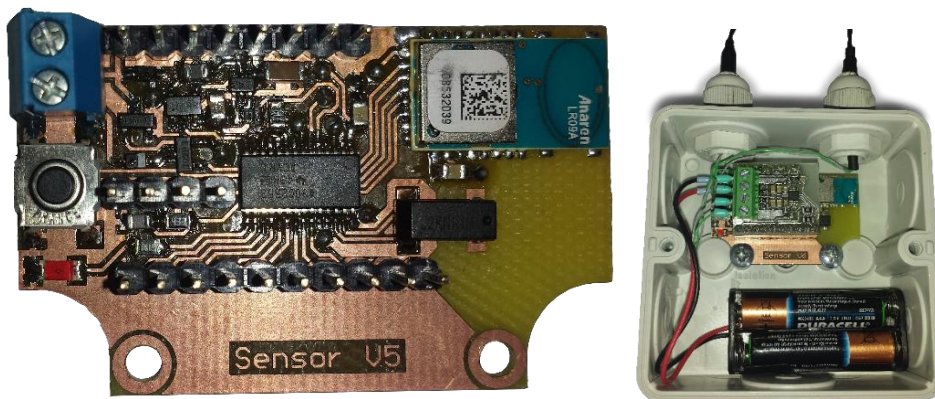
Efficiency vs Output Current and Input Voltage ($V_{OUT} = 3.3V$)



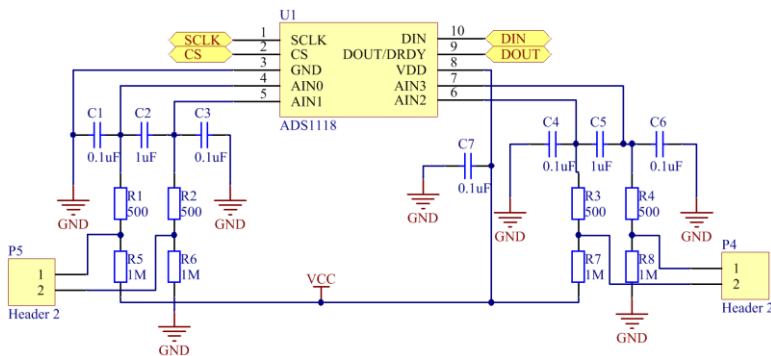
3.1 pav. TPS61221 miksroschemos naudingumo koeficiento priklausomybė nuo maitinimo įtampos bei išėjimo srovės [14]



3.2 pav. Bevielio jutiklio schema



3.3 pav. Suprojektuotas bevielio jutiklio prototipas



3.4 pav. Suprojektuota ADS1118 plokštė skirta temperatūros matavimams su K tipo termopora

3.2 Bevielio jutiklio programinės įrangos kūrimas

Bevielyje jutiklyje naudojamas MSP430G2553 mikrovaldiklis, taigi programa rašyta su „Code Composer Studio 6“ programiniu paketu. Naudota programavimo kalba C su C++ elementais. Kadangi šis mikrovaldiklis turi tik 512 baitus RAM atminties, programa rašoma teikiant didelį dėmesį optimizacijai. Didžioji dalis operacijų atliekamos pagrindiniame cikle, kurio blokinė schema pateikta 3.5 paveiksle. Kadangi reikalingos maksimaliai mažos energijos sąnaudos, ilgiau trunkančios pauzės realizuojamos naudojant procesoriaus migdymą bei skaitiklius *TIMER0* ir *TIMER1*, skirtus jo gražinimui į normalų darbo režimą. Taigi didžiąją laiko dalį mikrovaldiklis praleidžia LPM3 (angl. *Low power mode 3*) režime, tuo tarpu skaitikliams taktinį dažnį teikia išoriškai prijungtas laikrodinis kvarcas. Tokiame režime dirbantis mikrovaldiklis vartoja apytikriai 0.7 μA srovę [13]. Šiuo metu yra realizuoti du pagrindiniai veikimo režimai: matavimų ir konfigūravimo. Paleidus bevielį jutiklį ir atlikus sisteminių bei periferinių įrenginių pradinį konfigūravimą, *flash* atmintyje bandoma aptikti seniau įrašytą bevielio jutiklio adresą bei jo nustatymus. Neaptikus adresą įjungiamas konfigūravimo režimas bei vienos sekundės intervalu siunčiamos užklauskos koncentratoriui dėl adresą priskyrimo. Gavus atsakymą su priskiriamu adresu keičiasi užklauskos koncentratoriui tipas – vienos sekundės intervalu reikalaujama atsiųsti nustatymus. Šie nustatymai suteikia reikalingą informaciją apie numatomą matavimų režimą bei kitus svarbius parametrus. Jeigu užduotas matavimų režimas programiškai palaikomas, bevielis jutiklis persijungia į jį, nustato atitinkamą atsibudimo intervalą ir pradeda atlikti matavimus. Konfigūravimo režimą taip pat galima įjungti rankiniu būdu trumpai nuspaudus ant bevielio jutiklio esantį mygtuką. Šiuo atveju išlaikomas bevielio jutiklio adresas, periodiškai reikalaujama tik naujų nustatymų. Toks režimas naudingas tuomet kai norima konfigūraciją nusiųsti nelaukiant sekančio savaiminio bevielio jutiklio prabudimo. Nuspaudus šį

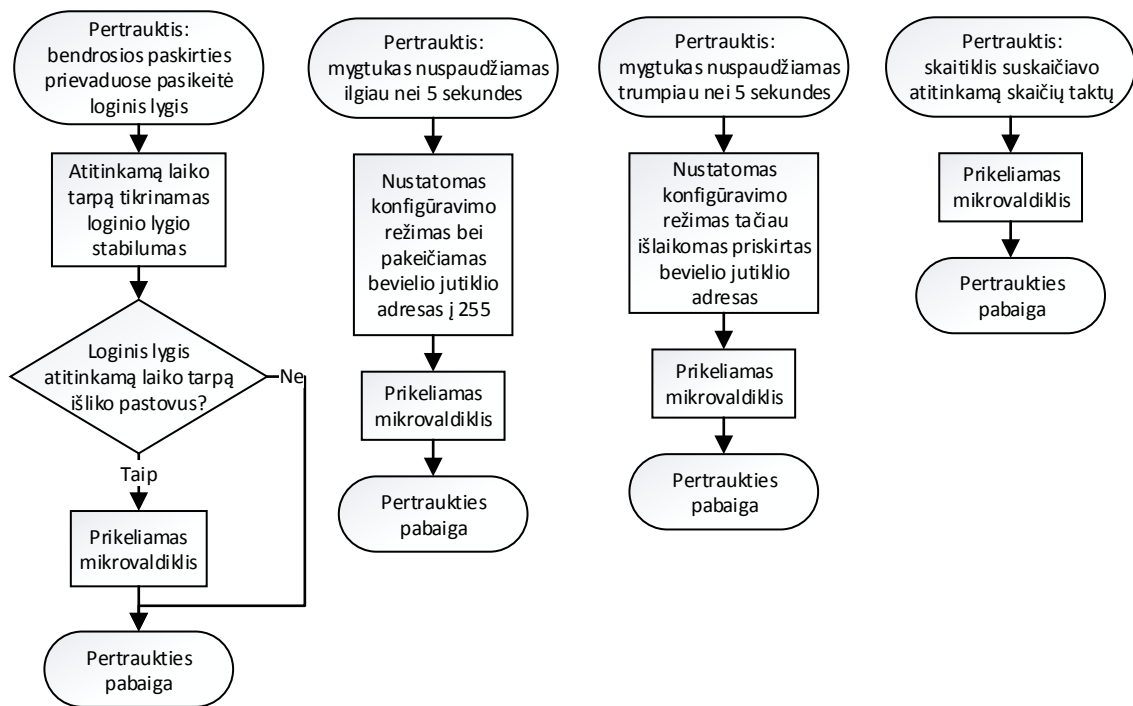
mygtuką ilgiau kaip 5 sekundes pirmiausia laukiama naujo adreso priskyrimo, o tuomet naujų nustatymų. Keičiant adresą galima derinti skirtingus aplinkoje veikiančių bevielių jutiklių rinkinius.

Tiek konfigūravimo tiek matavimų režimas vykdomas pagrindiniame cikle – tai atliekama vis iš naujo vykdant atitinkamą programos bloką bei užbaigus ciklą užmigdant mikrovaldiklį. Egzistuoja trys šaltiniai inicijuojantys naujo ciklo vykdymą – mikrovaldiklio prabudimą:

- laikmačio pertrauktis;
- mygtuko nuspaudimas;
- bendrosios paskirties prievaduose esančių loginių lygių pasikeitimas.

Šias pertrauktis detalizuojanti blokinė schema pateikta 3.6 paveiksle. Prabudimas inicijuotas laikmačio yra periodinis ir nustatomas atliekant jutiklio konfigūravimą. Mygtuko nuspaudimas bei bendrosios paskirties prievaduose esančių loginių lygių pasikeitimas yra panašaus pobūdžio išoriniai signalai, jie gali įvykti bet kuriuo metu bei turėti bet kokio ilgio impulsą. Siekiant išvengti trumpų loginio lygio pasikeitimų registravimo, kurie dažniausiai yra nepageidaujami, numatomi skaitmeniniai šių signalų filtravimai. Pirmiausia aptinkamas pasikeitęs įėjimo loginis lygis, toliau nustatomas atitinkamas laiko intervalas, kurį šis loginis lygis turi išlikti nepakitęs tam, kad būtų užregistruotas pokytis bei atliekamos jam priskirtos operacijos. Tai atliekama naudojant skaitiklio reikšmės palyginimo pertrauktis. Taip įgyvendinamas aptikimas kiek laiko buvo nuspaustas mygtukas bei trumpų loginių lygių pasikeitimų bendrosios paskirties prievaduose eliminavimas. Tarkime, jog prie bendrosios paskirties prievadų prijungiamos herkonines plūdės (jungikliai, kuriuos junginėja judančios plūdės) skirtos skysčio lygio pokyčio aptikimui. Skysčio teliuškavimas gali sukelti klaidingus signalus trunkančius trumpą laiko tarpą, taigi galimybė eliminuoti trumpus impulsus šiuo atveju yra būtina.

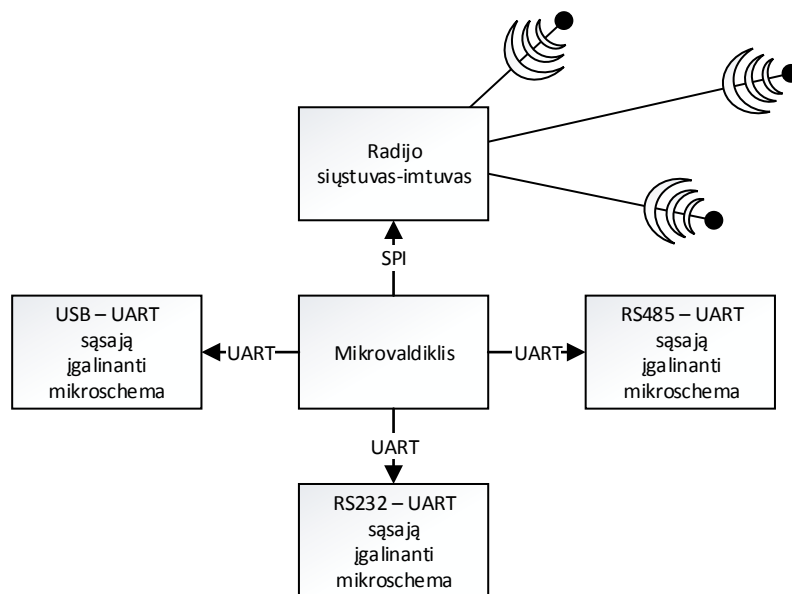
Pagrindiniame cikle taip pat nuolat tikrinama maitinimo elementų būklė, jeigu įtampa krenta žemiau kritinės bevielio jutiklio maitinimo įtampos – įjungiamas maitinimo įtampos daugintuvas. Jis taip pat gali būti įjungiamas jei naudojami didesnės maitinimo įtampos reikalaujantys davikliai, tačiau ši įtampa palaikoma tik tol kol vyksta matavimas. Šiuo metu programiškai realizuoti dviejų tipų matavimai – temperatūros naudojant ADS1118 analogas-kodas keitiklį ir termoporą bei skysčio lygio naudojant herkonines plūdes.



3.6 pav. Bevielio jutiklio programos pertraukčių blokinė schema

3.3 Koncentratoriaus projektavimas

Siekiant praplėsti koncentratoriaus panaudojimo galimybes, buvo numatytos RS232, RS485 bei USB sąsajos su mikrovaldikliu komunikuojančios per UART (angl. *Universal asynchronous receiver/transmitter*) sąsają. Pagrindiniai komponentai, sudarantys koncentratorių pateikti 3.7 paveiksle. Šie komponentai turėjo didelę įtaką visam prietaiso projektavimui, tad jų pasirinkimui buvo skiriamas didžiausias dėmesys.



3.7 pav. Pagrindiniai koncentratorių sudarantys komponentai

Koncentratoriui buvo nuspręsta naudoti ARM architektūros mikrovaldiklį. Šį sprendimą lėmė didelis šios architektūros mikrovaldiklių našumas, kuris yra svarbus norint greitai apdoroti priimtus duomenis. Taip pat svarbiu kriterijumi tapo mikrovaldiklyje esantis SRAM atminties kiekis, kadangi buvo nuspręsta visus gautus duomenis iš bevielių jutiklių laikyti šioje atmintyje. Kadangi su koncentratoriumi komunikuojama naudojant *Modbus RTU* protokolą, buvo skiriamas prioritetas mikrovaldikliams, turintiems automatinį minėtu protokolu gautos žinutės atpažinimą (atitinkamą laiką nesulaukus naujo simbolio generuojama pertrauktis). Renkantis mikrovaldiklį, buvo atsižvelgta ir į RTC (angl. *Real-time clock*) palaikymą, kadangi prie priimtų duomenų žymimos laiko atskaitos. Taigi nuspręsta naudoti kompanijos „STMicroelectronics“ gaminamą mikrovaldiklį STM32F303CCT6, turintį tokias sistemos realizavimui svarbiausias charakteristikas [15]:

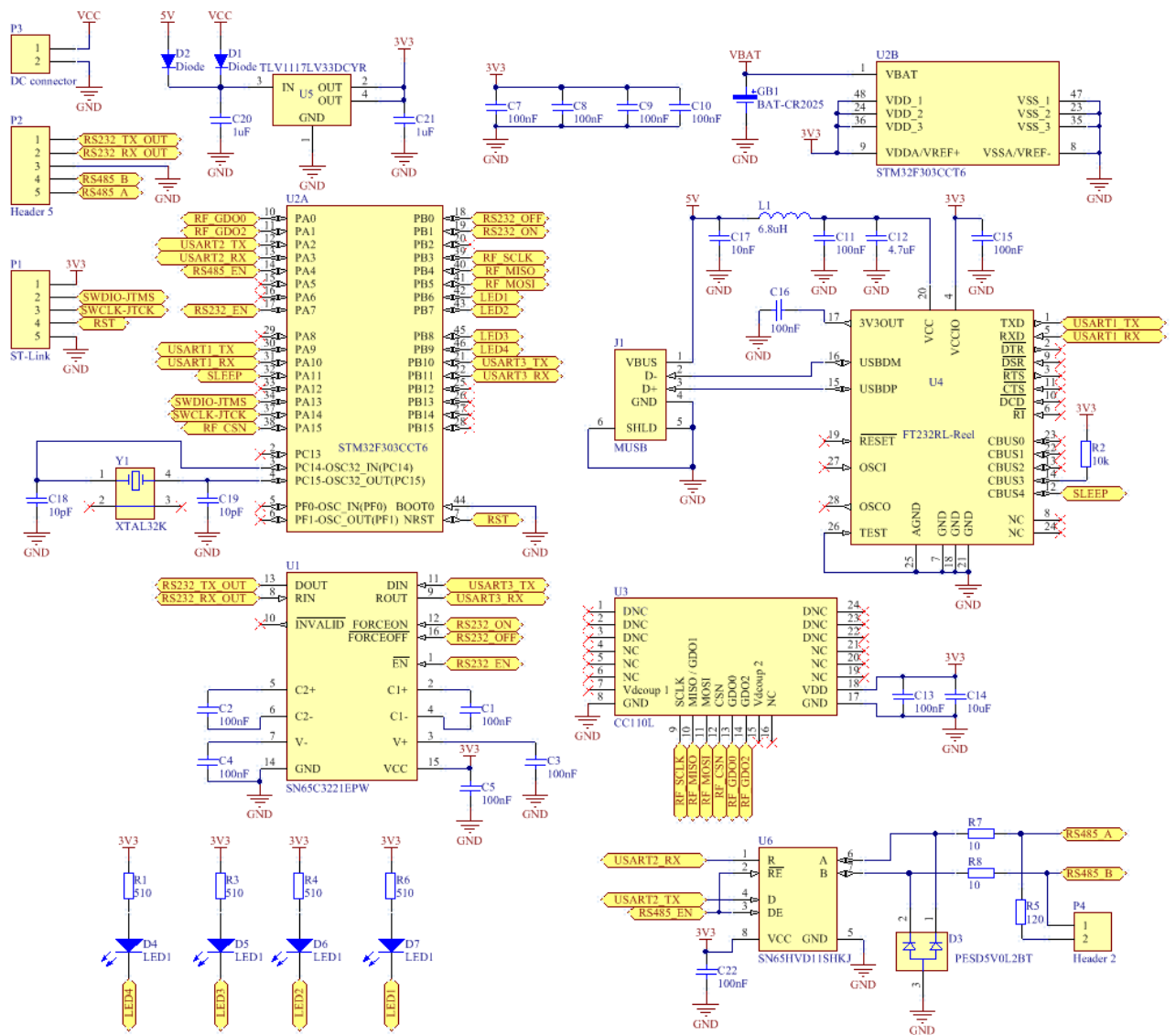
- 72 MHz darbo dažnį su išoriniu taktiniu generatoriumi arba 64 MHz naudojant vidinį taktinį generatorių;
- 40 kB SRAM atminties;
- didelis kiekis palaikomų komunikacijos sąsajų (panaudotos trys USART bei viena SPI sąsaja);
- galima maitinimo įtampa nuo 2 V iki 3,6 V (puikiai suderinama su naudojamu radijo moduliu A110LR09);
- mažas korpusas turintis 48 prievadus (LQFP48);
- RTC palaikymas;
- darbinė temperatūra nuo -40 °C iki +85 °C;

Koncentratoriuje USB sąsaja realizuojama naudojant kompanijos „FTDI Chip“ mikroschemą FT232RL. Ši mikroschema patogi tuo, jog reikalauja labai mažai išorinių komponentų, turi vidinį taktinio dažnio generatorių bei EEPROM (angl. *Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*) atmintį, į kurią galima įrašyti prietaiso aprašymą bei bendros paskirties prievadų funkcijas. Prijungus prie kompiuterio, FT232RL atpažįstama kaip virtualus COM prievadas su anksčiau minėtu įprogramuotu prietaiso aprašymu. Ši mikroschema palaiko nuo 300 baud iki 3 Mbaud duomenų spartą (angl. *Baudrate*). Šiuo metu numatoma naudoti duomenų spartas kintančias intervale nuo 4800 baud iki 256000 baud, tačiau greičio rezervas suteikia perspektyvas tolesniam šios sistemos vystymui. Taip pat buvo atsižvelgta į tai, jog FT232RL turi galimybę konfigūruoti įėjimo ir išėjimo logikos įtampų lygius, kadangi jie turi būti priderinti prie 3,6 V įtampa maitinamo mikrovaldiklio.

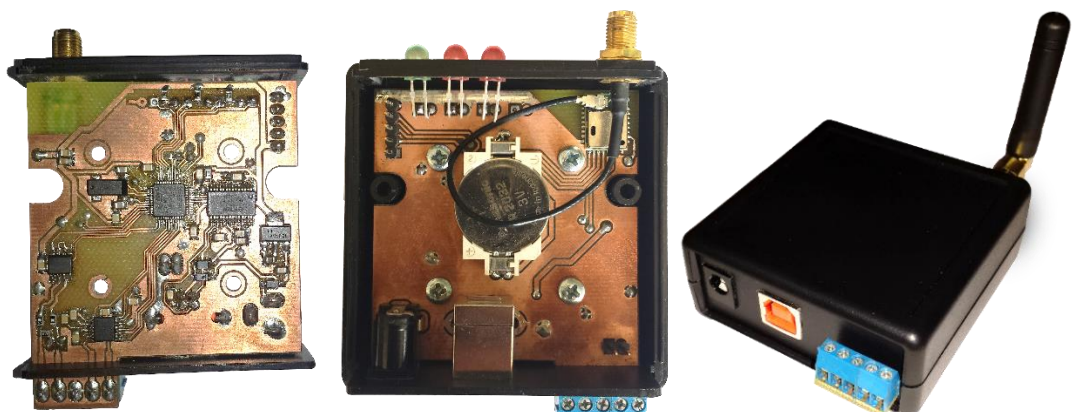
Koncentratoriuje RS232 sąsaja realizuojama naudojant SN65C3221E mikroschemą. Ši mikroschema pasižymi tuo, jog turi apsaugą įėjimuose nuo ± 15 kV statinės iškrovos bei yra optimizuota mažoms energijos sąnaudoms. Šios mikroschemos maitinimo įtampa kinta nuo 3V iki 5,5 V. SN65C3221E palaiko 1 Mbit/s duomenų spartą. RS485 sąsajai panaudota SN65HVD11 mikroschema, pasižyminti maža maitinimo įtampa galinčia svyruoti nuo 3 V iki 3,6 V. Mikroschemoje realizuota ± 16 kV statinės iškrovos apsauga, galimos 1 Mbit/s, 10 Mbit/s ir 32 Mbit/s duomenų spartos. Mikroschema gali dirbti itin plačiame temperatūrų diapazone svyruojančiame nuo -55 °C iki 210 °C. Pagrindiniai kriterijai, lėmę šių schemų pasirinkimą, buvo maža maitinimo įtampa, kadangi norima, kad visi koncentratoriaus elementai galėtų dirbti iš bendro maitinimo šaltinio. Taigi buvo nustatyta, jog maitinimo įtampa turi būti tarpe tarp 3 V ir 3,6 V.

Koncentratoriui numatyta kompanijos „HAMMOND“ dėžutė „1593KBK“. Ji patogi dėl mažų matmenų bei dėl abiejose pusėse išimamos sienelės. Ši dėžutė yra nebrangi, plačiai naudojama.

Kitiems koncentratoriaus elementams specifiniai reikalavimai nėra keliami. Pasirinkti komponentai yra standartiniai ir gali turėti nemažai alternatyvų. Pilnas naudojamų elementų sąrašas pateiktas P-2 priede. Suprojektuoto koncentratoriaus schema pateikta 3.8 paveiksle. Suprojektuotas prototipas pateiktas 3.9 paveiksle. Suprojektuota koncentratoriaus spausdintinio montažo plokštė pateikta P-3 priede.



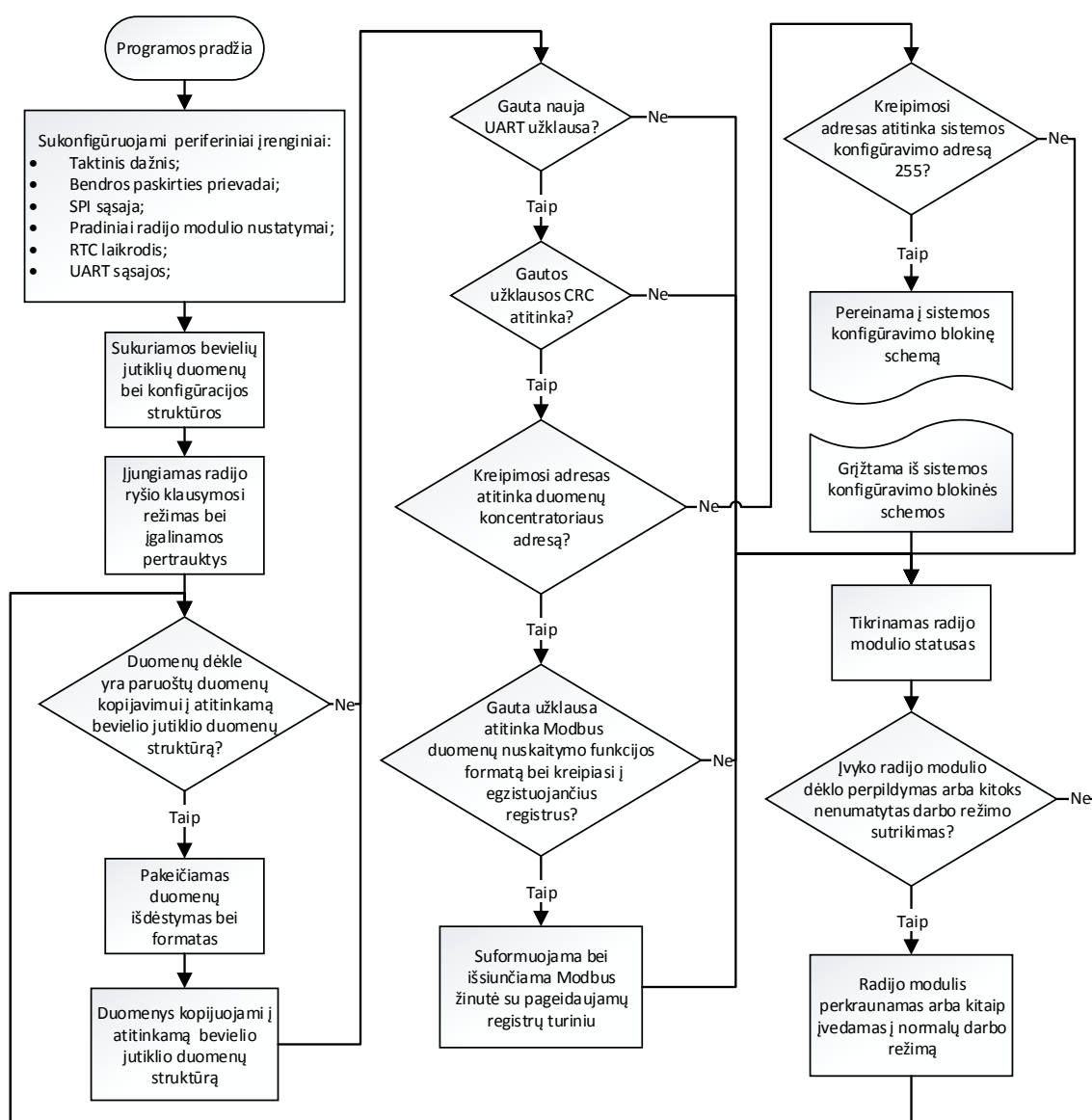
3.8 pav. Suprojektuoto koncentatoriaus schema



3.9 pav. Suprojektuoto koncentatoriaus prototipas

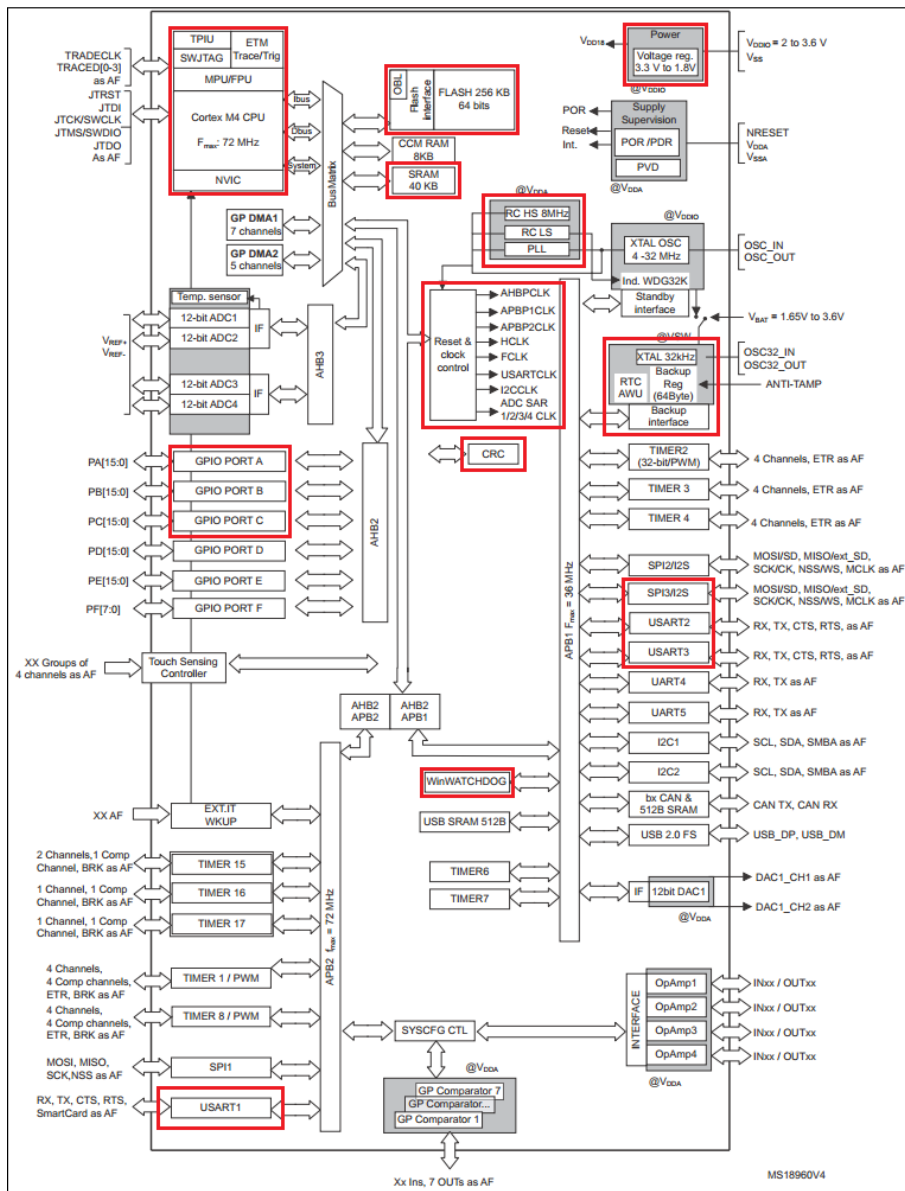
3.4 Koncentratoriaus programinės įrangos kūrimas

Koncentratoriuje naudojamas STM32F303CCT6 mikrovaldiklis, programa rašyta su „Keil uVision5“ programiniu paketu. Naudota programavimo kalba C su C++ elementais. Sukurta programa turi dvi pagrindines dalis – pagrindinį ciklą bei pertrauktyje, iškviečiamoje gavus žinutę radijo ryšiu, atliekamas užduotis. Pagrindinio ciklo blokinė schema pateikta 3.10 paveiksle. Pertrauktyje atliekamos operacijos pateiktos 3.11 paveiksle. Programoje yra ir daugiau pertraukčių, tačiau jose atliekamos mažiau komplikautos operacijos, neaptariamoms šiame darbe. Pradėjus vykdyti programą, pirmiausia sukonfigūruojami periferiniai įrenginiai bei sukuriama reikiama duomenų struktūra. Toliau įgalinamos pertrauktys bei įjungiamas radijo ryšio klausymosi režimas, kuriame koncentratorius praleidžia didžiąją laiko dalį t. y. nuolat laukia kol jam bus atsiųsti nauji duomenys iš bevielių jutiklių.



3.10 pav. Blokinė programos pagrindinio ciklo schema

reikalaujančią priskirti kitą adresą, matavimai tokia režime neatliekami. Priimti duomenys iš bevielio jutiklio pirmiausia apdorojami pertrauktyje, tokiu būdu atsakymas išsiunčiamas kur kas greičiau nei apdorojimą vykdant pagrindiniame programos cikle. Greitis šioje situacijoje yra svarbus todėl, kad bevielis jutiklis išsiuntus duomenis persijungia į klausymosi režimą tik trumpą laiko tarpą taip taupydamas energiją. Jei bevielis jutiklis per šį laiko tarpą negauna atsakymo iš koncentratoriaus, inicijuojamas pakartotinis siuntimas, taip užteršiant radijo ryšio eterį bei švaistant energiją. Taigi gauta žinutė pirmiausia įrašoma į duomenų dėklą, tuomet nustatomas žinutės pobūdis bei suformuojamas atsakymas bevieliui jutikliui. Gavus atliktų matavimų duomenis prie jų prikabinama laiko atskaita bei pažymima, jog duomenys dėkle yra paruošti tolesniam apdorojimui pagrindiniame cikle. Išėjus iš pertraukties, mikrovaldiklio programa grįžta į pagrindinį ciklą, atsakingą už per UART sąsajas gautų užklausų aptarnavimą, duomenų esančių dėkle apdorojimą bei galimų radijo modulio sutrikimų šalinimą, normalaus darbo režimo užtikrinimą. Pagrindiniame cikle aptikus, jog į duomenų dėklą buvo įkelti nauji bevelių jutiklių matavimo rezultatai, atliekamas jų perkėlimas į atitinkamą duomenų saugojimo struktūrą pritaikius smulkius išdėstymo bei formato pakeitimus. Koncentratorius automatiškai nustato ar buvo nepriimtų duomenų paketų. Tai atliekama skaičiuojant laiko intervalus tarp priimtų duomenų, jei šie intervalai viršija bevieliui jutikliui priskirtą matavimų atlikimo periodą, tuomet didinamas prarastų paketų skaitiklis. Šį skaitiklį turi kiekvienas bevielis jutiklis, jis yra prieinamas kaip ir visi kiti duomenų registrai. Gavus duomenis iš bevielio jutiklio šis skaitiklis yra perkraunamas. Sekančiame žingsnyje tikrinama A110LR09 radijo modulio būklė: buvo pastebėta, jog esant labai dideliame radijo eterio triukšmui pasitaiko atveju, kai A110LR09 pereina į perpildymo ar kitokį netinkamą režimą. Siekiant išvengti dėl šios priežasties atsiradusio sistemos veikimo sutrikimo, radijo modulis periodiškai apklausiamas ir, atsiradus reikalui, perkraunamas ar kitaip gražinamas į normalų radijo ryšio klausymosi režimą. Programai toliau sukantis pagrindiniame cikle atliekamas tikrinimas, ar buvo gauta nauja užklausa per kurią nors iš trijų naudojamų UART komunikacijos sąsajų. Aptikus naują užklausą, atliekamas jos pobūdžio nustatymas bei aptarnavimas. Mikrovaldiklio blokinė schema su pažymėtu periferinių įrenginių panaudojimu pateikta 3.12 paveiksle. Sukompiliuotos programos kodas užima apie 20kb atminties.



3.12 pav. STM32F303 mikrovaldiklio blokinė schema su pažymėtu periferinių įrenginių panaudojimu [15]

Kiekvieno bevielio jutiklio duomenų saugojimo struktūros individualūs registrai adresuojami šešiolyktainio formato adresu, kurio pirmi du simboliai nurodo pageidaujamą bevielį jutiklį, o sekantys du simboliai – kurį registrą norima nuskaityti. Duomenų saugojimo struktūra su individualių registrų adresais bei paskirtimi pateikta 3.1 lentelėje. Matome, jog yra galimi du režimai – testavimo bei įprastinis. Atliekant sistemos projektavimą patogiu turėti prieigą prie priimtų duomenų skaičiaus registro bei valdymo žodžio, tačiau paprastam vartotojui šie registrai yra nenaudingi, tad įprastiniame režime ši prieiga yra pašalinama.

Bevielio jutiklio duomenų saugojimo struktūra su individualių registrų adresais bei paskirtimi

Struktūros elementas bei jo tipas:	Adresas šešiolyktainiu formatu		Paskirtis:
	Testavimo režimas:	Įprastinis režimas:	
int16_t siSensorAddress;	Neprieinamas	Neprieinamas	Bevielio jutiklio adresas
int16_t siLength;	xx00*	Neprieinamas	Priimtų duomenų registrų skaičius
int16_t siControlWord;	xx01*	Neprieinamas	Valdymo žodis
int16_t siSignalStrength;	xx02*	xx00*	Signalo stiprumas, dBm
int16_t siTimeH;	xx03*	xx01*	Laiko atžyma: valandos
int16_t siTimeM;	xx04*	xx02*	Laiko atžyma: minutės
int16_t siTimeS;	xx05*	xx03*	Laiko atžyma: sekundės
int16_t siBatLevel;	xx06*	xx04*	(Baterijos įtampa, V) × 10
int16_t siInterval;	xx07*	xx05*	Prabudimo intervalas, s
int16_t siAlarmCounter;	xx08*	xx06*	Negautų paketų skaitiklis
int16_t siRegister1;	xx09*	xx07*	Jutiklio duomenų registras
int16_t siRegister2;	xx0A*	xx08*	Jutiklio duomenų registras
int16_t siRegister3;	xx0B*	xx09*	Jutiklio duomenų registras
int16_t siRegister4;	xx0C*	xx0A*	Jutiklio duomenų registras
int16_t siRegister5;	xx0D*	xx0B*	Jutiklio duomenų registras
int16_t siRegister6;	xx0E*	xx0C*	Jutiklio duomenų registras

* čia xx nurodo pageidaujamo bevielio jutiklio adresą leistiname intervale 0 - FE

Koncentratoriaus komunikavimui su kompiuteriu naudojamas *Modbus RTU* protokolas, apibrėžtas kompanijos *Modicon* standartu. Jis plačiai paplitęs pramonėje įvairiose diagnostikos bei automatizavimo sistemose. Šį protokolą palaiko dauguma procesų automatizavimui ir vaizdavimui skirtų programinių paketų (angl. *supervisory control and data acquisition*, trumpiau *SCADA*). Duomenų nuskaitymas vykdomas naudojant užklausą „*Read Holding Registers*“ atitinkančią funkcijos kodą 0x03 ir detalizuotą 3.13 paveiksle. „*Starting Address Hi*“ nurodo apklausiamo bevielio jutiklio adresą, o „*Starting Address Lo*“ nurodo bevielio jutiklio struktūros, laikančios matavimų duomenis bei kitą informaciją, pradinį registrą. „*No. of Points Hi*“ bei „*No. of Points Lo*“ nurodo kiek struktūros registrų bus nuskaityta. Turint omenyje, jog bevielio jutiklio duomenų saugojimo struktūrą sudaro 15 prieinamų registrų testavimo režime bei 13 įprastiniame, reikia atkreipti dėmesį, jog „*No. of Points Lo*“ ir „*Starting Address Lo*“ suma turi neviršyti šių skaičių, o „*No. of Points Hi*“ visada lygus nuliui. Į neteisingai suformuotą *Modbus* užklausą koncentratorius nieko neatsako.

QUERY		RESPONSE	
Field Name	Example (Hex)	Field Name	Example (Hex)
Slave Address	11	Slave Address	11
Function	03	Function	03
Starting Address Hi	00	Byte Count	06
Starting Address Lo	6B	Data Hi (Register 40108)	02
No. of Points Hi	00	Data Lo (Register 40108)	2B
No. of Points Lo	03	Data Hi (Register 40109)	00
Error Check (LRC or CRC)	—	Data Lo (Register 40109)	00
		Data Hi (Register 40110)	00
		Data Lo (Register 40110)	64
		Error Check (LRC or CRC)	—

3.13 pav. *Modbus* funkcijos *Read Holding Registers* detalizavimas [16]

3.5 Programinės įrangos sistemos konfigūravimui kūrimas

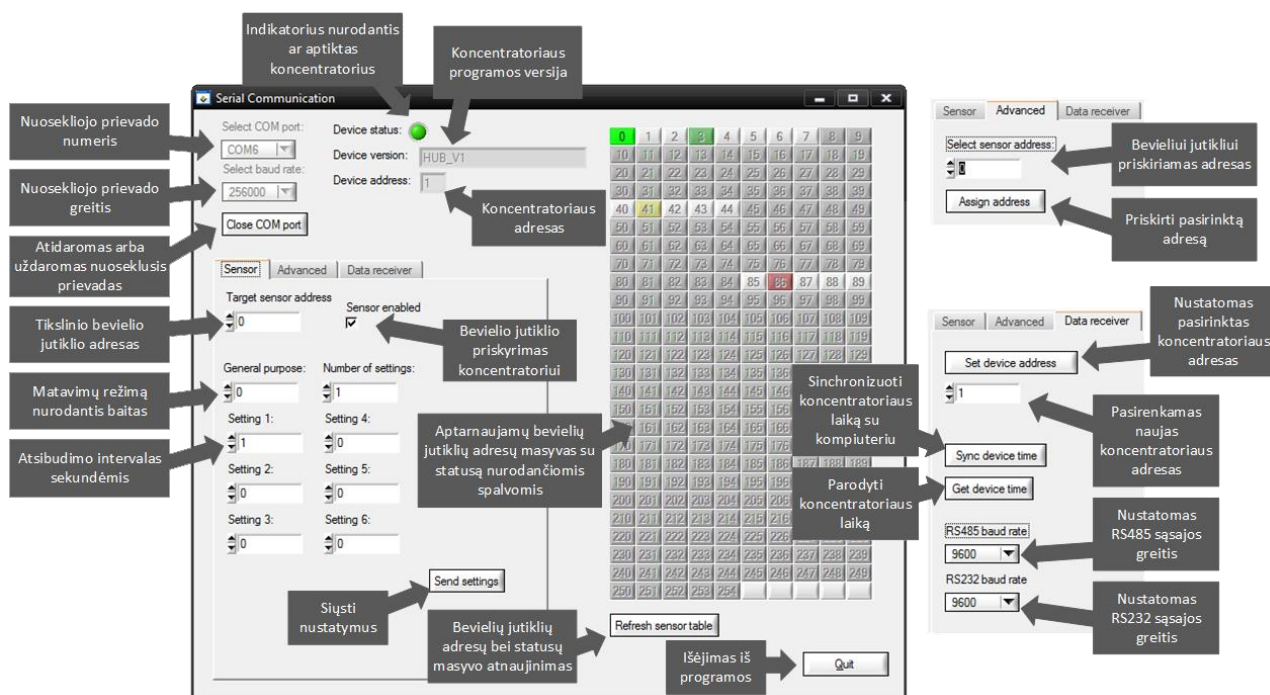
Programa sistemos konfigūravimui kuriama naudojant „LabWindows/CVI“ programinį paketą, pasirinktą dėl greitam inžinerinių uždavinių sprendimui skirtų funkcinių elementų gausos bei supaprastintos programavimo architektūros. Komunikacija su koncentratoriumi vyksta naudojant realizuotas fizines sąsajas USB, RS485, RS232 bei *Modbus* duomenų apsikeitimo protokolą. Koncentratorius yra pavaldusis prietaisas (angl. *Slave device*) taigi visuomet laukia užklauso, savaime jokių žinučių nesiunčia. Atitinkamai kompiuteris yra valdantysis prietaisas (angl. *Master device*), inicijuojantis visas užklausas bei veiksmus. Norima, jog koncentratorius būtų pasiekiamas nepriklausomai nuo jam priskirto adreso, dėl šios priežasties buvo rezervuotas 255 adresas, skirtas prieigai prie konfigūravimo funkcijų. Dėl šios priežasties nebūtina žinoti koncentratoriaus adreso norint sukongigūruoti sistemą, taip išvengiama nepatogumų kai jis užmiršamas. Per USB, RS232 ar RS485 sąsają prijungtas koncentratorius kompiuteryje aptinkamas nuosekliojo prievado atitinkamu numeriu pavidalu (angl. *COM port*), kurį būtina nurodyti konfigūravimo programoje norint sėkmingai prisijungti prie koncentratoriaus. Realizuotų RS485 ir RS232 sąsajų greitis gali būti keičiamas, tad reikia turėti omenyje, kad per šias sąsajas bandant prisijungti prie koncentratoriaus būtina iš anksto žinoti nustatytą komunikacijos greitį. Jungiantis per USB sąsają, koncentratorius naudojamą nuosekliojo prievado greitį aptinka automatiškai, teoriškai jis gali kisti nuo 1,2 Kbaud iki 3,5 Mbaud, tačiau dėl „LabWindows/CVI“ programinės įrangos apribojimų buvo išbandyti greičiai nuo 1,2 Kbaud iki 256 Kbaud. RS485 ir RS232 sąsajose automatinis komunikavimo greičio aptikimas nebuvo realizuotas, nes esant prijungtomis ilgoms komunikavimo linijoms gali atsirasti triukšmai, kurie atliekant automatinį greičio derinimą būtų interpretuojami klaidingai.

Šiuo metu programa dar neturi galutinai išdirbtos vartotojo sąsajos, tačiau atlieka visas sistemos konfigūravimui būtinausias funkcijas:

- nuotolinis bevielių jutiklių konfigūravimas;

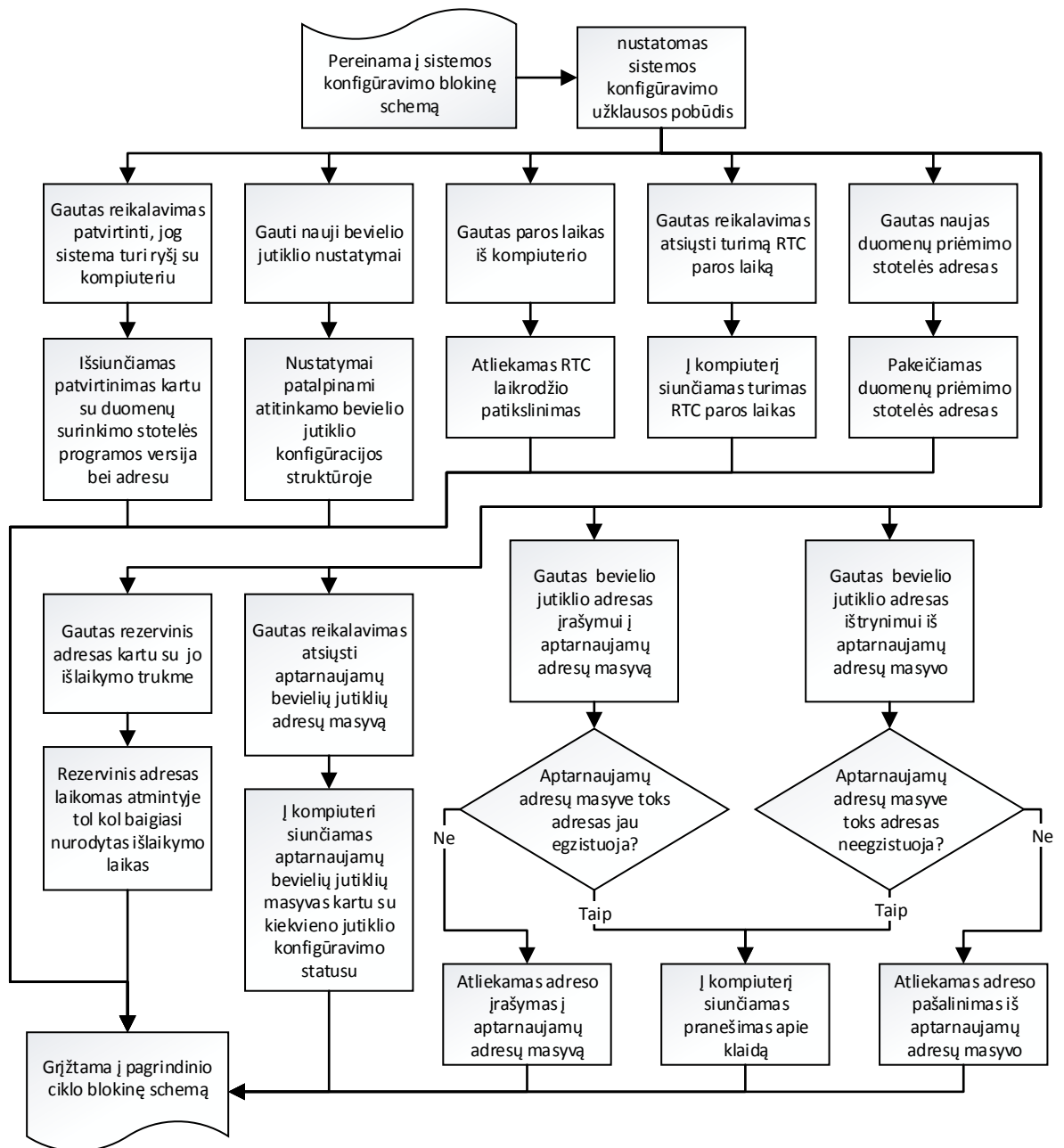
- nuotolinis adresų priskyrimas bevieliams jutikliams;
- koncentratoriaus adreso keitimas;
- koncentratoriaus RTC laikrodžio sinchronizavimas;
- aptarnaujamų bevielų jutiklių adresų masyvo formavimas;
- RS485 ir RS232 komunikacijos greičio keitimas.

Aptarnaujamų bevielų jutiklių adresų masyvo lentelė naudoja spalvinę indikaciją. Tamsiai pilkai atvaizduojami neaptarnaujami jutikliai, visomis kitomis spalvomis žymimi jutikliai susieti su koncentratoriumi. Geltonai pažymėti adresų langeliai žymi jutiklius, kuriems nubudus bus nusiųsti nauji nustatymai. Žaliai žymimi adresų langeliai nurodo kurie jutikliai buvo sukonfigūruoti sėkmingai, o raudonai – jutikliai atmetę nustatymus dėl neteisingo jų turinio. Programos pagrindinis langas su detalesniu matomų elementų paaiškinimu pateiktas 3.14 paveiksle.



3.14 pav. Programos, skirtos sistemos konfigūravimui, vartotojo sąsaja

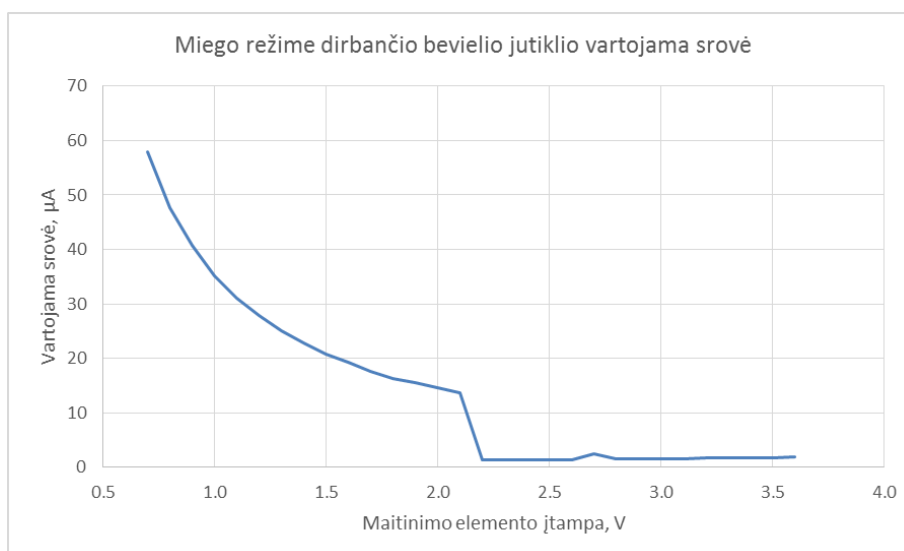
Iš konfigūravimo programos į koncentratorių siunčiamos užklausos inicijuoja atitinkamų veiksmų vykdymą. Galimų užklausų tipai su atitinkamais koncentratoriaus vykdomais veiksmais pateikti 3.15 paveiksle esančioje sistemos konfigūravimo blokinėje schemoje (3.10 paveiksle esančios koncentratoriaus pagrindinio programos ciklo blokinės schemos tęsinys).



3.15 pav. Sistemos konfigūravimo blokinė schema – koncentatoriaus pagrindinio programos ciklo blokinės schemos tęsinys

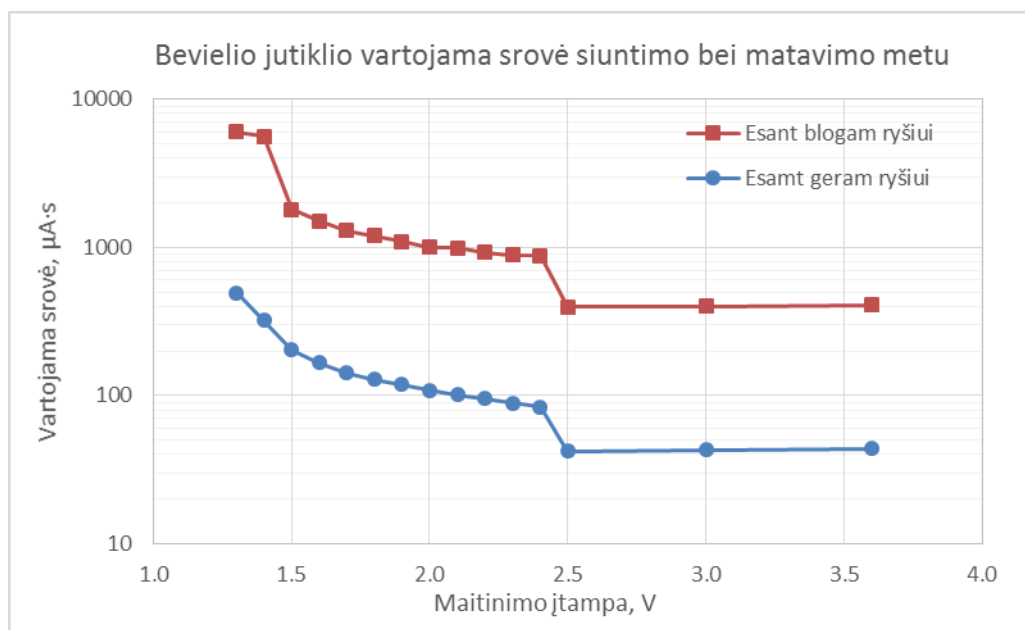
4. REZULTATAI

Sukūrus sistemos prototipą buvo atliekami eksperimentiniai tyrimai, kurių tikslas nustatyti bevielio jutiklio vartojamą srovę bei preliminarų veikimo laiką iš pasirinkto 1200 mAh talpos maitinimo elemento. Bevielio jutiklio vartojama srovė jam esant miego režime buvo matuojama naudojant GDM-8246 multimetra. Gautos reikšmės sužymėtos esant įvairioms maitinimo elemento įtampoms, sudarytas grafikas pateiktas 4.1 paveiksle. Matome, jog srovė staiga pradeda augti įtampai nukritus žemiau 2,2 V. Taip nutinka nes bevielis jutiklis aptinka, jog maitinimo elemento įtampa yra per maža jo normaliam funkcionavimui, tad automatiškai perjungiamas maitinimo grandinė – prijungiamas įtampos daugintuvas. Šio matavimo metu taip pat buvo nustatyta, jog 0,58 V yra mažiausia įtampa prie kurios bevielis jutiklis dar funkcionuoja. Toliau mažinant įtampą pastebėtas staigus srovės šuolis, reikiama maitinimo įtampa nebebuvo išgaunama. Tai pat pastebėta, jog bevielio jutiklio startui reikalinga nemažesnė kaip 0,99 V įtampa. Starto įtampa yra didesnė nes atvirkštinės įtampos apsauga užtikrinanti schemos dalis nėra visiškai atsidariusi – joje esantis N kanalo lauko tranzistorius užsidaręs tad ant lygiagrečiai prijungto šotkio diodo krenta 0,4 V įtampa. Atsižvelgiant į visas naudojamų elementų specifikacijas maitinimo įtampa negali būti aukštesnė kaip 3,6 V. Taigi vertinant gautus rezultatus darome prielaidą, jog bevielio jutiklio funkcionalumas turėtų būti užtikrinamas kai prijungiama maitinimo įtampa yra tarpe tarp 1,2 V (dėl galimų įvairių aplinkos sąlygų pasirenkama šiek tiek didesnė įtampa nei gauta eksperimentiškai) ir 3,6 V.

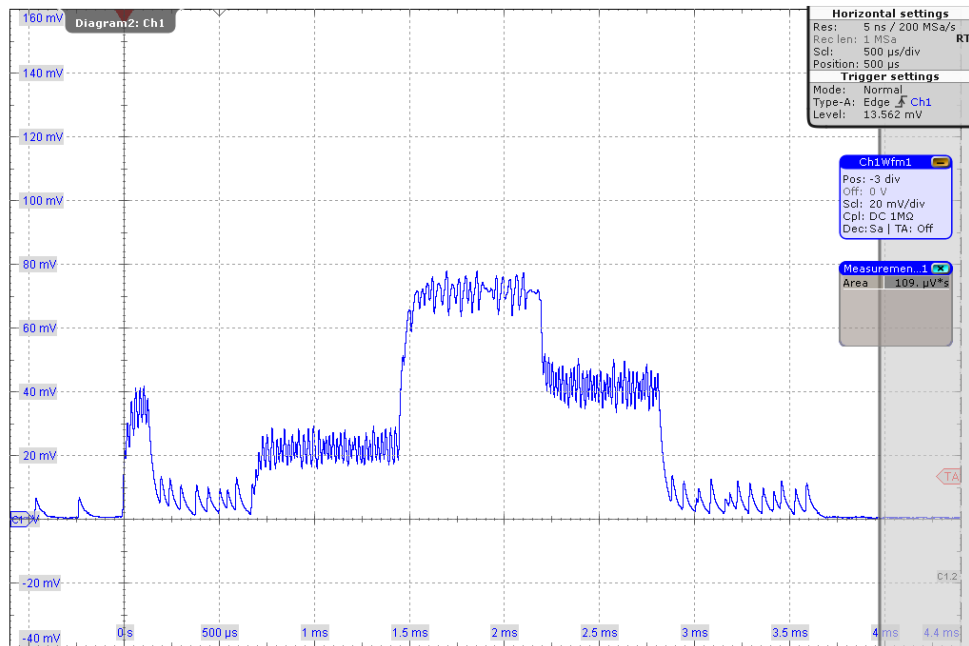


4.1 pav. Miego režime dirbančio bevielio jutiklio vartojamos srovės nuo maitinimo įtampos priklausomybė

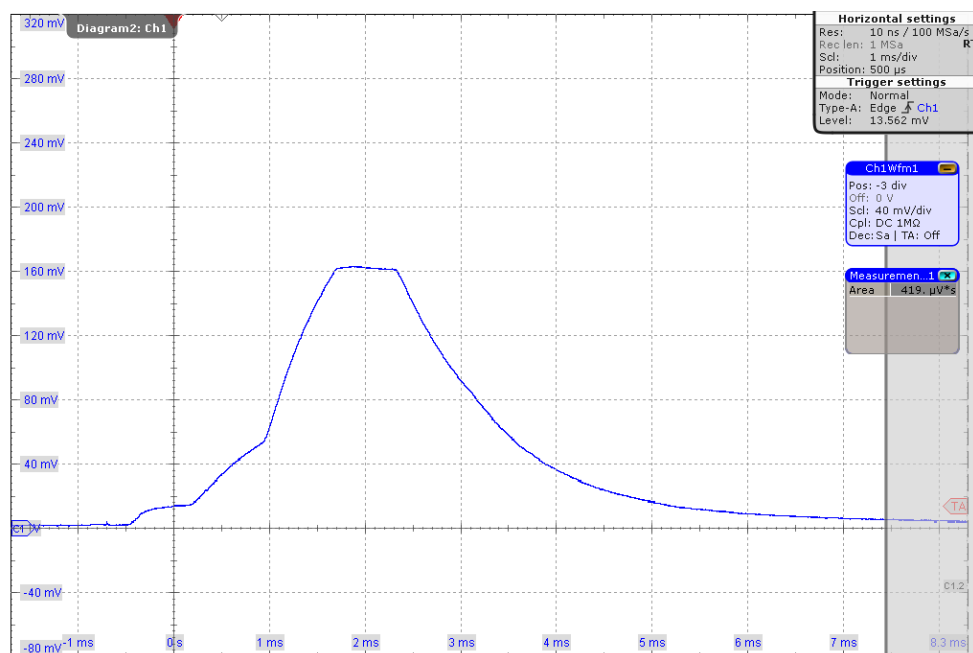
Srovė vartojama bevieliui jutikliui atliekant matavimus bei siunčiant duomenis į koncentratorių buvo matuojama naudojant šunto rezistorių ir stebint ant jo krintančią įtampą. Naudojant osciloskopą Rohde & Schwarz RTO1014 buvo atliekamas gautų impulsų integravimas bei vartojamos srovės skaičiavimas. Matavimas buvo atliekamas dviem atvejais – esant geram ryšiui bei kai koncentratorius buvo nepasiekiamas. Iki 2,5 V buvo naudojamas 1 Ω šunto rezistorius, kitur – 10 Ω . Toks sprendimas priimtas nes viršijus 2,5 V smarkiai sumažėjo vartojama srovė, padidinus šunto varžą išlaikomas pakankamas įtampos kritimas, užtikrinantis reikiamą integravimo tikslumą. Gautas grafikas pateiktas 4.2 paveiksle. Įtampos kritimas ant 1 Ω šunto varžos atliekant temperatūros matavimą bei duomenų siuntimą kai dirba įtampos daugintuvas (esant geram ryšiui su koncentratoriumi bei 2 V maitinimo įtampai) pateiktas 4.3 paveiksle. Įtampos kritimas ant 10 Ω šunto varžos atliekant analogiškas operacijas esant tiesioginiam maitinimui (esant geram ryšiui su koncentratoriumi bei 3 V maitinimo įtampai) pateiktas 4.4 paveiksle.



4.2 pav. Bevielio jutiklio vartojama srovė siuntimo bei matavimo metu



4.3 pav. Įtampos kritimas ant 1Ω šunto varžos atliekant temperatūros matavimą bei duomenų siuntimą kai dirba įtampos daugintuvas (esant geram ryšiui su koncentratoriumi bei 2 V maitinimo įtampai)



4.4 pav. Įtampos kritimas ant 10Ω šunto varžos atliekant temperatūros matavimą bei duomenų siuntimą esant tiesioginiam maitinimui (esant geram ryšiui su koncentratoriumi bei 3 V maitinimo įtampai)

Įvertinus turimus rezultatus gauname, jog cikliškaai atliekant matavimus kas vieną sekundę bevielis jutiklis iš 1200 mAh talpos baterijos gali veikti iki 3 metų esant geram ryšiui bei iki 4 mėnesių kai ryšio su koncentratoriumi nėra. Didinant temperatūros matavimų periodą, veikimo laikas ilgėja proporcingai.

Taip pat buvo atliktas veikimo atstumo matavimas. Gautas 70 metrų veikimo nuotolis tarp bevielio jutiklio ir koncentratoriaus esant tiesioginiam matomumui. Egzistuoja galimybė šį atstumą padidinti keičiant radijo modulio duomenų srauto bei moduliacijos nustatymus, keičiant antenų tipus. Detalesni tyrimai šioje srityje dar nebuvo atlikti, tad optimaliausia sistemos konfigūracija lieka nežinoma.

Siekiant patikrinti sukurtos sistemos stabilumą buvo atliekamas savaitės trukmės testavimas su keturiais bevieliais jutikliais atliekančiais temperatūros matavimus periodiškai kas vieną sekundę. Priimtų duomenų nuskaitymas iš koncentratoriaus buvo vykdomas lygiagrečiai per USB bei RS485 sąsajas. USB sąsaja buvo naudojama prisijungimui prie kompiuterio, duomenų nuskaitymui buvo naudojama IGSS programinė įranga. RS485 sąsaja buvo naudojama koncentratoriaus prijungimui prie Lumel N30B valdiklio. Testavimas praėjo sklandžiai be didesnių sutrikimų.

Bevielio jutiklio temperatūros matavimo tikslumo testavimas buvo atliekamas naudojant krosnelę galinčia pakelti temperatūrą iki 200 °C. Buvo pasirinktos 5 temperatūros, prieš užsirašant duomenis buvo laukiama po 1 valandą kol kiekviena temperatūra galutinai nusistovės. Atraminės temperatūros matavimui buvo naudojamas PT100 naudojantis precizinis termometras Lumel RE21. Testavimas buvo atliekamas su antros klasės K tipo termoporumis. Gauti rezultatai pateikti 4.1 lentelėje. Matome, jog santykinis nuokrypis neviršija 1 %.

4.1 lentelė

Bevielio jutiklio temperatūros matavimo tikslumo testavimo rezultatai

Išmatuota temperatūra				Absoliutinis nuokrypis		Santykinis nuokrypis	
PT100, °C	TS, °C	TC1, °C	TC2, °C	TC1, °C	TC2, °C	TC1, %	TC2, %
18.2	18.8	18.3	18.3	0.1	0.1	0.55	0.55
71.3	19.0	71.1	71.1	-0.2	-0.2	-0.28	-0.28
118.2	19.7	118.6	118.8	0.4	0.6	0.34	0.51
156.2	20.7	156.5	156.9	0.3	0.7	0.19	0.45
185.2	21.5	185.8	186.7	0.6	1.5	0.32	0.81

PT100 - atraminis temperatūros daviklis

TS - kompensavimui naudojamas vidinis ADS1118 temperatūros daviklis

TC1 - pirma termopora

TC2 - antra termopora

5. IŠVADOS

Sukurta bevielio jutiklio mikrovaldiklio programa bei pasirinkti itin mažai energijos vartojantys komponentai užtikrina ilgą veikimą iš mobilių energijos šaltinių. Atliktas bevielio jutiklio vartojamos srovės tyrimas parodė, jog 1200 mAh talpos baterija užtikrina keletą metų autonominį funkcionavimą, matavimus atliekant periodiškai kas vieną sekundę. Sukurta specifinė maitinimo schema leidžia bevielį jutiklį maitinti įtampa intervale nuo 1,2 V iki 3,6 V.

Temperatūros matavimui parinkta K tipo termopora. Sukurtas greitas termoporos charakteristikos „tiesinimo“ bei kompensacijos algoritmas, užtikrinantis, kad dėl atliekamų skaičiavimų atsirandantis absoliutinis temperatūros nuokrypis neviršytų 0,738 °C. Įvertintos temperatūros matavimo paklaidos, galinčios atsirasti dėl ADS1118 keitiklio analogas-kodas paklaidų, gali kisti iki 0,25 % $\pm 0,5$ °C nuo matuojamos temperatūros. Realizuota galimybė naudojant vieną bevielį jutiklį matuoti dvi nepriklausomas temperatūras kintančias intervale nuo -200 °C iki 1370 °C. Atliekant temperatūros matavimo iki 200 °C eksperimentą, santykinis termoporos rodmenų nuokrypis neviršijo 1 %.

Bevielio jutiklio mikrovaldiklio programa sukurta taip, kad atlikus nedideles modifikacijas būtų galima pakeisti nuskaitomo daviklio tipą. Suprojektuotas bevielio jutiklio prototipas turi didelį skaičių išvadų prie kurių ateityje planuojama jungti įvairių tipų daviklius ar kitokius priedėlius. Sukurta maitinimo schema leidžia naudoti daviklius kurių maitinimo įtampa viršija maitinimo elementų įtampą bei padeda išvengti daviklių rodmenų priklausomybės nuo maitinimo elementų išsikrovimo.

Sukurta efektyviai dirbanti koncentratoriaus mikrovaldiklio programa, užtikrinanti greitą priimtų duomenų grupavimą bei jų nuskaitymą. Numatytos trys nepriklausomos, lygiagrečiai veikiančios komunikavimo sąsajos – USB, RS232 bei RS485 skirtos skirtingų tipų prietaisų jungimui. Realizuotas *Modbus RTU* protokolo palaikymas suteikiantis galimybę duomenų nuskaitymui naudoti kompiuterį ir *SCADA* programinę įrangą arba kitą suderinamą pramoninį prietaisą.

Sukurti bei sėkmingai išbandyti veikiantys bevielio jutiklio bei koncentratoriaus prototipai, sukurta sistemos konfigūravimui skirta programinė įranga, užtikrinanti paprastą prisijungimą prie koncentratoriaus. Realizuota galimybė nuotoliniu būdu sekti bevielinių jutiklių maitinimo elementų būklę, ryšio kokybę bei aptikti duomenų praradimą. Išmatuotas bevielio jutiklio veikimo nuotolis siekia 70 metrų esant tiesioginiam matomumui.

INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS

1. Kompanijos OleumTech interneto puslapis [žiūrėta 2015-04-25]. Prieiga per internetą: <http://www.oleumtech.com/product.html>
2. Nokeval FTR264 4 channel thermocouple wireless transmitter manual. [žiūrėta 2015-05-10]. Prieiga per internetą: http://www.nokeval.com/pdf/manuals/en/FTR264_V2.0_2015-01-26_manual_EN.pdf
3. Nokeval FTR970B wireless data receiver manual. [žiūrėta 2015-05-10]. Prieiga per internetą: www.nokeval.com/pdf/manuals/en/RTR970B_FTR970B_V3.2_manual.pdf
4. Thomas Aasebo, Wireless Technologies Bluetooth, ZigBee and ANT. [žiūrėta 2015-04-10]. Prieiga per internetą: http://cwi.unik.no/images/8/84/Wireless_technologies.pdf
5. Artem Dementyev, Steve Hodges, Stuart Taylor, Joshua Smith, Power Consumption Analysis of Bluetooth Low Energy, ZigBee and ANT Sensor Nodes in a Cyclic Sleep Scenario, 2013. [žiūrėta 2015-03-07]. Prieiga per internetą: <http://research.microsoft.com/pubs/192688/TWS%202013%20wireless%20power%20consumption.pdf>
6. A110LR09x User's Manual. [žiūrėta 2015-04-10]. Prieiga per internetą: https://www.anaren.com/sites/default/files/user-manuals/A110LR09x_Users_Manual.pdf
7. CC110L Value Line Transceiver (Rev. B). [žiūrėta 2015-03-15]. Prieiga per internetą: <http://www.ti.com/lit/ds/swrs109b/swrs109b.pdf>
8. Morkūnas, Bevielių temperatūros sensorių tinklas, leidinys Telekomunikacijos ir elektronika 2013, Kaunas.
9. Ultra-Small, Low-Power, SPI-Compatible, 16-Bit ADC and Temp Sensor w/ Int Ref (Rev. D). [žiūrėta 2015-04-14]. Prieiga per internetą: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1118.pdf>
10. Vyčas, Miklušis, Morkūnas, Automatizuota litavimo stotelės temperatūros profilio kontrolė, leidinys Telekomunikacijos ir elektronika 2015, Kaunas.
11. Precision Thermocouple Measurement with the ADS1118. [žiūrėta 2015-04-22]. Prieiga per internetą: <http://www.ti.com/lit/ug/slau509/slau509.pdf>
12. D. Balbonas, G. Daunys Jutiklų tinklai, 2012, Šiaulių universitetas.
13. MSP430G2x53, MSP430G2x13 Mixed Signal Microcontroller (Rev. J). [žiūrėta 2015-05-14]. Prieiga per internetą: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430g2553.pdf>
14. TPS6122x Low Input Voltage, 0.7V Boost Converter With 5.5μA Quiescent Current (Rev. B). [žiūrėta 2015-04-04]. Prieiga per internetą: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps61221.pdf>

15. STM32F303xB STM32F303xC datasheet. [žiūrėta 2015-04-05]. Prieiga per internetą: <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/DM00058181.pdf>
16. Modicon Modbus Protocol Reference Guide PI-MBUS-300 Rev. J. [žiūrėta 2015-05-12]. Prieiga per internetą: http://modbus.org/docs/PI_MBUS_300.pdf

PRIEDAI

P-1. Termoporos charakteristikos „tiesinimui“ bei kompensavimui skirti koeficientai

Į atkarpas suskaidytas termoporos įtampą apibūdinantis ADC keitiklio kodas bei toms atkarpoms būdingi koeficientai a ir b

ADC kodas	Koeficientas a	Koeficientas b
kodas < -754	Klaida, viršijamas leistinas diapazonas	
-754 ≤ kodas < -710	18768	5957925
-710 ≤ kodas < -658	15648	3741491
-658 ≤ kodas < -598	13559	2366825
-598 ≤ kodas < -530	12053	1466810
-530 ≤ kodas < -455	10959	887340
-455 ≤ kodas < -374	10095	494289
-374 ≤ kodas < -287	9453	254305
-287 ≤ kodas < -148	8832	76055
-148 ≤ kodas < 0	8304	-2122
0 ≤ kodas < 154	7980	2048
154 ≤ kodas < 312	7786	31929
312 ≤ kodas < 471	7705	57167
471 ≤ kodas < 682	7776	23650
682 ≤ kodas < 888	7936	-85377
888 ≤ kodas < 1093	8010	-151220
1093 ≤ kodas < 1300	7931	-64872
1300 ≤ kodas < 1510	7795	111791
1510 ≤ kodas < 1722	7702	252276
1722 ≤ kodas < 1937	7637	364146
1937 ≤ kodas < 2153	7587	461047
2153 ≤ kodas < 2370	7547	547259
2370 ≤ kodas < 2588	7521	608917
2588 ≤ kodas < 2806	7503	655404
2806 ≤ kodas < 3025	7507	644164
3025 ≤ kodas < 3242	7525	589795
3242 ≤ kodas < 3459	7552	502252
3459 ≤ kodas < 3675	7596	349965
3675 ≤ kodas < 3889	7656	129567
3889 ≤ kodas < 4101	7715	-99985
4101 ≤ kodas < 4312	7786	-391069
4312 ≤ kodas < 4520	7862	-718780
4520 ≤ kodas < 4726	7940	-1071260
4726 ≤ kodas < 4931	8015	-1425648
4931 ≤ kodas < 5133	8106	-1874346
5133 ≤ kodas < 5333	8184	-2274635
5333 ≤ kodas < 5531	8279	-2781252
5531 ≤ kodas < 5727	8371	-3290020
5727 ≤ kodas < 5920	8482	-3925591
5920 ≤ kodas < 6110	8602	-4635891
6110 ≤ kodas < 6298	8737	-5460758
6298 ≤ kodas < 6482	8877	-6342420
6482 ≤ kodas < 6664	9040	-7399137
6664 ≤ kodas < 6842	9202	-8478735
6842 ≤ kodas < 7017	9357	-9539201
7017 ≤ kodas	Klaida, viršijamas leistinas diapazonas	

Į atkarpas suskaidytas vidinį ADS1118 temperatūros daviklį apibūdinantis ADC keitiklio kodas bei toms atkarpoms būdingi koeficientai c ir d

ADC kodas	Koeficientas c	Koeficientas d
kodas < -7680	Klaida, viršijamas leistinas diapazonas	
-7680 ≤ kodas < -6400	2320	-1030816
-6400 ≤ kodas < -5120	2372	-698049
-5120 ≤ kodas < -3840	2431	-395452
-3840 ≤ kodas < -2560	2477	-218319
-2560 ≤ kodas < -1280	2530	-82305
-1280 ≤ kodas < -0	2569	-32782
0 ≤ kodas < 1280	2602	32768
1280 ≤ kodas < 2560	2628	-795
2560 ≤ kodas < 3840	2654	-67363
3840 ≤ kodas < 5120	2680	-166937
5120 ≤ kodas < 6400	2694	-238076
6400 ≤ kodas < 7680	2707	-321878
7680 ≤ kodas < 8960	2720	-422183
8960 ≤ kodas < 10240	2726	-476271
10240 ≤ kodas < 11520	2720	-414450
11520 ≤ kodas < 12800	2713	-334137
12800 ≤ kodas < 14080	2707	-257094
14080 ≤ kodas < 15360	2694	-74519
15360 ≤ kodas < 16640	2674	232079
16640 ≤ kodas	Klaida, viršijamas leistinas diapazonas	

P-2. Bevielio jutiklio bei koncentratoriaus surinkimui reikalingų komponentų sąrašas

Koncentratoriaus pagaminimui reikalingų komponentų sąrašas

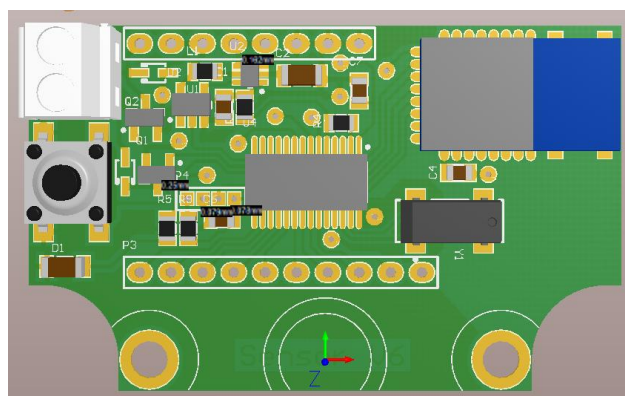
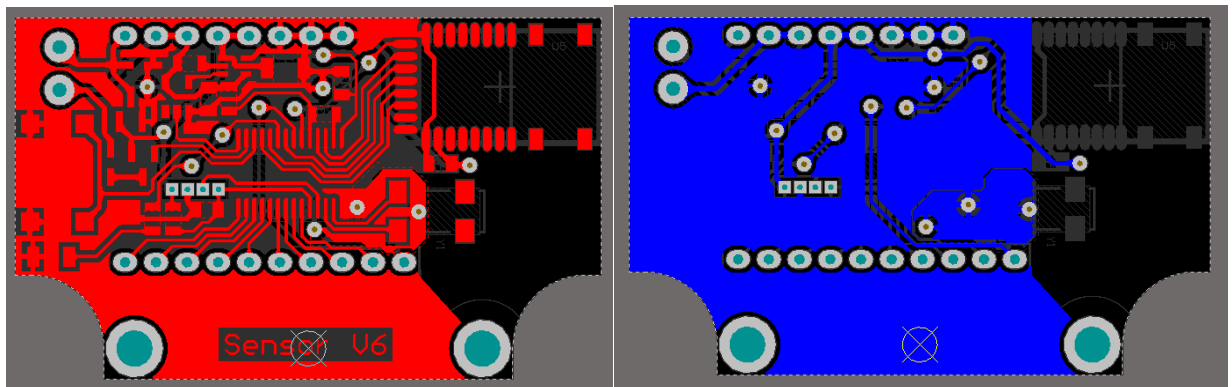
Kiekis:	Pavadinimas bei parametrai:
1	TEXAS INSTRUMENTS TLV1117LV33DCYR LDO, FIXED, 3.3V, 1A, SOT-223-4
1	Laikiklis baterijai ILABL20H CR20xx lituojamas horizontalus
1	HAMMOND 1593KKB dėžutė
2	B0520LW-7-F DIODE, SCKY RECTI, 0.5A, 20V, SOD123
1	FTDI FT232RL IC, USB TO UART, SMD, 28SSOP
1	MULTICOMP MJ-180PH SOCKET, PCB, DC POWER
1	TEXAS INSTRUMENTS SN65HVD11DR DRIVER, RS485, 10MBPS, SOIC-8
1	STMICROELECTRONICS STM32F303CCT6 MCU, 32BIT, CORTEX-M4, 72MHZ, LQFP-48
1	TEXAS INSTRUMENTS SN65C3221EPWR DIFF LINE DRIV/RCVR, RS232, TSSOP-16
1	MULTICOMP R-132G7210100CB CABLE, U.FL - SMA, 100MM, 50OHM
1	LPRS ANTSR900 ANTENNA, STUB R/ANGLED, 868-915MHZ
1	IQD FREQUENCY PRODUCTS LFX TAL003000 CRYSTAL, SMD, 32.768000KHZ, 12.5PF
1	SAMTEC USBR-B-S-S-O-TH CONNECTOR, USB B, RECEPTACLE, THT, R/A
1	WURTH ELEKTRONIK 691214110002 TERMINAL BLOCK, WIRE TO BRD, 2POS, 16AWG
1	WURTH ELEKTRONIK 691214110003 TERMINAL BLOCK, WIRE TO BRD, 3POS, 16AWG
1	MULTICOMP CR2032 CELL, LITHIUM, CR2032, 210MAH, 3V
1	ANAREN A110LR09C00GM MODULE, RF, RADIO, 900MHZ, SPI, U.FL
1	INFINEON ESD24VS2U E6327 DIODE, TVS, 24V, ARRAY, SOT23-3
2	Keraminis SMD kondensatorius, 0805, 10pF, 6.3V
1	Keraminis SMD kondensatorius, 0805, 10nF, 6.3V
14	Keraminis SMD kondensatorius, 0805, 100nF, 6.3V
2	Keraminis SMD kondensatorius, 0805, 1uF, 6.3V
1	Keraminis SMD kondensatorius, 0805, 4.7uF, 6.3V
1	Keraminis SMD kondensatorius, 0805, 10uF, 6.3V
1	SMD induktorius, 0805, 6.8uH
1	SMD rezistorius, 0805, 10k, +-5%
1	SMD rezistorius, 0805, 120, +-5%

Bevielio jutiklio pagaminimui reikalingų komponentų sąrašas

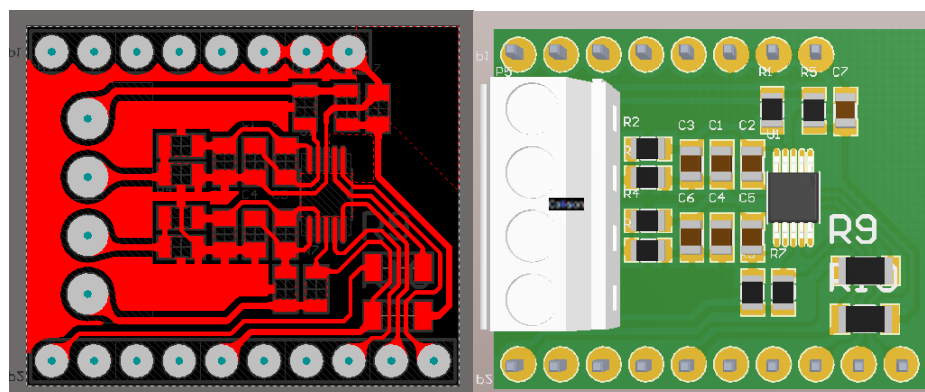
Kiekis:	Pavadinimas bei parametrai:
1	TEXAS INSTRUMENTS MSP430G2553IPW28R MCU, 16BIT, MSP430, 16MHZ, TSSOP-28
1	ANAREN A110LR09A00GM RADIO MODULE, TXRX, CC110L, INT ANT
1	IQD FREQUENCY PRODUCTS LFX TAL003000 CRYSTAL, SMD, 32.768000KHZ, 12.5PF
1	TEXAS INSTRUMENTS TPS61221DCKT IC, VIN BOOST CONV TINY LV 6-SC70
1	TEXAS INSTRUMENTS SN74AUP1G14DBVR IC, INVERTER, SCHMITT TRIGGER, SOT-23-5
1	FAIRCHILD SEMICONDUCTOR FDV302P MOSFET, P, -25V, 0.12A, DIGITAL, SOT-23
1	FAIRCHILD SEMICONDUCTOR FDV303N MOSFET, N, 25V, 680MA, SOT-23
1	INFINEON BAT 60A E6327 RECTIFIER, SCHOTTKY, 3A, 10V, SOD-323
1	NXP RB751V40 DIODE, RECT SCH, 40V, 0.12A, SOD323
1	TDK C3216X7S0J476M160AC CAP, MLCC, X7S, 47UF, 6.3V, 1206
1	WURTH ELEKTRONIK 74479776247 INDUCTOR, PMI 0806, 4.7UH, 1A 20%
1	TEXAS INSTRUMENTS ADS1118IDGSR ADC, 16BIT, TEMP SENSOR, 10MSOP
2	691214110002 terminal block, 2POS
1	KEYSTONE 1017
1	C & K COMPONENTS PTS645SL50-2 LFS TACTILE SWITCH, SPST, 0.05A, 12VDC, THD
1	AVAGO TECHNOLOGIES HLMP-1700 LED, 3MM, RED, 2.1MCD, 626NM
1	FCI 77311-818-36LF CONNECTOR, HEADER, THT, 2.54MM, 36WAY
1	HARWIN M52-040023V2045 HEADER, VERTICAL, 1ROW, 20WAY
3	SMD rezistorius, 0805, 10M, +-5%
4	SMD rezistorius, 0805, 1M, +-5%
5	SMD rezistorius, 0805, 510, +-5%
1	SMD rezistorius, 0805, 47k, +-5%
2	SMD rezistorius, 0805, 100k, +-5%
9	Keramikinis SMD kondensatorius, 0805, 100nF, 6.3V
1	Keramikinis SMD kondensatorius, 0805, 10uF, 6.3V
1	Keramikinis SMD kondensatorius, 0805, 1nF, 6.3V

P-3. Suprojektuotos spausdintinio montažo plokštė „Altium Designer“ aplinkoje

Suprojektuota bevielio jutiklio spausdintinio montažo plokštė



Suprojektuota ADS1118 priedėlio spausdintinio montažo plokštė



Suprojektuota koncentratoriaus spausdintinio montažo plokštė

