



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTRONIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

Darius Baronas

FRIKČINĖS DVIRAČIO PAVAROS KONTROLĖS SISTEMOS
PROJEKTAVIMAS IR TYRIMAS
MAGISTRO BAIGIAMASIS DARBAS

Vadovas

Doc. dr. Marius Saunoris

KAUNAS, 2015

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTRONIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

FRIKČINĖS DVIRAČIO PAVAROS KONTROLĖS SISTEMOS
PROJEKTAVIMAS IR TYRIMAS

Magistro projektas
Elektronikos inžinerija (621H61002)

Vadovas
Doc. dr. Marius Saunoris

Recenzentas
Doc. dr. Darius Andriukaitis

Projektą atliko
Darius Baronas

KAUNAS, 2015



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Darius Baronas

(Studento vardas, pavardė)

Elektronikos inžinerija, 621H61002

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Frikinės dviračio pavaros kontrolės sistemos projektavimas ir tyrimas

AKADEMINIO SAŽINGUMO DEKLARACIJA

20 15 m. gegužės 18 d.
Kaunas

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

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Baronas, D. Frikcinės dviračio pavaros kontrolės sistemos projektavimas ir tyrimas. *Elektronikos inžinerijos magistro* baigiamasis projektas / vadovas Doc. Dr. M. Saunoris; Kauno technologijos universitetas, elektros ir elektronikos fakultetas, elektronikos inžinerijos katedra.

Kaunas, 2015. 70 psl.

SANTRAUKA

Darbe suprojektuota, praktiškai realizuota ir ištirta frikcinės dviračio pavaros kontrolės sistema.

Analitinėje dalyje apžvelgiami alternatyvios energijos šaltiniai, tinkantys frikcinės dviračio pavaros kontrolės sistemos maitinimui užtikrinti, pedalų mynimo krypties nustatymo būdai, aprašomi gaunamos energijos valdymo būdai.

Projektinėje dalyje suprojektuojami atskiri visos sistemos mazgai, atliekami modeliavimai. Sudaroma principinė schema ir suprojektuojama PCB plokštė.

Tyrimų dalyje išnagrinėjamos realizuoto energijos šaltinio charakteristikos, ištirtas sukimosi krypties nustatymo ir bevielio ryšio veikimas. Parašyta programinė įranga. Apskaičiuoti frikcinės dviračio pavaros kontrolės veikimo laikai.

Baronas, Darius. Design and research of control system for friction bicycle module. Final project of *Electronics Engineering master/* supervisor Doc. Dr. M. Saunoris; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of electronic engineering.

Kaunas, 2015. 70 psl.

SUMMARY

The object of this study is to design and research friction bicycle module control system.

The analytical part provides with an overview of alternative energy sources suitable to provide with the energy amount sufficient for analysed control system requirements. The methods for system power control and correct pedalling direction detection are also analysed.

In the design part all individual system nodes are designed, simulated and circuit diagram is made. Additionally, the designed PCB board is presented.

In the third part of the study all designed energy source characteristics are investigated, and experimentally tested operation of pedalling direction detection is presented. The results of micro-controller and RF module wireless communication implementation are also provided. Conclusion is made.

SANTRUMPŲ IR ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS

- RPM (*angl. Rotations Per Minute*) – apsisukimai per minutę.
- EH (*angl. Energy Harvesting*) – energijos pasisavinimas iš aplinkos.
- MPP (*angl. Maximum Power Point*) – maksimalios galios taškas.
- MPPT (*angl. Maximum Power Point Tracking*) – maksimalios galios sekimas.
- PV (*angl. Photovoltaic Cell*) - fotovoltaninė celė, saulės elementas.
- RF (*angl. Radio Frequency*) – radijo dažnis.
- TEG (*angl. Thermoelectric Generator*) – termoelektrinis generatorius.
- PEG (*angl. Pyroelectric generator*) – piroelektrinis generatorius.
- WEH (*angl. Wind Energy Harvesting*) – vėjo energijos pasisavinimas.
- LDO (*angl. Low-Dropout Regulator*) – linijinis įtampos reguliatorius.
- PWM (*angl. Pulse Width Modulation*) – pulso pločio moduliacija.
- CCM (*angl. Continuous Conduction Mode*) – DC –DC keitiklio režimas, kuomet induktyvumo srovė nenukrenta iki nulio.
- DCM (*angl. Discontinuous Conduction mode*) - DC –DC keitiklio režimas, kuomet induktyvumo srovė nukrenta iki nulio.
- ULP (*angl. Ultra Low Power*) – ultra maža galia.
- AC – (*angl. Alternating Current*) – kintama srovė.
- DC (*angl. Direct Current*) – nuolatinė srovė.
- UV (*angl. Undervoltage*) – per žema įtampa.
- ESR (*angl. Equivalent series resistance*) - ekvivalentinė nuoseklaus jungimo varža
- MEC (*angl. Micro-energy cell*) – mažo talpumo baterijos, skirtos pasisavinamos energijos iš aplinkos kaupimui.

TURINYS

| | |
|---|----|
| SANTRUMPŲ IR ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS..... | 6 |
| ĮVADAS..... | 9 |
| 1. ANALITINĖ DALIS..... | 10 |
| 1.1. Esamos elektrinių dviračių pavaros kontrolės sistemos..... | 10 |
| 1.2. Siūloma frikcinės dviračio pavaros kontrolės sistema | 12 |
| 1.2.1. Alternatyvios energijos šaltinis | 14 |
| 1.2.2. Valdymo grandinės | 22 |
| 1.2.3. Bevielė sąsaja | 30 |
| 1.3. Apibendrinimai..... | 30 |
| 2. PROJEKTINĖ DALIS | 31 |
| 2.1. Frikcinės pavaros kontrolės blokinės schemos sudarymas | 31 |
| 2.2. Alternatyvios energijos šaltinis ir jo modeliavimas | 32 |
| 2.3. Sukimosi krypties nustatymo realizavimas | 37 |
| 2.4. Įtampos daugiklio ir diodų tiltelio modeliavimas ir elementų parinkimas..... | 38 |
| 2.5. Valdymo grandinių projektavimas | 41 |
| 2.6. Bevielė sąsaja | 45 |
| 2.7. Realizuota sistema ir jos veikimo algoritmas..... | 47 |
| 2.8. Apibendrinimai..... | 51 |
| 3. EKSPERIMENTINĖ DALIS | 52 |
| 3.1. Energijos šaltinio charakteristikų tyrimas | 52 |
| 3.2. Įtampos daugiklio ir diodų tiltelio tyrimas | 54 |
| 3.3. Sukimosi krypties nustatymo tyrimas | 59 |
| 3.4. Bevielė sąsaja | 60 |
| 3.5. Galios suvartojimas | 63 |
| 3.6. Apibendrinimai..... | 65 |
| IŠVADOS..... | 66 |
| LITERATŪROS ŠALTINIAI..... | 67 |
| PRIEDAI..... | 71 |

| | |
|---|----|
| Priedas 1. Sutrasuota eksperimentinė PCB plokštė..... | 71 |
| Priedas 2. PCB plokštės 3D vizualizacija | 71 |
| Priedas 3. Sulituota eksperimentinė PCB plokštė | 71 |
| Priedas 4. Programos kodas | 72 |

IVADAS

Unikalus gaminys – frikcinė dviračio pavarą „Rubbee“. Tai per keletą sekundžių prie bet kokio dviračio montuojama pavarą, paverčianti įprastą dviratį elektriniu. Greitis reguliuojamas rankenėle, montuojama ant vairo. Prasidėjus šio gaminio prekybai iškilo įvairių problemų, pvz., kadangi pavarą turi baterijų bloką, siuntimas į užsienio šalis gana komplikotas, keletas programinių klaidų ir pan. Dabar visos šios problemos iki galo išspręstos, išskyrus vieną – pavaros greičio valdymas rankenėle. Paaiškėjo, kad toks greičio reguliavimas yra negalimas, nes tai jau yra nebe dviratis, o elektrinė transporto priemonė, kurią reikia ir registruoti kaip elektrinę. Dviratininkas negali naudoti tik „Rubbee“ galios važiavimui, visiškai nemindamas pedalų. Šiai problemai spręsti yra vienintelis kelias – pavaros veikimas privalo būti automatinis ir susietas su minimo ir paties dviračio greičiu.

Frikcinės dviračio pavaros kontrolės sistemos unikalumas – autonominis maitinimas panaudojant elektromagnetinę indukciją, sukimosi krypties nustatymas panaudojant energijos šaltinio mechaninės konstrukcijos savybes ir bevielė komunikacija su frikcinės pavaros valdymo bloku. Tokia sistema galėtų būti pritaikyta bet kur, kur yra rotacinis judėjimas.

Darbo tikslas – suprojektuoti ir ištirti frikcinės dviračio pavaros kontrolės sistemą. Tikslui pasiekti iškeliami uždaviniai:

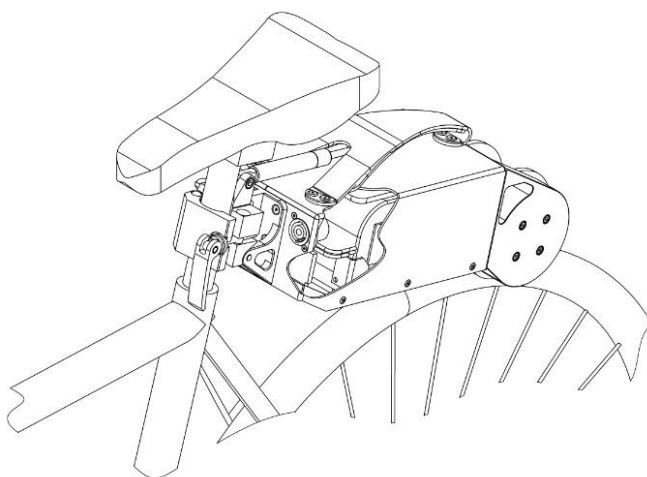
1. Atlikti panašių sistemų analizę
2. Atlikti projektuojamai kontrolės sistemai reikalingų sprendimų analizę
3. Suprojektuoti dviračio frikcinės pavaros kontrolės sistemą
4. Atlikti projektuojamos sistemos sudedamųjų dalių modeliavimą
5. Atlikti praktiškai realizuotos dviračio frikcinės pavaros kontrolės sistemos eksperimentinius tyrimus
6. Palyginti modeliavimo ir eksperimentinių tyrimų metu gautus rezultatus

1. ANALITINĖ DALIS

Projektuojant dviračio frikcinės pavaros kontrolės sistemą pravartu apžvelgti kitų gamintojų taikomus sprendimus elektriniuose dviračiuose, išanalizuoti energijos gavimo iš aplinkos būdus. Gauti rezultatai padeda išsirinkti tinkamus komponentus, atitinkančius sistemos reikalavimus, bei sudaryti mechaninę dalį.

1.1. Esamos elektrinių dviračių pavaros kontrolės sistemos

Dauguma elektrinių dviračių elektriniais virsta jau gamykloje, turėdami integruotas galios valdymo sistemas, greičio, minimo ir kitus daviklius. Geriausi žinomi yra „Audi“ ir „Bosch“ elektriniai dviračiai. „Bosch“ taipogi siūlo sistemą, kurią sumontavus įprastas dviratis taptų elektriniu. Kiti gamintojai, tokie kaip „Dillenger“ siūlo elektrinio dviračio sistemas, kurias norint sumontuoti reikia keisti galinį ratą, kurio stebulėje įmontuotas variklis. Lietuvoje, UAB „Elinta“ įmonėje sukurta elektrinio dviračio sistema – „Rubbee“, paverčianti dviratį elektriniu nepakeičiant ar nenuimant nei vienos originalios dviračio detalės. Frikcinės pavara ir jos tvirtinimas pavaizduotas 1.1 pav.



1.1 pav. Frikcinė dviračio pavara „Rubbee“ [1]

Pavara tvirtinasi ant sėdynės laikiklio ir savo svoriu atsiremia į galinį dviračio ratą. Visą vidinę „Rubbee“ sistemą sudaro:

- Akumuliatorių blokas
- Elektrinis variklis
- Valdymo elektronika

Dviračiuose naudojami minimo sensoriai (*angl. Cadense sensors*) yra įrenginiai, skirti dviratininko minamų pedalo apsisukimų per minutę skaičiavimui. Šiuos sensorius naudoja žmonės, kuriems važiavimas dviračiu yra ne laisvalaikio praleidimas, o sportas. „Lėtam” minimui priskiriamas 60-70 RPM (*angl. Rotations Per Minute*) minimo dažnis. Sportuojančių dviratininkų minimo dažnio vidurkis yra apie 90 RPM, tačiau ne retai trumpose distancijose kylantis iki 170 RPM.

Egzistuoja dvi minimo sensorių rūšys: pavieniai sensoriai, ir sensoriai kartu su dviračio kompiuteriu. Minimo sensorius gali būti:

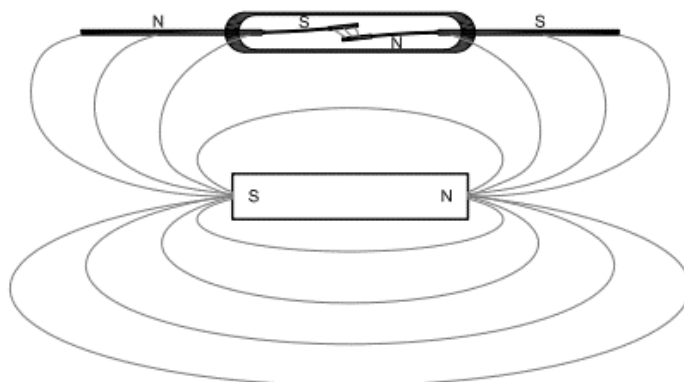
1. Dviejų dalių minimo sensorius. Ant judamos dalies (ratas, švaistiklis ir kt.) tvirtinamas magnetas, o ant nejudamos – magnetinio lauko jutiklis, kuris gali būti:
 - a. Holo sensorius [2]
 - b. Herkonas
 - c. Induktyvinė ritė

Magnetas, prasilenkdamas su jutikliu duoda impulsą minimo sensoriaus viduje esančiai elektronikai, kuri fiksuoja pedalo apsisukimą.

2. Vienos dalies minimo sensorius. Tvirtinamas ant švaistiklio. Sensoriaus veikimas pagrįstas vidiniu akcelerometru, fiksuojančiu judėjimą ratu. Rinkoje yra optinių minimo sensorių, tačiau jie naudojami tik treniruokliams.

Holo sensorius yra aktyvinis elementas, o herkonas – pasyvinis, todėl jo pritaikymas mažos galios sistemoje yra tinkamesnis.

Herkonas sudarytas iš dviejų stikliniame korpuse esančių magnetinių kontaktų. Viduje sukuriamas vakuumas arba užpildoma inertinėmis dujomis. Dažnai naudojamas automobilių apsaugos sistemose [3]. Didžiausias jų minusas – stiklinių korpusų trapumas. 1.2 Pav. pavaizduotas herkoninis sensorius ir jo veikimo principas.



1.2 pav. Herkoninio jutiklio veikimo principas [4]

Stiprėjant išoriniam magnetiniam laukui ir esant tam tikrai magnetinio lauko stiprio vertei, herkonų kontaktai įsimagnetina ir susiglaudžia. Išoriniam magnetiniam laukui silpnėjant, kontaktai atsijungia prie mažesnio magnetinio lauko stiprio nei prieš tai susijungė. Kadangi kontaktai mechaniniai, pasireiškia „virpėjimo“ efektas, kuomet susijungimo metu kontaktai vietoj vieno karto, susijungia ir atsijungia keletą kartų. Didesnių herkonų kontaktų „virpėjimo“ laikas gali būti 50-100μs, o mažesnių 100-500μs ribose. Šią problemą galima spręsti programiniu arba techniniu būdu.

1.2. Siūloma frikinės dviračio pavaros kontrolės sistema

Paaikėjus, kad greičio valdymo rankenėlės pritaikymas dviračiui yra negalimas, kaip laikinas sprendimas buvo pasirinktas sukimosi sensorius (*angl. Pass Sensor*) (1.3 pav.) . Plastikinis žiedas tvirtinamas ant sukimosi ašies, o šalia įtvirtintas holo sensorius, maitinamas iš dviračio frikinės pavaros maitinimo bloko. Vykstant mynimui, pavaros valdymo elektronika gauna impulsus, atlieka jų vidurkinimą ir esant didesniai nei 5km/h pavaros variklio sukimo greičiui elektronika įjungia patį variklį.



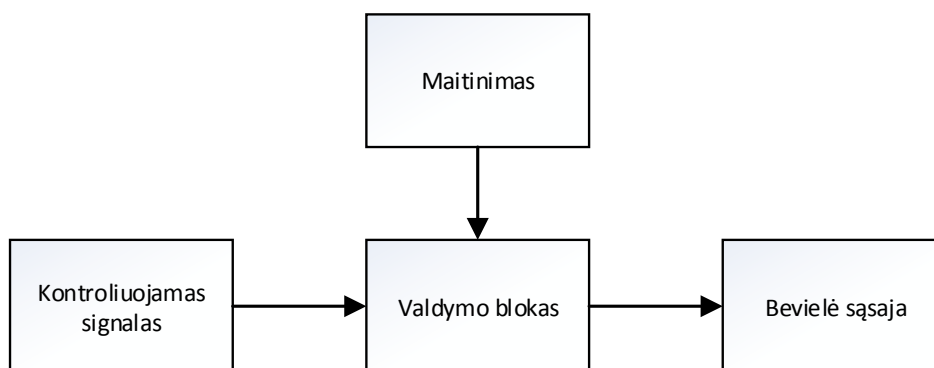
1.3. Laikinas sukimosi sensorius

Šio sprendimo trūkumai:

- Sensorius yra aktyvinis, todėl būtinas 5V maitinimas.
- Kiekvieną kartą reikia prijungti prie pavaros
- Sistema apgaunama pedalus minant atgal

„Rubbee“ turi tik vieną jungtį, kurios pagalba įkraunamas baterijų blokas, o prieš važiuojant prijungiamas minimo sensorius, kurį pamiršus prijungti sistema neveiks.

Siūlomos frikinės dviračio pavaros kontrolės sistemos funkcinė schema pavaizduota 1.4 pav.

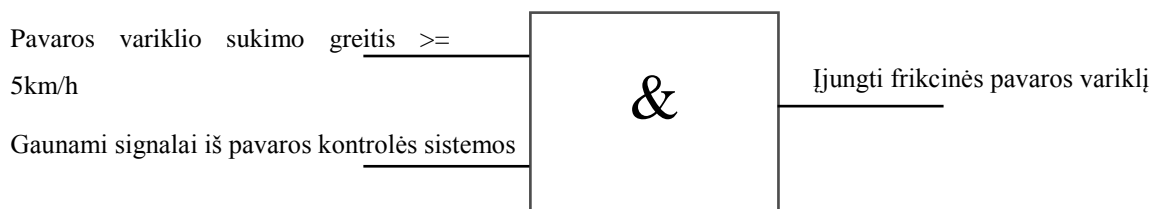


1.4 pav. Siūlomos frikinės dviračio pavaros kontrolės sistemos funkcinė schema

Sistemos idėja ir išskirtinumas:

- Maitinimui pritaikius alternatyvų/atsinaujinantį energijos šaltinį išnyktų energijos kaupimo elemento aptarnavimo poreikis.
- Integravus minimo krypties nustatymo funkciją, nebūtų galimybės apgauti sistemą minant pedalus atbulai.
- Vietoj laidinės sistemos būtų bevielė sąsaja.
- Važiuojant be frikinės pavaros, bevielė sąsaja būtų atjungta ir neekvotų energijos saugojimo elemento.
- Net važiuojant be frikinės pavaros, energijos kaupimo elementas būtų įkraunamas.
- Frikcinė pavara neveiktų esant neaktyviai kontrolės sistemai

Frikcinės pavaros variklio įsijungimo sąlygas galima aprašyti kai vieną loginio IR bloką.



1.5 pav. Būtinios sąlygos frikinės pavaros veikimui

Toliau darbe bus apžvelgiami alternatyvios energijos šaltiniai ir jų pasisavinimo būdai, kuriuos būtų įmanoma pritaikyti energijos gavimui važiuojant dviračiu.

1.2.1. Alternatyvios energijos šaltinis

Energijos pasisavinimas iš aplinkos EH (*angl. Energy Harvesting*) tobulėjant technologijoms tampa vis populiariesnis. Įprastas baterijas keičia energijos keitikliai, kurie aprūpina energija visą bevielio ryšio sistemą. Egzistuoja gana daug alternatyvios energijos šaltinių [6], dviračiui teoriškai įmanoma pritaikyti šiuos energijos šaltinius:

- Šviesa
- Vėjas
- Temperatūra
- Magnetinė energija
- Vibracijos

Šviesos energija

Šviesos energija konvertuojama į elektros energiją panaudojant saulės elementus, dar vadinamus fotovoltaniniais elementais (*angl. PV cell*). Įprasti saulės elementai sudaryti iš puslaidininkio silicio užima didžiausią rinkos dalį, tačiau jau kuriami nauji, nanotechnologijų pagrindu pagrįsti saulės elementai. Nanotechnologijų pagrindu kuriami saulės elementai vadinami trečiosios kartos elementais. Vidutinė galia iš saulės yra lygi 100-1000W/m² lauko ir <10 W/m² kambario sąlygomis [7].

Pagrindinis saulės elementų trūkumas – mažas naudingumo koeficientas, kuris yra įtakojamas vidinės krūvininkų rekombinacijos, žemo fotonų sugerties ir didelio atspindžių lygio. Sugerties lygis gali būti padidinamas kombinuojant skirtingų tipų medžiagas, o atsispindėjimas mažinamas naudojant antirefleksinį sluoksnį saulės elemento paviršiuje [8] arba fokusuojant šviesos spindulius panaudojant optiką. [9].

Svarbiausi saulės elementų parametrai [9]:

- Atviros grandinės įtampa (V_{oc}) : saulės elemento įtampa be apkrovos;
- Užtrumpintos grandinės srovė (I_{sc}) : srovė, tekanti užtrumpinus saulės elemento išvadus;
- Užpildymo faktorius (*angl. Fill Factor*). Parametras, parodantis I-V kreivės statumą; Teoriškai gali būti lygus 1. Apskaičiuojamas pagal formulę:

$$FF = \frac{I_{MP} \cdot V_{MP}}{I_{SC} \cdot V_{OC}}, \quad (1.1)$$

čia I_{MP} – srovė maksimalios galios taške, A; V_{MP} – įtampa maksimalios galios taške, V; I_{SC} – trumpo jungimo srovė, A; V_{OC} – atviros grandinės įtampa, V.

- Maksimali galia Taškas, kuriame išėjimo galia yra didžiausia vadinamas maksimalios galios tašku MPP (*angl. Maximum Power Point*). Tašką galima rasti žinant elemento charakteristikas pasinaudojus I-U kreivėmis. Išėjimo galia apskaičiuojama pagal formulę:

$$P_{\max_i\ddot{s}} = I_{SC} \cdot V_{OC} \cdot FF, \quad (1.2)$$

čia I_{SC} – trumpo jungimo srovė, A; V_{OC} – atviros grandinės įtampa, V; FF – užpildymo faktorius, bedimensinis dydis.

- Efektyvumas: saulės elemento efektyvumas apibrėžiamas kaip elemento maksimalios išėjimo ir iš šviesos šaltinio į saulės elemento paviršių krentančios galių santykis.

$$\eta = \frac{P_{\max_i\ddot{s}}}{E \cdot A_C}, \quad (1.3)$$

čia $P_{\max_i\ddot{s}}$ – maksimali galia ląstelės išėjime, W; E – šviesa įėjime, W/m^2 ; A_C – ląstelės paviršius plotas (m^2) [10].

Skirtingų tipų saulės elementų efektyvumas vienodomis sąlygomis (esant $1000W/m^2$ apšviestumui ir $25C^\circ$ temperatūrai).

Šaltinyje [11] pateiktas saulės elemento modelis su matematinėmis formulėmis, I-V kreivių pavyzdžiais ir kita informacija apie saulės elementus.

1.1 lentelė. Saulės elementų efektyvumo palyginimas [12]

| Saulės elemento tipas | Efektyvumas (%) |
|---|-----------------|
| Pirmoji karta | |
| Monokristalinis silicis | 25.0±0.5 |
| Antroji karta | |
| Amorfinis silicis | 10.1±0.3 |
| CdTe (kadmio teluridas) | 19.6±0.4 |
| CIGS (vario indžio galio selenidas) | 18.7±0.6 |
| Trečioji karta | |
| DSCC (dažais pajautrintos saulės celės) (dye- sensitized solar cell) | 11.9±0.4 |
| GaAs (galio arsenidas) | 38.8±1.9 |

Iš šaltinyje pateiktų saulės elemento charakteristikų matomas elemento maksimalios galios sekimo algoritmo reikalingumas. Elementas turi būti apkrautas tiek, kad jo įtampa nukristų apie 20proc. palyginus su atviros grandinės įtampa.

Vėjo energija

Energijos pasisavinamas WEH (*angl. Wind Energy Harvesting*) naudojant vėjo turbinų generatorius žinomas ir naudojamas seniai. Vėjo greitis prie žemės kinta priklausomai nuo

aukščio. Žinant greitį viename aukštyje, galima apskaičiuoti vėjo greitį kitame aukštyje naudodami formulę [13]:

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^m, \quad (1.4)$$

čia v_2 [m/s] ir v_1 [m/s] yra vėjo greičiai atitinkamai h_2 [m] ir h_1 [m] aukščiuose, m – faktorius, įvertinantis paviršiaus lygumą ir atmosferos stabilumą.

Galia, vėjui pučiant greičiu v į A ploto vėjo turbinos mentes išreiškiama formule:

$$P(v) = \frac{1}{2} \rho A v^3, \quad (1.5)$$

čia P – galia, W; ρ – oro tankis, kg/m^3 ; A – menčių plotas, m^2 ; v – vėjo greitis, m/s.

Naujas vėjo energijos pasisavinimo būdas – beturbininė sistema (1.6 Pav.), paremta vibruojančios lanksčios membranos ir elektromagnetinės indukcijos principu.



1.6 pav. Beturbininė vėjo generatoriaus sistema [14]

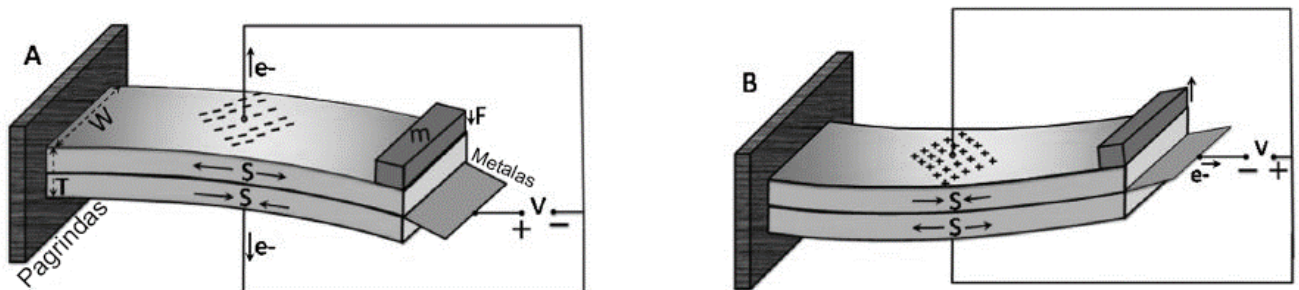
Kuo membrana ilgesnė, tuo mažesnio vėjo greičio reikia jai judinti. Prie membranos pritvirtintas magnetas vibruoja tarp dviejų ričių, indukuodamas įtampą.

Vibracijų energija

Vibracijų energija į elektros energiją konvertuojama dviem žingsniais. Aplinkos vibracija perduodama energijos keitikliui, suteikiant mechaninius svyravimus tarp dviejų elementų, panaudojant svorį ir spyruoklę (mechaninė – mechaninė energija keitiklis), po to mechaninis svyravimas konvertuojamas į elektros energiją (mechaninė – elektros energija keitiklis). Kadangi aplinkos vibracijos dažniausiai yra mažos amplitudės, spyruoklės-masės sistema generuoja rezonansinį dažnį, sustiprindama aplinkos virpesių amplitudę, taip tuo pačiu padidindama generuojamą galią. Važiuojant dviračiu mechaninę vibracijų energiją būtų galima konvertuoti panaudojant pjezoelektrinį keitiklį.

Nuo mechaninės energijos pobūdžio (tempimas, gniuždymas) ir dydžio, priklauso pjezoelektriko galuose susidaranti įtampos poliarumas ir dydis.

Įprastas pjezoelektrinis generatorius susideda iš dviejų pjezoelektrinių ir vienos metalo plokštelės, bei masės, pritvirtintos gale. Masės paskirtis – palengvinti svyravimą ir padidinti mechaninę jėgą, tenkančią pjezoelektrikams. 1.7 pav. pavaizduota pjezoelektrinio generatoriaus sandara.



1.7 pav. Pjezoelektrinis generatorius [15]

A paveikslėlyje, generatorius veikiamas iš viršaus į apačią. Viršutinis sluoksnis tempiamas, o apatinis gniuždomas. Gniuždymo ir tempimo jėgoms poliarizacija yra priešinga, todėl metalinė plokštelė esanti viduryje įgauna teigiamą, o išorinės pjezoelektrikų pusės – neigiamą krūvius. B paveikslėlyje – atvirkščias veikimas, todėl vidurinis sluoksnis įgauna neigiamą, o išoriniai – teigiamą krūvius. Bendras sukauptas krūvis Q ir įtampa V priklauso nuo generatoriaus konstrukcijos, išreiškiamas formulėmis [15]:

$$Q = \frac{3FL^2}{T^2} \cdot d, \quad (1.6)$$

$$V = \frac{3FL}{4WT} \cdot g, \quad (1.7)$$

čia F – jėga, N; L – pjezoelektrinių plokštelių ilgis, m; W – pjezoelektrinių plokštelių plotis, m; T – plokštelių storis, m; d – pjezoelektrinis deformacijos koeficientas, C/N; g – pjezoelektrinis įtampos koeficientas, Vm/N.

Remiantis 1.6 ir 1.7 formulėmis, svarbiausios pjezoelektrinių medžiagų savybės yra pjezoelektrinis deformacijos koeficientas ir pjezoelektrinis įtampos koeficientas.

Pjezoelektrikus pagal kilmę galima suskirstyti į keletą grupių [16]. 1.2 lentelėje pateikiami pjezoelektrinės keramikos (BaTiO_3 , $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$) ir pjezoelektrinio polimero polivinideno florido parametrų palyginimai.

1.2 lentelė. Pjezoelektrikų palyginimas

| Lyginimo požymis | Matavimo vienetai | Bario titanatas (BaTiO_3) | Švino cirkonato titanatas | Polivinideno floridas |
|------------------|-------------------|--------------------------------------|---------------------------|-----------------------|
|------------------|-------------------|--------------------------------------|---------------------------|-----------------------|

| | | | | |
|---|-----------------------|----|-------------------------|-----|
| | | | Pb(Zr,Ti)O ₃ | |
| Pjezoelektrinis deformacijos koeficientas (d) | 10 ⁻¹² C/N | 78 | 110 | 23 |
| Pjezoelektrinis įtampos koeficientas (g) | 10 ⁻³ Vm/N | 5 | 10 | 216 |

Pjezoelektriniai generatoriai pasižymi pastoviu išėjimo impedansu, kuris paprastai yra nuo 10kΩ iki 100kΩ ribose, todėl išėjimo įtampa kinta tiesiškai priklausomai nuo mechaninio poveikio. Tik esant rezonansiniam dažniui iš pjezoelektrinio keitiklio galima pasisavinti didžiausią galią (2-3 Hz rezonansinio dažnio aplinkoje) [17].

Elektromagnetinės radijo dažnio bangos

Elektromagnetinių radijo dažnio bangų energija pasisavinama panaudojant anteną bangų priėmimui ir įtampos lygintuvą signalo konvertavimui į DC įtampą. Galios dydis tenkantis energijos kaupimo elementui (P_{DC}) priklauso nuo RF (*angl. Radio Frequency*) spinduliuotės galios aplinkoje (P_{RF}) ir konvertavimo efektyvumo $\eta_{RF/DC}$ išreiškiamas formule [18]:

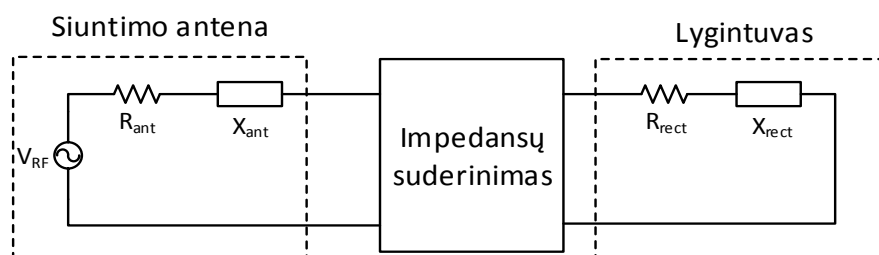
$$P_{DC} = \eta_{RF/DC} \cdot P_{RF}, \quad (1.8)$$

Atviroje erdvėje sklindančio signalo galia mažėja didėjant atstumui. Ši formulė galioja tik atviroje erdvėje be kliūčių, nes realiomis sąlygomis egzistuoja atspindžiai, kliūtys (pastatai, medžiai, kalnai), dėl ko galia dar labiau sumažėja [19].

$$P_r = \frac{A_r \cdot A_t}{d^2 \cdot \lambda^2} \cdot P_t, \quad (1.9)$$

čia P_r – priėmimo antenos išėjimo galia, W; P_t – siųstuvo signalo galia, W; A_r – efektyvus priėmimo antenos plotas, m²; A_t – efektyvus siųstuvo antenos plotas, m²; λ – bangos ilgis, m; d – atstumas tarp antenų, m.

Išėjimo galia priklauso ne tik nuo įėjimo galios, bet ir nuo priėmimo antenos dydžio, formos bei impedansų suderinimo su lyginimo grandine. Nors impedansų suderinimo grandinė įneša galios nuostolių, tačiau užtikrina maksimalų galios perdavimą tolimesnei grandinei. Tipinis antenos ir lygintuvo modelis pateiktas 1.8 paveiksle [20].



1.8 pav. Priėmimo antenos ir lygintuvo modelis

Straipsnyje [21] pateikiami eksperimentiniai bandymai, kurių metu naudojant RF-DC keitiklius pasisavinama energija iš keletos dažnių juostų. 1.3 lentelės rezultatai rodo palyginti mažą elektromagnetinės energijos tankį, kurią panaudoti realioje grandinėje būtų sudėtinga.

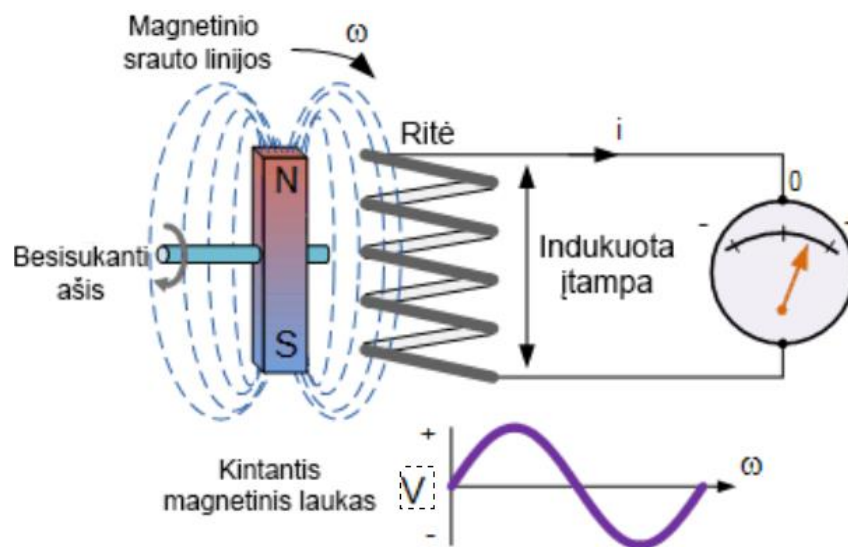
1.3 lentelė. Elektromagnetinės energijos tankiai [21]

| Dažnių juosta | Energijos tankis (nW/cm ²) |
|---------------|--|
| GSM900 | 28 |
| GSM1800 | 68 |
| 3G | 122 |

Tame pačiame straipsnyje pateikiamas pavyzdys pasisavinamos energijos padidinimui naudojant keletą antenų su skirtingomis galios valdymo grandinėmis, tačiau prijungtomis prie vienos bevielės sistemos.

Magnetinė energija

Indukuotoji elektrovara gaunama laidininkui judant magnetiniame lauke, arba esant laidininkui patalpintam į kintamą magnetinį lauką. Magnetinė energija pasisavinama panaudojus induktyvines rites.



1.9 pav. Indukuota elektrovara

Aplink maitinimo laidus, kuriais teka AC srovė susidaro magnetinis laukas. Į šį magnetinį lauką patalpinus laidininką (ritę), jo galuose generuojama įtampa. Laidininko, statmeno magnetiniam laukui magnetinis srautas [22] :

$$\varphi = NBA, \quad (1.10)$$

čia: φ – magnetinio lauko srautas, Wb; B – magnetinio lauko srauto tankis, T; A – laidininko plotas, m^2 .

Magnetinis laukas atstumu r nuo begalinio ilgio laidininko, kuriame teka ω dažnio I_0 kintama srovė:

$$B = \frac{\mu_r \mu_0 I_0 \sin(\omega t)}{2\pi r}, \quad (1.11)$$

Indukuota įtampa priklausomai nuo magnetinio srauto kitimo:

$$V = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{NA\mu_r \mu_0 I_0 \omega \sin(\omega t)}{2\pi r}, \quad (1.12)$$

čia V – indukuota įtampa, V; N – ritės vijų skaičius; μ_r – aplinkos medžiagos absoliutinė magnetinė skvarba, H/m; μ_0 – magnetinė konstanta, H/m; φ – magnetinio lauko srautas, Wb; t – laikas, s; ω – kampinis dažnis, rad/s; r – atstumas iki laidininko, m.

1.12 formulė rodo, kad magnetiniame lauke esančioje ritėje indukuota įtampa yra proporcinga dažniui ω , vijų skaičiui N ir plotui A , bei atvirkščiai proporcinga atstumui r .

Įtampa indukuojama ritėje, patalpintoje į kintamą magnetinį lauką [48]:

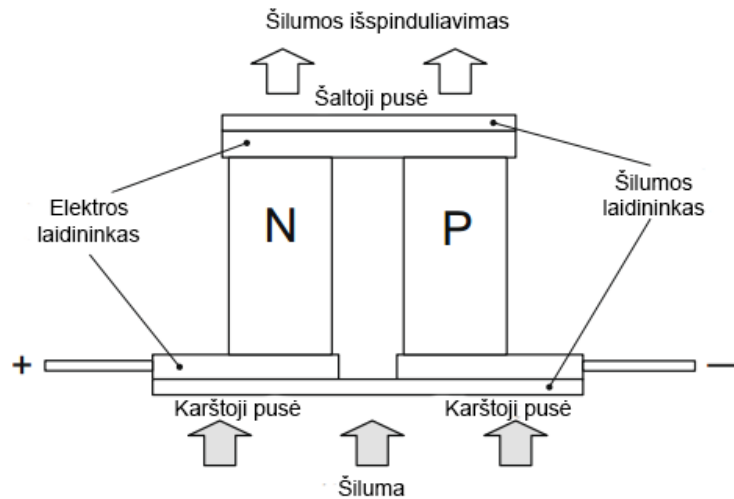
$$V = \frac{d\varphi}{dt} = N \cdot \frac{d(B \cdot A \cdot \cos(\theta))}{dt}, \quad (1.13)$$

čia V – indukuota įtampa, V; N – ritės vijų skaičius; φ – magnetinio lauko srautas, Wb; t – laikas, s; $\cos(\theta)$ - kampas tarp magnetinio lauko ir ritės, laipsniais, B – magnetinio lauko srauto tankis, T;

Iš 1.13 formulės pastebėta, kad maksimali indukuota įtampa gaunama, kai kampas $\cos(\theta)$ yra 90 laipsnių.

Šilumos energija ir termogeneratoriai

Mažų galių sistemose energijos išgavimui iš šilumos plačiausiai naudojami termoelektriniai generatoriai TEG (*angl. Thermoelectric Generator*). TEG elementai sudaryti iš nuosekliai sujungtų termoporų, o termoporos iš n ir p legiruočių puslaidininkių, kurių viena pusė sujungta tarpusavyje naudojant laidininką.



1.10 pav. TEG elemento sandara [23]

Tipiškai, viename elemente yra sudaroma daugiau nei 120 sujungimų, norint išgauti iš elemento “apčiuopiamą” įtampą [23].

Svarbiausi TEG parametrai yra susieti tarpusavyje ir pateikti kaip bedimensinis kokybės koeficientas Z , išreiškiamas formule [24] [25] :

$$ZT = \frac{\sigma \cdot S^2 \cdot T}{k}, \quad (1.14)$$

čia S – Seebeko koeficientas, V/K; σ – elektrinis laidumas, A/(V·m), T – absoliutinė temperatūra, K; k – šiluminis laidumas, W/(m·K).

TEG naudingumo koeficientas išreiškiamas formule :

$$\eta = \left(\frac{T_C - T_H}{T_H} \right) \cdot \left(\frac{\sqrt{1 + Z\bar{T}} - 1}{\sqrt{1 + Z\bar{T}} + \frac{T_C}{T_H}} \right), \quad (1.15)$$

čia: T_H – karštos pusės temperatūra, K; T_L – šaltos pusės temperatūra, K; \bar{T} – T_H ir T_L vidurkis, K; Z – kokybės koeficientas;

Komeraciškai gaminamuose TEG elementų ZT koeficientas mažesnis nei ~ 1 , o paties elemento efektyvumas retai viršija 5%. Dėl šių priežasčių jo efektyvus panaudojimas tampa sudėtingas, be to, elementai nėra pigūs. [24]

Teoriškai apkrovai tenkanti galia iš TEG :

$$P_L = R_L \left(\frac{S \cdot \Delta T}{R_{TEG} + R_L} \right)^2 \quad (1.16)$$

čia: R_{TEG} – vidinė TEG elemento varža, Ω ; R_L – apkrovos varža, Ω ; S – Seebeck'o koeficientas, V/K; ΔT – temperatūros skirtumas tarp šaltos ir karštos TEG elemento pusės, K.

Iš 1.16 formulės matyti, kad esant suderintai apkrovai, kai $R_{int}=R_L$ apkrovai tenka didžiausia galia.

Kitas šilumos konvertavimo į elektros energiją būdas - piroelektriniai generatoriai PEG (*angl. Pyroelectric generator*). TEG elementas konvertavimui naudoja temperatūrinį gradientą tarp jo abiejų pusių, o PEG reaguoja tiesiogiai į temperatūros pokytį [26].

Poliarizacijos pokytis PEG elemente išreiškiamas formule [28]:

$$\Delta P = p \cdot \Delta T, \quad (1.17)$$

čia ΔT – temperatūros pokytis, K; p – piroelektrinis koeficientas C/m^2K .

PEG generatoriaus, išėjimo įtampa apskaičiuojama pagal formulę :

$$U = \frac{\Delta P \cdot d}{(\epsilon_r - 1) \cdot \epsilon_0}, \quad (1.18)$$

čia ΔP – poliarizacijos pokytis; d – TEG storis, m; ϵ_r – santykinė dialektrinė konstanta; ϵ_0 – elektrinė konstanta.

Svarbiausi PEG parametrai yra piroelektrinis koeficientas p [C/m^2K], santykinė dialektrinė konstanta (ϵ_r) ir dialektriniai nuostoliai ($\tan\delta$) [28].

Apžvelgtų energijos šaltinių palyginimas pateikiamas 1.4 lentelėje.

1.4 lentelė. Energijos šaltinių palyginimas

| Energijos šaltinis | Galia |
|--|--|
| Šviesa | 1mW/cm ² (tiesioginė saulės šviesa) 100 μW/cm ² (apšviestas kambarys) |
| Vibracijos | 200 μW/cm ³ |
| Temperatūra | 60 μW/cm ³ |
| Elektromagnetinės radijo dažnio bangos | 1 μW/cm ² |
| Vėjas | 1 μW/cm ² |
| Magnetinė energija | Remiantis 1.13 formule priklauso nuo daug faktorių |

Rezultatai rodo, kad didžiausia galia gaunama iš saulės elementų, mažiausia – iš vėjo ir elektromagnetinių bangų. Vienintelis šaltinis, kuris nepriklauso nuo aplinkos sąlygų yra magnetinė energija, tačiau jis sunkiai palyginamas su kitais energijos šaltiniais. Pritaikant elektromagnetinės energijos generatorių, važiuojant dviračiu būtų užtikrinamas pastovus energijos generavimas, ko negalima tikėtis iš kitų šaltinių.

1.2.2. Valdymo grandinės

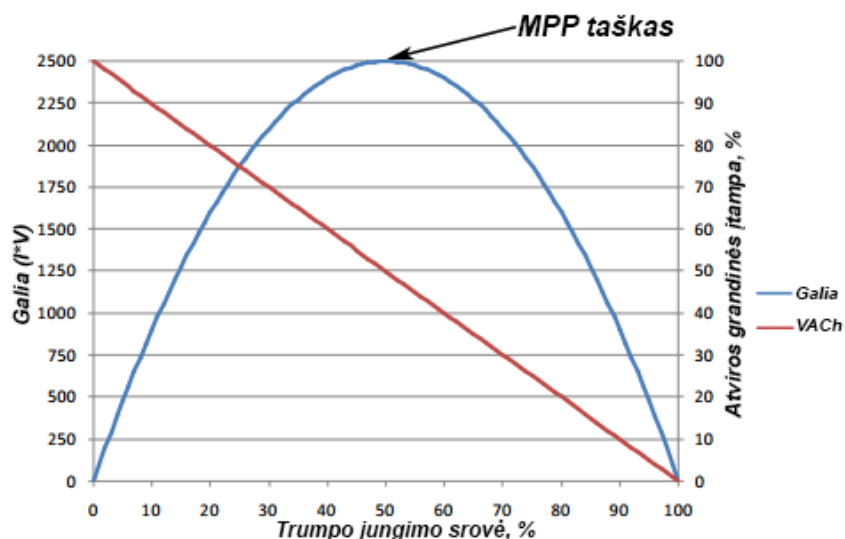
Frikinės dviračio pavaros kontrolės sistemai reikalingos valdymo grandinės :

- Iš alternatyvaus energijos šaltinio išgaunamos galios valdymo grandinė, realizuojanti MPPT algoritmą.
- Energijos saugojimo elemento valdymo grandinė, kraunanti ir prižiūrinti energijos saugojimo elementą nuo perkrovimo ar per didelio iškrovimo.
- Frikcinės pavaros valdymo grandinė, kurią realizuoti galima mikrovaldiklio ir bevielio siųstuvo pagalba.

MPPT realizavimas

MPPT (*angl. Maximum Power Point Tracking*) – maksimalios galios sekimas, arba kitaip – darbo taško parinkimas. Elektronikoje MPPT realizuojamas DC-DC konverteriais, kurie funkcionuoja kaip optimali elektrinė apkrova energijos šaltiniui ir konvertuoja galią į įtampą ar srovės lygį, kuri labiausiai tinka suprojektuotos sistemos apkrovai.

Pastovaus išėjimo impedanso energijos keitiklių MPP taškas yra 50%, o saulės elemento apie 80 % atviros grandinės įtampos [29]. MPPT algoritmo realizacijos reikalingumas akivaizdžiai matomas iš 1.11 pav. Esant netinkamai energijos šaltinio apkrovai dalis energijos iššvaistoma veltui.



1.11 pav. Pastovaus išėjimo impedanso keitiklių charakteristikos [17]

Patys MPPT metodai skirstomi į tiesioginius ir netiesioginius.

Tiesioginiai:

- a) Sutrikdymo ir stebėjimo metodas (dar vadinamas „lipimo į kalną“ metodu). Metodo esmė – stebėti galią. Jeigu įtampai padidėjus galia taip pat padidėja, reiškia MPP yra dešiniau, jeigu

padidinus įtampą galia ima mažėti, reiškia MPP yra prie mažesnės įtampos (kairiau). Tikslumas priklauso nuo žingsnio.

- b) Didėjančio laidumo metodas. Metodo esmė – stebėti galios pokytį nuo įtampos. Jeigu rezultatas > 0 , darbo MPP taškas dešinėje kreivės pusėje, jei < 0 , tuomet kairėje. MPP taške nėra kitimo, todėl $dP/dV=0$.

Netiesioginiai:

- a) Fiksuotos įtampos metodas. Tai yra metodas, kurio metu darbo taškas nustatomas vis kitoje vietoje priklausomai nuo laiko. Kaip pavyzdį galime paimti 2 metų laikus vasarą ir žiemą, kuriems esant yra nustatoma skirtinga įtampa .
- b) Atviros grandinės įtampos metodas. tai paprasčiausias iš visų literatūroje aprašytų metodų. Jis remiasi šia aproksimacija:

$$V_{MPP} = k \cdot V_{OC}, \quad (1.19)$$

čia k – koeficientas, V_{oc} – atviros grandinės įtampa

Visi metodai atlieka savo funkciją, skiriasi tik jų realizavimo sudėtingumas. Dėl šios priežasties plačiausiai elektronikoje naudojamas netiesioginis atviros grandinės įtampos metodas.

Galios valdymo grandinės realizavimas

Projektuoti ir surinkinėti grandines iš atskirų diskretinių elementų neverta, kai tam jau yra paruošti galutiniai žymių elektronikos gamintojų integruotieji sprendimai. Grandinę surinkinėdami patys, kažin ar sutaupytime laiko, pinigų, užimamo ploto, ar tuo labiau pavyktų gauti geresnį rezultatą lyginant su pagaminta mikroschema. Mažų galių integruotųjų valdymo grandyno gamybos srityje geriausiai žinomi „Cymbet Corporation“, „STMicroelectronics“, „Linear Technology“ ir „Texas Instruments“ gamintojai.

1.5 lentelėje pateikiamas plačiausią galios valdymo integruotųjų grandynų pasirinkimą siūlančios „Linear Technology“ palyginimas.

1.5 lentelė. „Linear Technology“ galios valdymo integruotųjų grandynų palyginimas

| | LTC3588 | LTC3330 | LTC3331 | LTC3108 |
|--|----------------|-------------------------------------|----------------|----------------|
| Įėjimo įtampų diapazonas [V] | 2,7-20 | 3-19 | 3-19 | 0,02-0,5 |
| Maksimali išėjimo srovė [mA] | 100 | 50 | 50 | 7 |
| Maksimali ramybės srovė (μA) | 250 | 225 | 225 | 0,2 |
| DC-DC keitiklio tipas | Buck | Buck-Boost | Buck-Boost | Boost |
| LDO išėjimai [vnt] | - | 1 | - | 1 |
| LDO įtampos [V] | - | 1,2, 1,5, 1,8, 2, 2,5, 3, 3,3, Vin. | - | 2,2 |
| Integruotas įtampos lygintuvas (diodų tiltelis) | Taip | Taip | Taip | Ne |
| MPPT | NE | NE | NE | NE |
| Darbinė temperatūra, °C | -40..125 | -40..125 | -40..125 | -40..125 |
| UVLO | Taip | Taip | Taip | Ne |
| Kaina (Farnell) | 4.11€ | 5.63€ | 6.46 € | 4.95€ |

Matyti, kad esminiai LTC3588, LTC3330 ir LTC331 skirtumai yra: išėjimo srovės dydis, LDO, bei DC-DC keitiklio tipas. Visiškai nuo jau išvardintų skiriasi LTC3108, nes ji skirta dirbti su ypač mažomis įtampomis, tačiau turi labai siaurą įėjimo įtampos diapazoną. Be to, LTC3108 vienintelis neturi vidinio įtampos lygintuvo. Didžiausias minusas – nė viena mikroschema neturi MPPT algoritmo realizacijos.

„Cymbet“ CBC915 EP, „STMicroelectronics“ SPV1050 ir „Texas Instruments“ BQ25504 integruotųjų galios valdymo grandynų palyginimas pateiktas 1.6 lentelėje.

1.6 lentelė. Galios valdymo integruotųjų grandynų palyginimas

| | CBC915 EP | SPV1050 | BQ 25504 |
|---------------------------------------|--|---|---|
| Įėjimo įtampų diapazonas [V] | Termoelektrikams : 0,2-1 Pjezoelektrikams : 4-20 Saulės elementams : 0,9-4 | 0,15-18 | 0,08..5,5 |
| Maksimali išėjimo srovė [mA] | Nenurodyta | 70 | 200 |
| Maksimali ramybės srovė (μA) | Nenurodyta | 1 | 0,330 |
| DC-DC keitiklio tipas | Boost | Buck-Boost | Boost |
| LDO išėjimai [vnt] | - | 2 | - |
| LDO įtampos [V] | - | 1,8 ir 3,3 | - |
| Integruotas įtampos lygintuvas | Ne | Ne | Ne |
| MPPT | Taip. Režimai nustatomi nuoseklia sąsaja | Taip. | Taip |
| Darbinė temperatūra °C | -40..85 | -40..125 | -40...125 |
| UVLO | Ne | Taip | Taip |
| Papildoma | Turi nuoseklią sąsają | MPPT programuojamas išoriniais rezistoriais | MPPT programuojamas išoriniais rezistoriais |
| Kaina | 4.78€ | 3.7€ (st puslapyje) | 4.82€ |

Energijos kaupimo elementai

Energijos saugojimo elementui taikomi šie kriterijai:

- Įkrovimų – iškrovimų skaičius
- ESR (*angl. Equivalent Series Resistance*) – ekvivalentinė nuoseklaus jungimo varža.

Važiuojant dviračiu energijos saugojimo elementas bus pastoviai įkraunamas iki maksimalaus lygio, net nesant išjungtai frikcinei pavarai, todėl įkrovimų – iškrovimų ciklų skaičius yra ypatingai svarbus. ESR svarbus dėl to, kad esant didesnei apkrovai gaunamas mažesnis įtampos kritimas. Elektronikoje dažniausiai naudojamos įvairios pakraunamos baterijos. Vystantis mažos galios elektronikai paplito superkondensatoriai, turintys didelį energijos tankį,

bei specialiai energijos pasisavinimui iš aplinkos sukurtos mikro-celės MEC (*angl. Micro Energy Cell*). Kaip pavyzdys – „Maxwell HC Power Series BCAP“ superkondensatoriai, turintys mažesnę nei 5 mΩ ESR ir apsaugą nuo poliarumo sumaišymo. Įkrovimų ciklas – 500000, 10 metų gyvavimo trukmė, atitinka RoHS standartą.

1.7 lentelė. Pakraunamų baterijų palyginimas [52]

| Baterijos tipas | Nominali įtampa (V) | Talpa (mAh) | Svorinis energijos tankis (Wh/kg) | Galios tankis (W/kg) | Efektyvumas (%) | Savaiminis išsikrovimas (% per mėnesį) | Atminties efektas | Pakrovimų skaičius |
|-----------------|---------------------|-------------|-----------------------------------|----------------------|-----------------|--|-------------------|--------------------|
| SLA | 6 | 1300 | 26 | 180 | 70-92 | 20 | Ne | 500-800 |
| Ni-Cd | 1,2 | 1100 | 42 | 150 | 70-90 | 10 | Taip | 1500 |
| NiMH | 1,2 | 2500 | 100 | 250-1000 | 66 | 20 | Ne | 1000 |
| Li-ion | 3,7 | 740 | 165 | 1800 | 99,9 | <10 | Ne | 500-1200 |
| Li-polymer | 3,7 | 930 | 156 | 3000 | 99,8 | <10 | Ne | 500-1000 |

Geriausius parametrus turinčios ličio jonų ir ličio polimerų baterijos iš kitų išsiskiria svoriniu energijos ir galios tankio, efektyvumu ir pakrovimų skaičiumi. Ličio jonų baterijos pigesnės, be to, jų perkrovimų skaičius didesnis nei ličio polimerų. Toliau ličio jonų baterija palyginama su kitais energijos kaupimo elementais.

1.8 lentelė. Energijos saugojimo elementų palyginimas

| | Superkondensatoriai | MEC | Ličio jonų baterija |
|-------------------------|---------------------|-------------|---------------------|
| Įtampa [V] | 2,7-6,3 | 4,1 | 3,6-3,7 |
| Įkrovimo trukmė | 1 – 10sek. | 10-20min | 10-60 min. |
| Vidinė varža, ESR | <3m Ω | Iki 22Ω | 75-150mΩ |
| Įkrovimo ciklų skaičius | <1mln. Arba 30000h | 5000-100000 | 500 - 1200 |

Iš 1.8 lentelėje pateiktų duomenų matyti, kad MEC įkrovimų skaičiumi gerokai viršija ličio jonų baterijas, tačiau įkrovimo laikas didelis, lyginant su superkondensatoriais. Mažiausią ESR taip pat turi superkondensatoriai. Dėl greičiausio išsikrovimo ir kitų prieš tai išvardintų parametru jie yra tinkamiausi projektuojamai sistemai.

Įtampos valdymas

Sistemoje reikalingi du įtampos keitikliai, tai AC – DC ir DC – DC. AC – DC keitiklis reikalingas įtampos, gaunamos iš energijos šaltinio lyginimui, o DC – DC, įtampos aukštinimui, kuris reikalingas energijos kaupimo elemento krovimui.

AC-DC

Kintamos įtampos keitimas į nuolatinę gali būti realizuojamas:

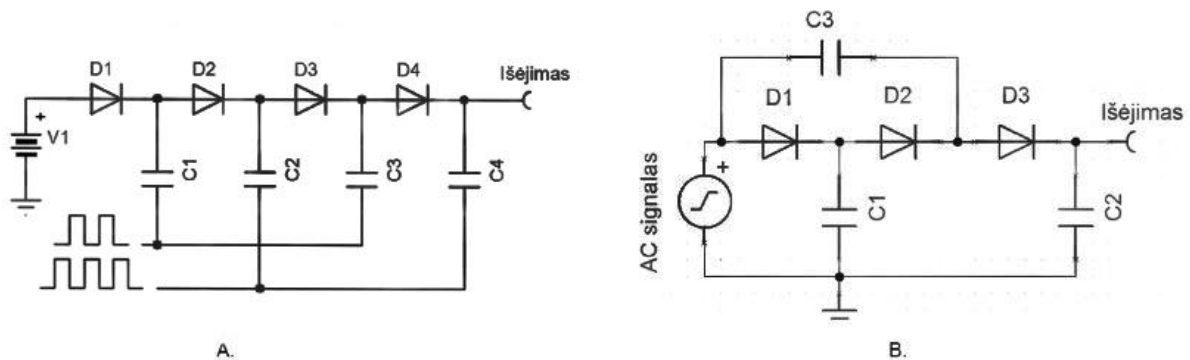
- Diodų tilteliu
- Sinchroninis lyginimas
- Įtampos daugikliu

Diodų tiltelio atveju vienfazė AC įtampa lyginama keturiais diodais ir vienu kondensatoriumi. Priklausimai nuo diodo tipo ir kondensatoriaus nominalo priklauso išėjimo įtampa. Siekiant įtampą išlyginti efektyviau, vietoj silicio diodų renkamosi Šotkio diodai, turintys mažą įtampos kritimą.

Sinchroninio lyginimo atveju diodų funkciją atlieka valdomi tranzistoriai, tačiau šis lyginimo būdas yra aktyvinis, reikalaujantis energijos, ir sudėtingiau realizuojamas.

Jei išlyginta diodų tilteliu įtampa gaunama per maža elektronikos veikimui, tuomet verta rinktis įtampos daugiklį. Tipinės daugiklių grandinės sudarytos iš kondensatorių ir diodų. Plačiai naudojamos Rentgeno spindulių, elektrostatinėse sistemose, lazeriuose [30], CRT televizoriuose ir LCD monitoriuose [31]. Dažniausiai sutinkamos Diksono [32], Cockcroft – Walton (CW) [30] arba Greinacherio [31], daugiklių topologijos ir įvairios jų modifikacijos.

Diksono daugiklis įprastai naudoja du taktuojančius signalus ir tam tikrą kiekį identiškų pakopų, kuri kiekviena susideda iš diodo ir kondensatoriaus [33].



1.12 pav. Diksono įtampos daugiklio modifikacijos

1.12 pav. A pavaizduotas Diksono daugiklis. Kiekvieno takto metu krūvis kondensatoriais pernešamas į išėjimą, kurio įtampa išreiškiama:

$$V_{i\bar{s}} = (n+1) \cdot V_g - \frac{n \cdot I_{i\bar{s}}}{f \cdot C}, \quad (1.20)$$

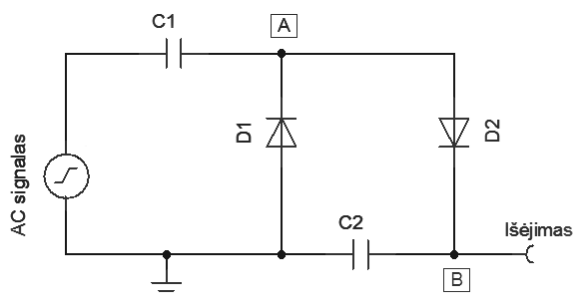
čia n – pakopų skaičius; $I_{i\bar{s}}$ – išėjimo srovė, A; f – įėjimo signalo dažnis, Hz; C – pakopos kondensatoriaus talpumas, F.

$$V_g = V_{in} - V_d, \quad (1.21)$$

čia V_{in} – įėjimo įtampa, V; V_d – diodui krentanti įtampa, V.

1.12 pav. B pateikta Diksono daugiklio modifikacija, konvertuojanti AC įtampą į aukštesnę DC. C3 kondensatoriuje neigiamu pusperiodžiu sukaupiama įtampa, kuri teigiamo pusperiodžio metu prisideda prie AC šaltinio įtampos. Diodas D3 ir C2 kondensatorius veikia kaip lygintuvas.

Literatūroje aprašomi Cockcroft-Walton [30] ir Greinacherio [31] įtampos daugikliai yra identiški, tiesiog vadinami skirtingų fizikų pavardėmis. Daugiklio pakopa susideda iš dviejų kondensatorių ir dviejų diodų.



1.13 pav. Cockcroft – Walton įtampos daugiklio pakopa

Kai C1 kondensatorius per D1 užkraunamas iki V_{in} įėjimo įtampos lygio, taške A gaunama $2 \cdot V_{in}$ įtampa, kurios forma tokia pat kaip įėjimo (AC). Diodas D2 ir kondensatorius veikia kaip įtampos lygintuvas, todėl taške B gaunama DC įtampa, lygi dvigubai įėjimo įtampai. Išėjimo įtampa [31]:

$$V_{is} = \frac{nV_0}{nR_0 + R_L}, \quad (1.22)$$

čia n – pakopų skaičius, V_0 – šaltinio atviros grandinės įtampa (V), R_0 – šaltinio vidaus varža (Ω), R_L – apkrovos varža (Ω).

DC-DC

DC-DC įtampos keitikliai gali būti dviejų tipų:

1. *Izoliuoti DC – DC keitikliai.* Įėjimas ir išėjimas yra elektriškai atskirti (Step-up, Step-Down, Flyback). Pasižymi dideliu atsparumu triukšmams. Dažniausiai naudojami aukštomis įtampoms.

2. *Neizoliuoti DC – DC keitikliai.* Įėjimas ir išėjimas turi bendrą minusinį laidą. Plačiai elektronikoje naudojami keitikliai, pasižymintys maža kaina ir dideliu naudingumo koeficientu.

Idealus DC-DC konverteris turi 100 % efektyvumą. Realiomis sąlygomis efektyvumas siekia 70-95 %. Konverterio veikimas pagrįstas pulso pločio moduliacija PWM (*angl. Pulse Width Modulation*), kuomet naudojant induktyvinę ritę ir valdant tranzistorių junginėjimosi laikus

reguliuojama išėjimo įtampa. Visų DC-DC konverterių išėjimo įtampa priklauso nuo PWM signalo skverbties gylio, ir gali būti išreiškiama formule:

$$V_{i\bar{s}} = V_{in} \cdot M, \quad (1.23)$$

čia $V_{i\bar{s}}$ – išėjimo įtampa, V; V_{in} – įėjimo įtampa, V; M – konvertavimo koeficientas.

Srovė:

$$I_{i\bar{s}} = \frac{I_{IN}}{M}, \quad (1.24)$$

DC – DC keitikliai gali veikti CCM (*angl. Continuous Conduction Mode*) ir DCM (*angl. Discontinuous Conduction mode*) režimais. CCM – tai režimas, kuomet induktyviojo elemento srovė visada didesnė nei 0, DCM režimu srovė per induktyvumą tam tikrais laiko momentais yra lygi 0. Režimas priklauso nuo apkrovos dydžio keitiklio išėjime. Konverteriui perėjus į DCM režimą išėjimo įtampa tampa priklausoma nuo apkrovos, todėl didėja keitiklio išėjimo impedansas [34].

Mikrovaldiklis

Frikcinės dviračio pavaros sistemoje mikrovaldiklis reikalingas bevielės sąsajos valdymui ir minimo krypties nustatymo realizavimui. Orientuojantis į mažą sistemos galios poreikį, tikslinga parinkti ultra mažos galios ULP (*angl. Ultra Low Power*) mikrovaldiklį. 1.9 lentelėje pateiktas geriausias techninius parametrus galios prasme pateikiančių STM32L, MSP430G2553 ir ATMEGA48P mikrovaldiklių palyginimas.

1.9 Lentelė. Ultra mažos galios mikrovaldiklių palyginimas

| | STM32L [35] | MSP430G2553 [36] | ATMEGA48P [37] |
|------------------------------------|-------------|------------------|----------------|
| Maitinimo įtampa, V | 1,65 – 3,6 | 1,8 – 3,6 | 1,8 – 5,5 |
| Srovės suvartojimas @1MHz, μ A | 214 | 230 | 300 |
| Miego režimo srovė, μ A | 0,3 | 0,1 | 0,1 |
| | 4€ | 1,5€ | 2,5€ |

Gamintojų pateikiama aktyviu režimu STM32L mikrokontrolerio vartojama srovė yra mažiausia, tačiau miego režime – didžiausia. Didžiausią srovės vartojimą aktyviu režimu turi ATMEGA48P, tačiau ji pigesnė nei STM32L ir miego srovė mažesnė. MSP430G2553 yra tarpinis variantas pagal suvartojamą srovę aktyviame režime, tačiau atsižvelgiant į mažiausią kainą ir labai mažą miego srovę, šis mikrovaldiklis tinka geriausiai.

1.2.3. Bevielė sąsaja

Kaip ir kitos frikcinės pavaros kontrolės sistemos aktyvinės dalys, bevielė sąsaja turi būti mažos galios. Plintant bevieliams sensorių tinklams, didėja mažos galios poreikis, ko pasekoje gamintojai vysto mažos bevielius siųstuvus – imtuvus. Minimo sensoriuose naudojami ULP bevielės komunikacijos standartai [5].

1.10 lentelė. Bevielės komunikacijos standartai

| | ANT+ | BLE | ZigBee |
|----------------|-------------|--------------|--------------|
| Dažnis | 2.4 GHz | 2.4 GHz | 2.4 GHz |
| RX jautrumas | -85dBm | -87dBm | -102dBm |
| TX galia, dBm | 0 | 0 | 0 |
| Miego srovė | 3.1 μ A | 0,78 μ A | 4.18 μ A |
| Pabudimo srovė | 2,9 mA | 4,5 mA | 9,3 mA |

1.10 lentelė rodo ANT+ pranašumą prieš BLE ir ZigBee suvartojamos srovės atžvilgiu. Būtent ANT+ ryšys daugiausiai naudojamas dviračių kompiuteriuose dėl suderinamumo tarp skirtingų gamintojų įrenginių. Visi bevieliai moduliai, naudojantys išvardintus standartus yra brangūs. Pigiausia alternatyva – 433MHz, 833MHz arba 2.4GHz mažos galios RF moduliai. Žymių gamintojų, tokių kaip „Texas Instruments“ mažos galios RF moduliai kainuoja keletą eurų, tačiau mažai žinomi gamintojai siūlo panašių specifikacijų ir mažos kainos produktus.

1.3. Apibendrinimai

Apžvelgus elektrinių dviračių sistemas ir jose naudojamų minimo sensorių veikimo principus, nustatyta, kad pačios sistemos sudėtingai montuojamos, o sistemos greičio kontrolei naudojami herkonai, holo davikliai, induktyvinė ritė arba akselerometras, fiksuojantis rotacinį judėjimą.

Kaip alternatyvus energijos šaltinis dviračio sistemoje geriausiai pritaikomas magnetinės energijos šaltinis, į kurio mechaninį išpildymą taip pat integruojama sukimosi krypties realizacijos dalis. Kitų energijos šaltinių pritaikymas dviračiui komplikotas, arba tiesiog nepatogus vartotojui.

Atlikus literatūros analizę parodyta MPPT algoritmo svarba bei apžvelgti įtampos keitimo būdai, kurie reikalingi projektuojamai sistemai.

Apžvelgti integruotieji galios valdymo grandynai, turintys keletą sistemai reikalingų valdymo grandinių. Iš jų labiausiai išskirtas BQ25504, turintis integruotą MPPT algoritmą ir platų (0.08-5,5V) įėjimo įtampos diapazoną, būtiną projektuojamai sistemai.

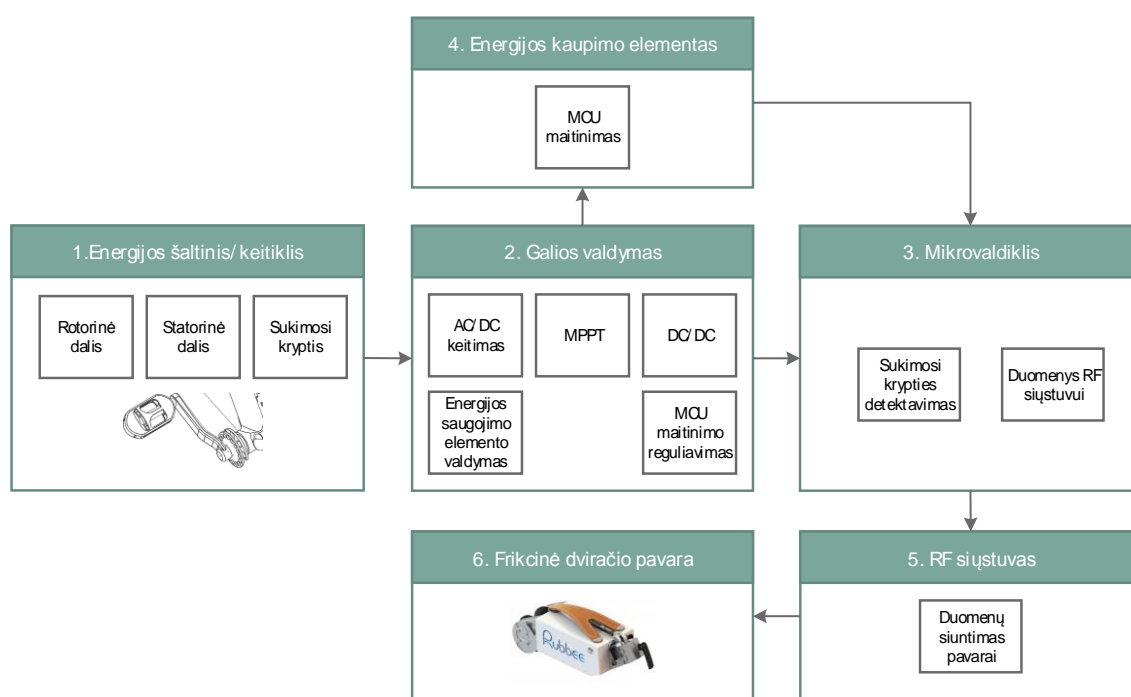
Nustatyta, kad dėl greito ir dažnai pasikartojančio įkrovimo ciklo tinkamiausias energijos kaupimo elementas yra superkondensatorius, bei suformuluoti kriterijai mikrovaldiklio ir bevielio modulio parinkimui.

2. PROJEKTINĖ DALIS

Išsiaiškinus galimus sprendimus, kuriuos galima pritaikyti frikcinės pavaros kontrolės sistemoje, pirmiausia sudaroma blokinė schema, kurioje smulkiai išskaidomi reikalingi sistemos mazgai ir jų atliekamos funkcijos. Parenkami komponentai, suprojektuojama principinė schema.

2.1. Frikcinės pavaros kontrolės blokinės schemos sudarymas

Remiantis 1.2 skyriuje pasiūlyta funkcinė dviračio pavaros kontrolės sistemos schema, sudaroma detali blokinė schema. Panaudojant 2.1 pav. principu padarytą žiedą su magnetais ir šalia jo pritaikius konstrukciją su ritėmis, generatoriaus principu būtų gaunama energija, kurią galima panaudoti projektuojamos sistemos maitinimui.



2.1 pav. Frikcinės pavaros kontrolės sistemos blokinė schema

Kiekvieno bloko paskirtis:

1. Energijos šaltinis/keitiklis.
 - a) Rotorinė dalis – magnetų, išdėstytų ratu konstrukcija, tvirtinama ant su pedalais besisukančios dviračio ašies. Vykstant mynimui, sukuriamas kintamas magnetinis laukas.

- b) Statorinė dalis – induktyvinių ričių konstrukcija, pritvirtinta ant nejudamos dviračio dalies ir esanti kuo arčiau rotorinės dalies (kintamame magnetiniame lauke).
 - c) Sukimosi krypties blokas – magnetinio lauko jutikliai, įmontuoti į statorinę dalį, ir perduodantys mikrovaldikliui informaciją apie pedalų minimo kryptį ir dažnį.
2. Galios valdymas.
- a) AC – DC keitiklis. Reikalingas generuojamos AC įtampos konvertavimui į DC.
 - b) MPPT blokas – 1.2.2 skyriuje aprašymo maksimalios galios taško sekimui, taip pasisavinant maksimalią galią iš šaltinio.
 - c) DC/DC blokas – aukštinantysis įtampos keitiklis, reikalingas energijos kaupimo elemento įkrovimui iki nustatyto dydžio įtampos.
 - d) Energijos kaupimo elemento valdymo blokas – energijos kaupimo elemento krovimo valdymui.
 - e) MCU maitinimo reguliavimo blokas – valdymo grandinė, reikalinga mikrokontrolerio prie energijos kaupimo elemento prijungimui tik tada, kai sukauptos energijos kiekio pakanka MCU veikimui.
3. Mikrovaldiklis
- a) Apdoroja signalus, gaunamus iš statorinėje dalyje įmontuotų magnetinio lauko jutiklių, nustatydamas pedalų minimo kryptį. Taip pat formuoja duomenis bevielio ryšio moduliui.
4. Energijos kaupimo elementas.
- a) Kaupia energiją mikrovaldiklio ir RF modulio maitinimui.
5. Bevielė sąsaja.
- a) Reikalinga bevieliam duomenų perdavimui į frikcinės pavaros valdymo bloką.
6. Frikcinė dviračio pavara (kontroliuojamas įrenginys).
- a) Priima duomenis, siunčiamus iš kontrolės sistemos bevielio ryšio modulio. Priimami duomenys – būtina sąlyga pavaros variklio įjungimui.

2.2. Alternatyvios energijos šaltinis ir jo modeliavimas

Magnetų ir ričių konstrukcijos dydis (2.7 pav.) turi būti parinktas pakankamai mažas, neužimantis daug vietos, netrukdamas dviratininkui važiuoti, bei generuojantis „apčiuopiamą“ įtampą. Galimi du rotorinės dalies montavimo ant pedalų ašies variantai – nuimti švaistiklį ir užmaitinti konstrukciją, arba konstrukcija turi būti surenkama iš dviejų dalių, kaip kad 1.3 pav. naudojamas surenkamas magnetų žiedas. Iš 1.10 formulės matoma, kad magnetai turi didelę įtaką generuojamai įtampai. Pagrindiniai magnetų tipai ir parametrai pateikti 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Magnetai ir jų parametrai

| Medžiagos tipas | Magnetinio lauko srauto tankis (Br: mT) | Koercivumas (Hc: MA/m) | Tankis (kg/m ³) | Kaina |
|-----------------|---|------------------------|-----------------------------|----------|
| Feritas | 300-500 | 0,250 – 0,350 | ~4980 | Žema |
| Ne-Fe-B | 1100-1600 | 0,875 – 1,99 | ~8400 | Vidutinė |
| Sm-Co | 1000-1200 | 0,493 – 1,59 | ~7870 | Didelė |

Koercivumas (*angl. Coercivity*) – tai savybė atlaikyti išorinį magnetinį lauką ir neišsimagnetinti. Skaitinė vertė parodo energijos dydį, reikalingą išmagnetinti medžiagą iki nulio.

Magnetinė indukcija (magnetinio srauto tankis), yra pagrindinė magnetinio lauko charakteristika. Feritas turi mažiausią magnetinio lauko srauto tankį ir yra lengviausias. Didžiausią magnetinio srauto tankį turi neodimio (Ne-Fd-B) magnetai. Samario – kobalto (Sm-Co) magnetų magnetinio srauto tankis gana didelis, tačiau jis yra brangus. Plačiausiai naudojamų neodimio magnetų kaina yra vidutinė, galima lengvai rasti įvairių dydžių ir formų, bei jie yra stipriausi, todėl tyrimams pasirenkami būtent jie. Pagal savo savybes jie atitinkamai žymimi raide ir skaičiumi. Raidė žymi Kiuri temperatūrą, o skaičius maksimalų energijos produktą.

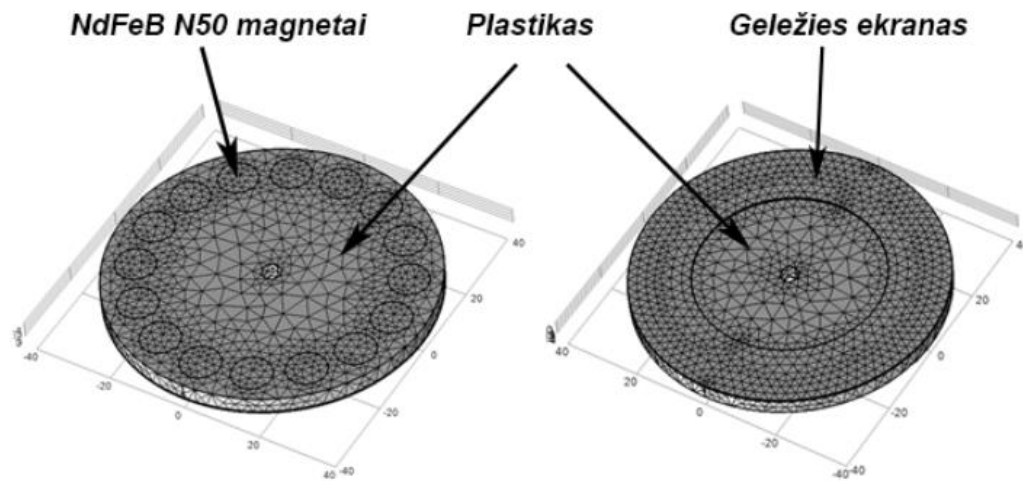
Plastikinės konstrukcijos skersmuo parenkamas 80mm, tai yra apytiksliai toks pat dydis, kaip mažiausios priekinės dviračio žvaigždės dydis. Apžvelgus magnetų formas ir dydžius, parenkami cilindro formos 4x10mm N50 neodimio magnetai. Naudojant „SolidWorks“ paketą nubraižomas detalės brėžinys. Magnetų skaičius privalo būti lyginis, nes kas antras magnetas įdedamas skirtingu poliumi, tokiu būdu esant 1Hz dažniui ritėje turėtų būti indukuojama 8Hz dažnio harmoninio signalo formos įtampa (esant 16 magnetų).

„Comsol Multiphysics 5.0“ simuliacijoms metu atitinkamoms modelio (2.2pav.) sritims priskirti parametrai [38] [39] [40]:

2.2 lentelė. Modeliavimui naudojami reikalingi medžiagų parametrai

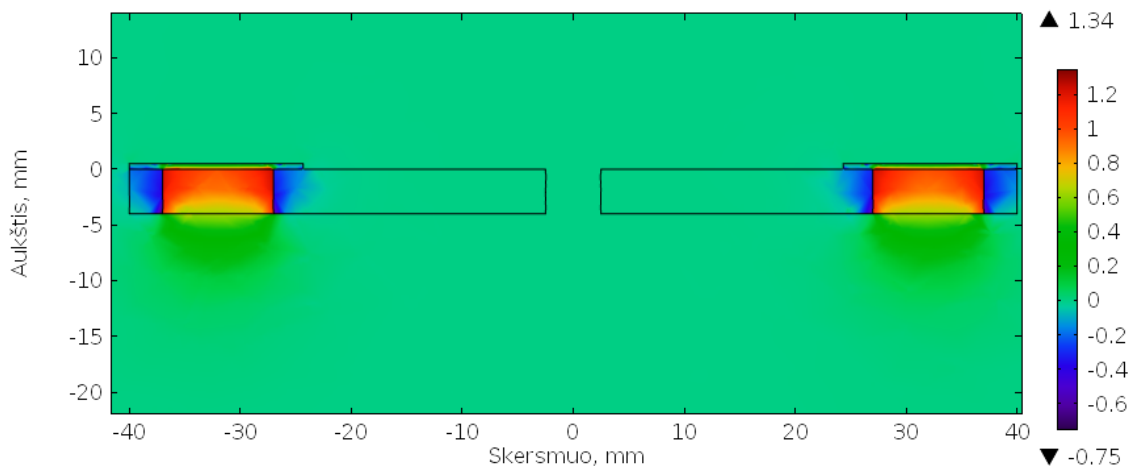
| Medžiaga | Santykinė magnetinė skvarba μ_0/μ | Santykinė dialektrinė skvarba ϵ_0/ϵ | Magnetinio lauko srauto tankis Br, T |
|------------------------------------|---|---|--------------------------------------|
| Oras | 1 | 1,00054 | - |
| Geležis (neodimio magnetas) | 1,05 | 1,05 | 1,41 |
| Geležis (magnetinio lauko ekranas) | 5000 | 1 | - |
| Plastikas | 1 | 1,9 | - |

„Solidworks 2014“ modeliavimo programa nubraižyta konstrukcija importuojama į „Comsol Multiphysics 5.0“ programą. Geometrijos sritims priskiriamos 2.2 lentelėje pateiktos medžiagos ir parametrai, sudaromas baigtinių elementų metodo tinklelis.



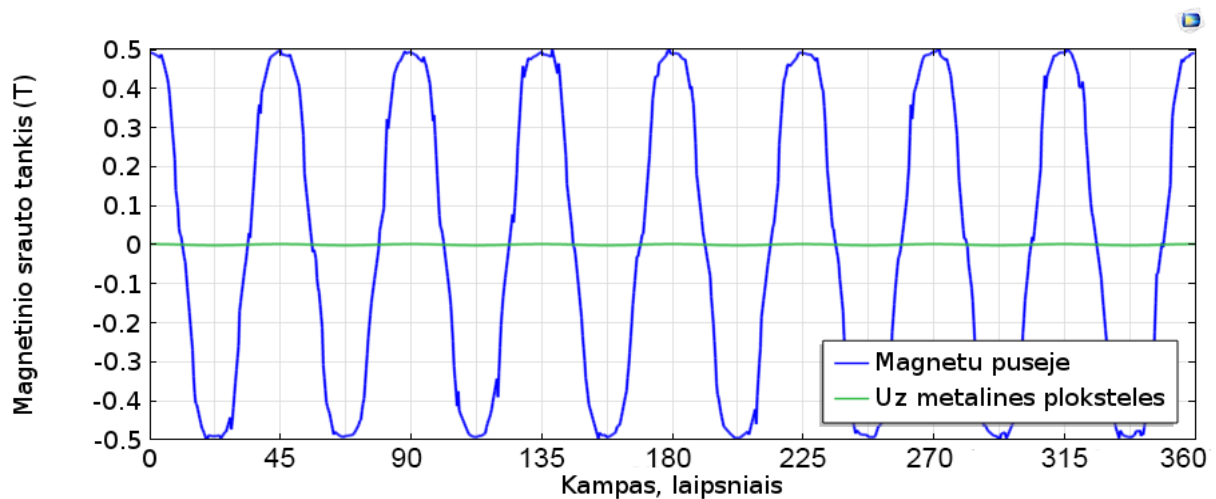
2.2 pav. Modelio geometrija

Atliekamas geometrijos skersinis pjūvis, 2.3 pav. atvaizduojamas vizualus magnetinio srauto tankio pasiskirstymas bei skaitinis dydis. Iš modeliavimo rezultatų nustatyta, kad magnetinio lauko už geležinės plokštelės nėra, o neuždengtoje pusėje magnetinis laukas magneto paviršiuje siekia iki 0.65T, ir tolstant palaipsniui silpnėja.



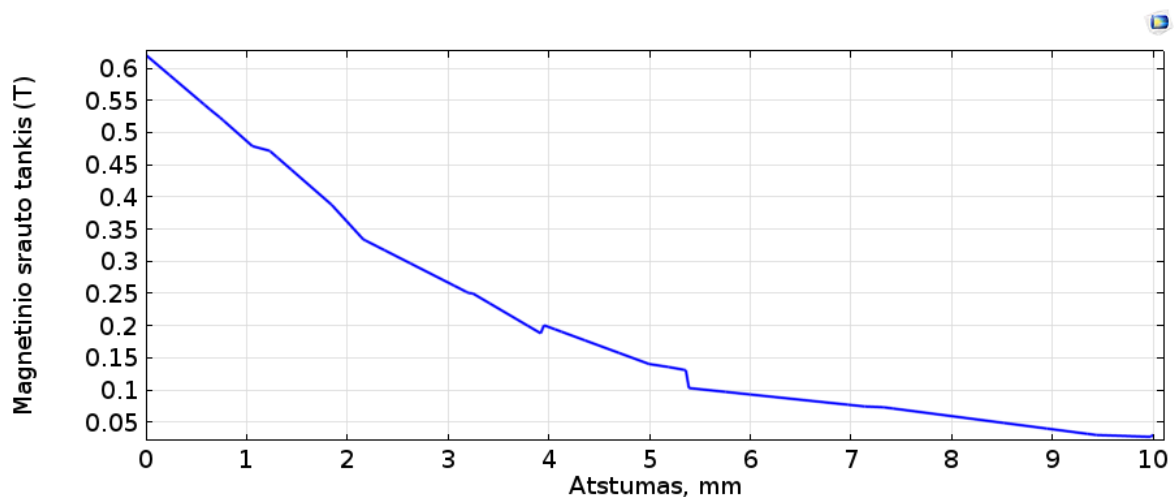
2.3 pav. Skersinio pjūvio magnetinio srauto tankis

Atvaizduojamas magnetinio srauto tankio pasiskirstymas 1mm atstumu nuo konstrukcijos paviršiaus, apskritimu per magnetų centrus iš abiejų pusių. 2.4 pav. pateikti rezultatai rodo, kad magnetinio srauto tankis pasiskirstęs harmoniniu dėsniu, o jo maksimali reikšmė magnetų pusėje siekia 0.5 T, o už metalinės plokštelės (2.4 grafike žalia linija) magnetinio srauto tankis lygus 0.



2.4 pav. Magnetinio srauto tankis išilgai magnetų centrų

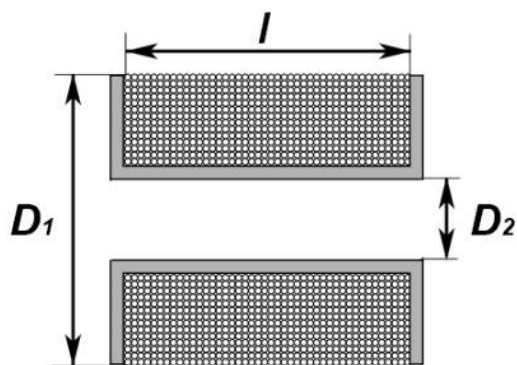
Randamas magnetinio srauto tankio kitimas tolstant statmena kryptimi nuo neodimio magneto 10mm atstumu. Iš 2.5 pav. pateiktų rezultatų matoma, kad laukas mažėja eksponentiškai, ir ties 10mm nuo magneto jis beveik lygus 0.



2.5 pav. Magnetinio srauto tankio kitimas tolstant nuo magneto

Gauti modeliavimo rezultatai rodo, kad galimas maksimalus magnetinio srauto tankio dydis yra 0,65 T (pačiame paviršiuje), kuris pasiskirstęs harmoninio signalo forma. Geležinis ekranas atlieka svarbų vaidmenį – nukreipia magnetinį lauką viena kryptimi, taip jį sustiprindamas. 2.5 pav. rezultatai rodo, kad per didelis tarpas tarp magnetų – ričių konstrukcijos gali smarkiai įtakoti generuojamo įtampos dydį dėl eksponentiškai mažėjančio magnetinio srauto tankio.

Statorinė dalis – ričių kontūras, tvirtinamas nejudamai kuo arčiau rotorinės dalies. Ritės geometrija pateikta 2.6 pav.



2.6 pav. Induktyvinės ritės matmenys

Atsižvelgiant į magnetų išdėstymą, ritės pozicionuojamos ties kas antru magnetu, atgręžtu tuo pačiu poliumi.

Išorinis ritės diametras D_1 parenkamas 12mm, vidinis skylės diametras D_2 (oro tarpas) – 4mm, ilgis l - 4mm. Apskaičiuojamas ritės paviršiaus plotas:

$$A = \pi \left(\frac{D_1}{2} \right)^2 - \pi \left(\frac{D_2}{2} \right)^2, \quad (2.1)$$

$$A = \pi \left(\frac{0.012}{2} \right)^2 - \pi \left(\frac{0.008}{2} \right)^2 = 10,05 \cdot 10^{-5} m^2 \quad (2.2)$$

Pagal savo matmenis į ritę telpa 500 varinės vielos apsisukimų, kurios diametras 0.02mm. Magnetinio srauto tankio reikšmė imama iš 2.5 grafiko 1mm atstume, kuri lygi $B=0.48T$. Kadangi minimo dažnis 1Hz, magnetinio srauto tankis keičiasi 8 kartus per sekundę. Pasinaudojus 1.13 formule, apskaičiuojama maksimali galima ritėje indukuojama įtampa esant 1Hz minimo dažniui.

$$V = 500 \cdot \frac{0,48 \cdot 10,05 \cdot 10^{-5} \cdot \cos(90)}{\frac{1}{8}} = 0,192V \quad (2.3)$$

Teoriškai, vienoje ritėje indukuota įtampa yra apie 192 mV, todėl sujungus 5 rites nuosekliai, turėtų būti gaunama apie 960mV įtampa. Ritės vyniojamos panaudojant žingsninį variklį, kurį valdo atmega32 mikrovaldiklis. Apsisukimų skaičius indikuojamas LCD 2x16 ekrane, todėl visų suvyniotų ričių vijų skaičius yra vienodas. Pagamintos statorinė ir rotorinė dalys pavaizduotos 2.7 pav.



2.7 pav. Pagamintos energijos šaltinio rotorinė (kairėje) ir statorinė (dešinėje) dalys

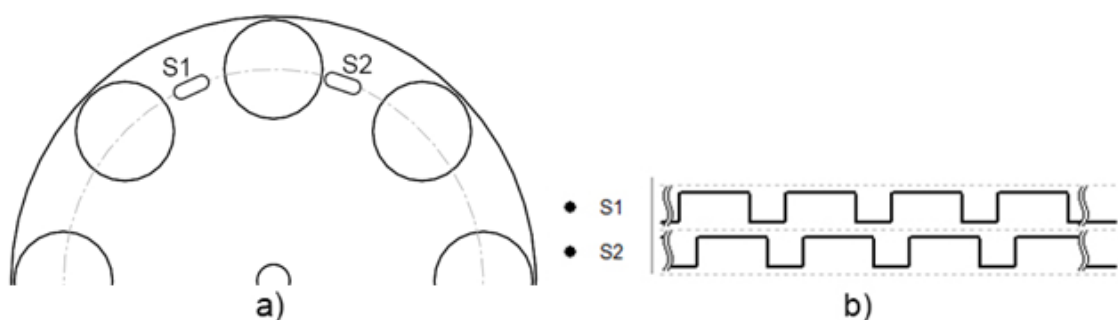
Plastikiniai magnetų ir ričių laikikliai buvo išpjauti lazeriu, todėl pozicionavimas yra tikslus.

2.3. Sukimosi krypties nustatymo realizavimas

Svarbu, kad signalai bevieliu ryšiu būtų siunčiami tik esant tam tikrai sukimosi kryptiai. Dviratininkas gali tiesiog sukti pedalus atgal, taip priversdamas RF siųstuvą siųsti signalus, kurios imtuvas priims ir įjungs variklį. Toks sistemos veikimas yra negalimas.

Projektuojama sistema yra kritiškai naudojamos galios atžvilgiu, todėl bus naudojamas analitinėje dalyje analizuotas pasyvinis magnetinis jutiklis.

Sukimosi kryptiai detektuoti vieno tokio jutiklio neužteks, nes jis tiesiog siųs pavienius impulsus nepriklausomai nuo sukimosi krypties. Panaudojant du jutiklius, ir juos pritvirtinus tinkamose vietose, įmanoma gauti du laike susijusius signalus, kuriuos apdorojus mikrovaldikliu galima gauti informaciją apie sukimosi kryptį. Planuojamas išdėstymas pateiktas 2.8 pav.

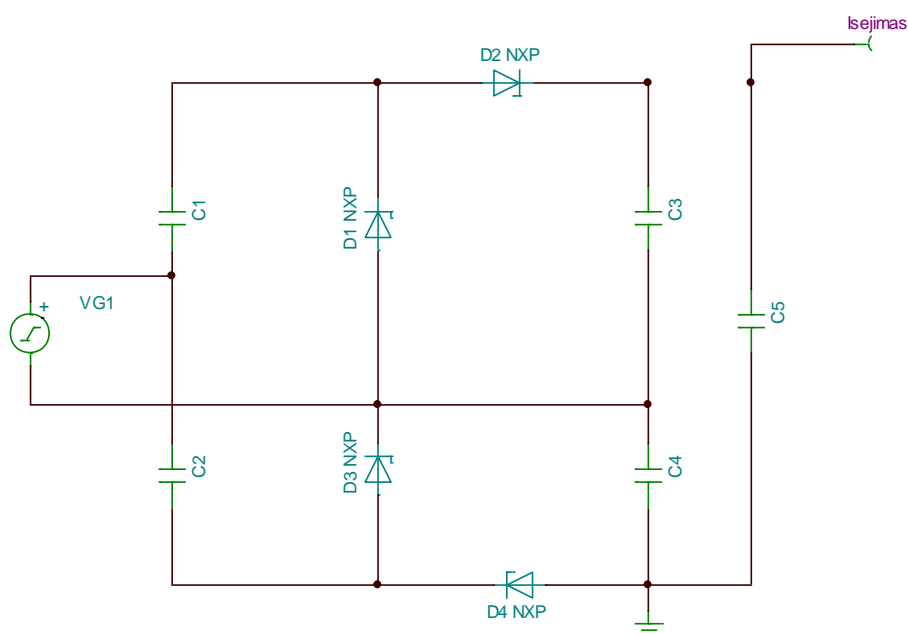


2.8 pav. a) Siūlomas jutiklių išdėstymas; b) Laikinė diagrama;

Punktyrine linija pažymėta magnetų sukimosi trajektorija, o S1 ir S2 – magnetiniai jutikliai. Tinkamose vietose sumontavus herkonus gaunamos dvi persidengiančios impulsų sekos. Mikrovaldiklio programos veikimo principas - kylančių ir krintančių frontų eiliškumo lyginimas jėjimuose. Magnetams besisukant į vieną pusę pirmiausia S1 pereina iš loginio 0 į loginio 1 būseną, po to S2, o sukantis į kitą pusę – atvirkščiai. Herkoninių jutiklių prijungimas prie mikrovaldiklio pavaizduotas 2.17 pav. Tam naudojami MSP430 P1.3 ir P1.4 išvadai.

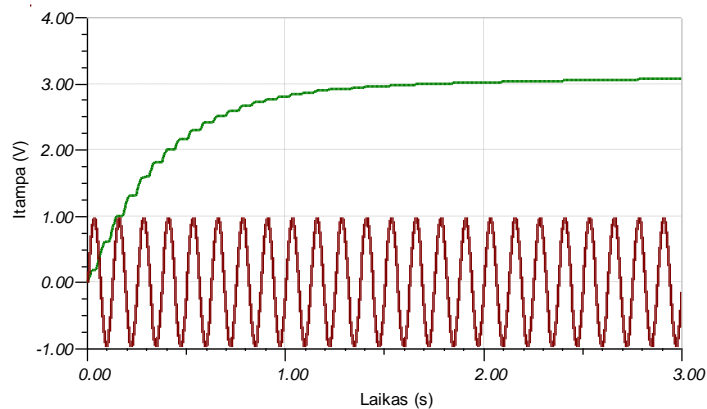
2.4. Įtampos daugiklio ir diodų tiltelio modeliavimas ir elementų parinkimas

Apskaičiuotas generatoriaus išėjimas yra 8Hz dažnio AC apie 960V įtampa. Įtampos lyginimui reikalingi diodai, turintys kuo mažesnę įtampos kritimą. Šiam tikslui buvo parinkti NXP PMEG1020EA [44] šotkio diodai, kurių $V_f=350\text{mV}$, kas yra dvigubai mažiau nei įprasto diodo. Išlyginus įtampą diodų tilteliu ir apkrovus generatoriaus išėjimą, įtampos kritimas gali būti didelis, ir mikroschema ilgą laiką bus prieš tai aprašytoje „šalto starto“ būsenoje, todėl reikalingas įtampos daugiklis. Esant maksimaliam dviratininko minimo dažniui, išėjimo įtampa neturi viršyti leistinos galios valdymo grandinės leistinos jėjimo įtampos. Atsižvelgiant į 1.2.2 skyriuje analizuotų galios valdymo grandynų charakteristikas, parenkama BQ25504 mikroschema, kurios maksimali jėjimo įtampa yra 5,5V. Įtampos aukštinimui parenkamas pilnos bangos „Greinacherio“ įtampos daugiklis, dauginantis įtampą 4 kartus (neatsižvelgiant į įtampos kritimą diodams). „TINA TI“ modeliavimo aplinkoje įtampos generatoriui nustatomi 960mV 8Hz parametrais.



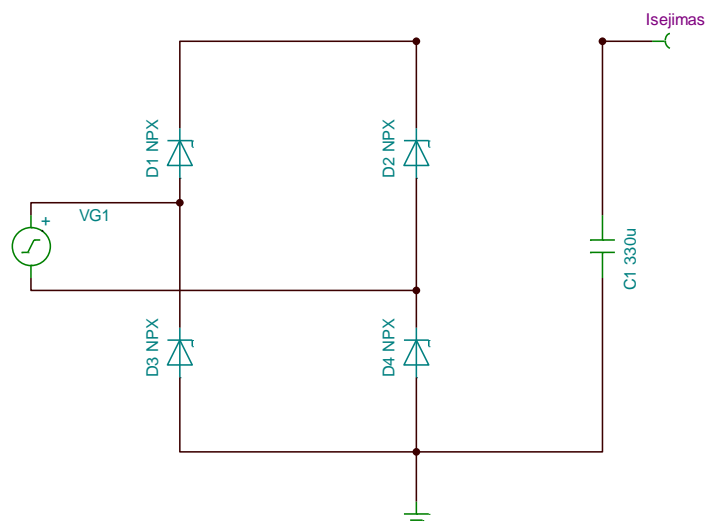
2.9 pav. Greinacherio įtampos daugiklis

Keičiant kondensatorių nominalus pastebėta, kad esant didesniems C1-C4 talpumams gaunama nežymiai didesnė DC įtampa, tačiau ilgėja užsikrovimo laikas. C5 kondensatoriaus nominalas mažina įtampos bangavimą. Didinant talpą, taipogi didėja fiziniai elementų matmenys, įtakojantys spausdintinės plokštės dydį. Geriausi rezultatai pasiekti su C1=C2=330μF ir C3=C4=C5=220μF nominalais. 2.10 pav. pavaizduotos grandinės su parinktais elementų nominalais simuliacijos rezultatai pateikti 2.10 paveiksle.



2.10 pav. Simuliacijos rezultatai

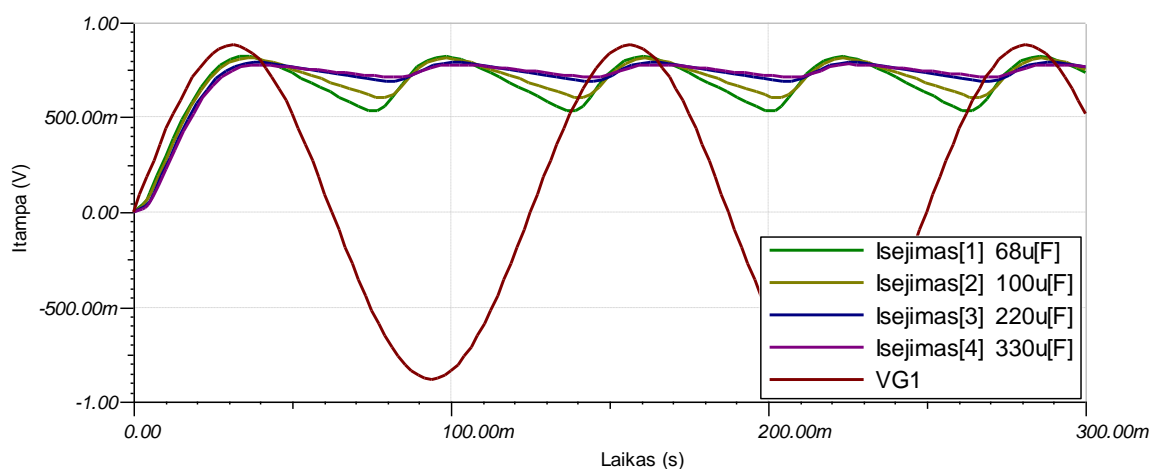
Kadangi diodų tilteliui naudosime tuos pačius šotkio diodus, tereikia išsirinkti tinkamą vieno kondensatoriaus nominalą. Generatoriuje nustatomi tokie pat parametrai, o C1 keičiamas realiomis kondensatorių vertėmis (68uF, 100uF, 220uF, 330uF, 470uF).



2.11 pav . Įtampos lygintuvas

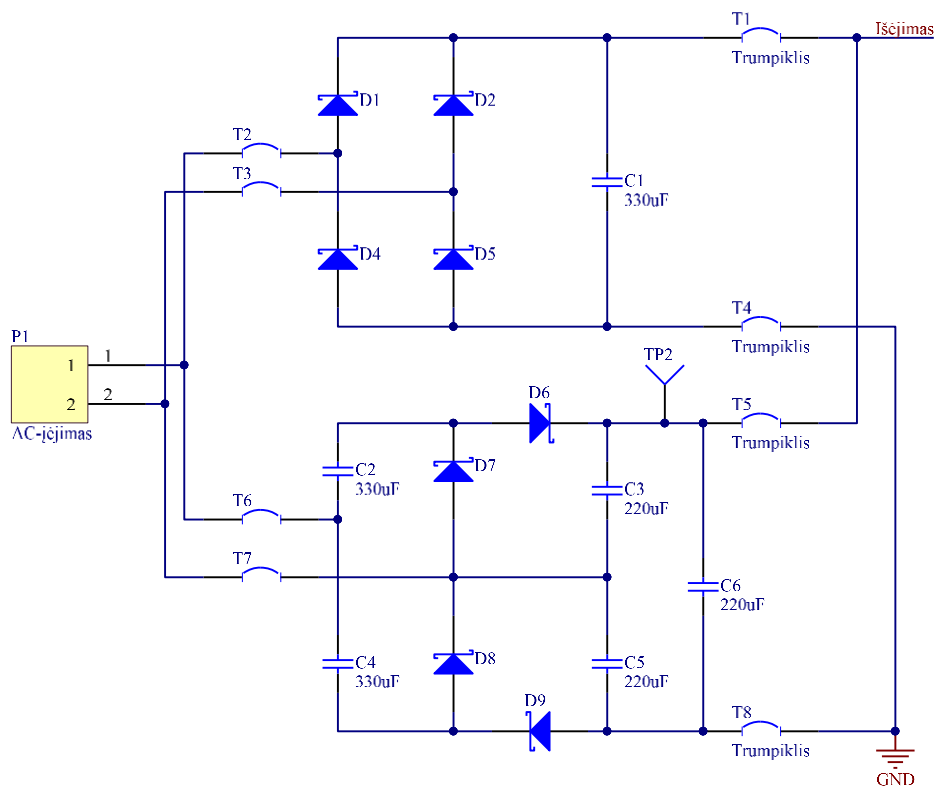
Išėjimo charakteristikos pateiktos 2.12 paveiksle. Modeliavimo rezultatai rodo, kad naudojant PMEG1020EA šotkio diodų tiltelį tiesiausiai išėjimo įtampa gaunama esant 330uF

kondensatoriui, toliau didinant kondensatoriaus nominalą didėja jo fiziniai gabaritai, o išėjimo charakteristika darosi lėkštesnė. Atsižvelgiant į rezultatus, parenkama 330uF diodų tiltelio kondensatoriaus reikšmė.



2.12 pav. Simuliavimo rezultatai

Sudaryta eksperimentinės plokštės schema pateikta 2.13 pav. P1 – energijos šaltinio prijungimas prie įtampos keitiklių. T2, T3, T6 ir T7 yra trumpikliai, kurių pagalba prijungiamas įtampos lygintuvas - diodų tiltelis, arba Greinacherio įtampos daugiklius. T1, T4, T5 ir T8 trumpiklių pagalba išėjimas prijungiamas į galios valdymo grandinės įėjimą.



2.13 pav. Įtampos keitiklių schema

Vienu metu gali būti uždėti tik įtampos daugiklį arba tik įtampos lygintuvą prie energijos šaltinio ir energijos valdymo grandinės prijungiantys trumpikliai.

2.5. Valdymo grandinių projektavimas

Remiantis 1.2.2 skyriuje atlikta integruotųjų galios valdymo grandinių analize, frikcinės dviračio pavaros kontrolės sistemai buvo parinkta BQ25504 mikroschema. BQ25504 turi platų įėjimo įtampos diapazoną, kuris bus išnaudojamas dviratininkui minant įvairiais dažniais. Kadangi mikroschema turi aukštą naudingumo koeficientą [41], integruotą MPPT algoritmą, DC-DC įtampos keitiklį, energijos kaupimo elemento valdymo funkciją ir programuojamo įtampos lygio išvadą, skirtą apkrovos prijungimui [42], projektuojama schema supaprastėja ir didėja PCB plokštės integracijos laipsnis.

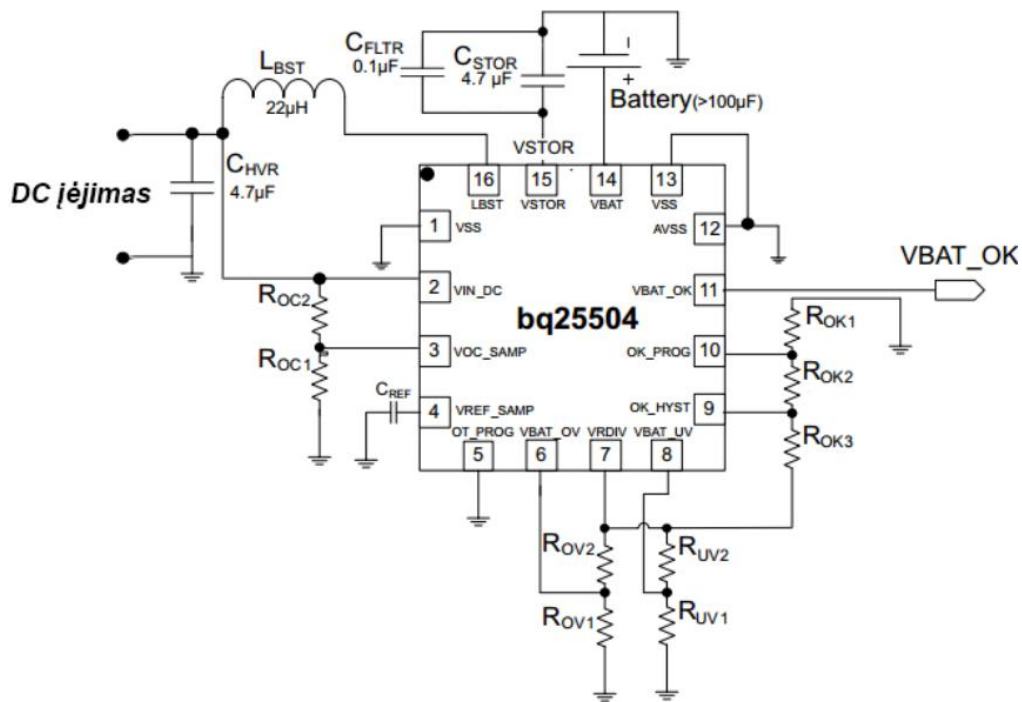
Atsižvelgiant į sistemą, parenkami įtampų slenksčiai, įtakojantys BQ25504 veikimą. Esant „šaltam startui“, kai įėjimo įtampa žema, veikia mažo naudingumo aukštinantysis konverteris, kurio tikslas įkrauti prie VBAT išvado prijungtą kondensatorių ir energijos kaupimo elementą iki 1.8V įtampos lygio, tuomet įsijungia didelį naudingumo koeficientą turintis kitas aukštinantysis konverteris. Žemiausią įtampos lygį, kuomet energijos kaupimo elementas atjungiamas nuo apkrovos reikia parinkti aukštesnį nei 1.8V, nes esant toliau prijungtai apkrovai BQ25504 vėl pereis į „šalto starto“ režimą. Didžiausia galima įtampa parenkama pagal mikrovaldiklio maksimalią įtampą.

BQ25504 techninėje dokumentacijoje [42] veikimas garantuojamas esant minimaliai nustatytai baterijos įtampai 2,2V. Todėl remdamiesi gamintojo rekomendacijomis ir atsižvelgiant į projektuojamą sistemą parinkti įtampos lygiai pateikti 2.3 lentelėje.

2.3 lentelė. Slenkstinių įtampų vertės

| Vidiniai įtampų slenksčiai | | | |
|---------------------------------|------------|--|-------------------------|
| Žymėjimas | Reikšmė, V | Paaškinimas | Sąlyga |
| VBIAS | 1,25 | Vidinis įtampos mazgas, naudojamas kaip atskaitos taškas | - |
| VBAT_OV_HYST | 0,035 | Įtampai mažėjant, ir esant VBAT_OV-VBAT_OV_HYST Įtampai, įjungiamas DC – DC keitiklis energijos saugojimo elemento krovimui | $P_{IN} < P_{apkrovos}$ |
| VBAT_UV_HYST | 0,080 | Įtampai didėjant, apkrova prijungiama, esant VBAT_UV+VBAT_UV_HYST įtampos lygiui. | $P_{IN} > P_{apkrovos}$ |
| Programuojami įtampų slenksčiai | | | |
| VBAT_UV | 2,2 | Įtampa, kuriai esant atjungiamas apkrova, apsisaugant nuo perėjimo į „šalto starto“ režimą. | $P_{IN} < P_{apkrovos}$ |
| VBAT_OV | 3,6 | Įtampa, kurią pasiekus išjungiamas saugojimo elemento krovimo grandinė. | $P_{IN} > P_{apkrovos}$ |
| VBAT_OK | 2,2 | Įtampos slenkstis apkrovos atjungimui nuo saugojimo elemento (mažėjant elemento įtampai) | $P_{IN} < P_{apkrovos}$ |
| VBAT_OK_HYST | 2,4 | Įtampos slenkstis apkrovos prijungimui prie saugojimo elemento (didėjant elemento įtampai) | $P_{IN} > P_{apkrovos}$ |

2.3 lentelėje pateiktus įtampų lygius ir histerezės grafiškai paaishkina 2.16 pav. Histerezės padeda išvengti apkrovos junginėjimosi. Pavyzdžiui, jeigu nebūtų skirtumo tarp VBAT_OK_HYST ir VBAT_OK lygių, prijungus apkrovą ir nukritus įtampai, apkrova iškart būtų atjungiama. Jei atjungus apkrovą įtampos lygis vėl iškart pakiltų virš VBAT_OK lygio, apkrova vėl būtų prijungiama. Panaudojus histerezę, ši junginėjimosi problema išsprendžiama. BQ25504 pavyzdinė jungimo schema pavaizduota 2.14 pav.



2.14 pav. Tipinė BQ25504 jungimo schema [42]

Remiantis BQ25504 technine dokumentacijoje [42] pateiktomis formulėmis apskaičiuojami įtampų lygius nustatančių rezistorių nominalai. Rekomenduojama suminė rezistorių vertė:

$$RSUM_{OV} = RSUM_{UV} = RSUM_{OK} = 10M\Omega \quad (2.4)$$

Daugumos mikrovaldiklių maksimali maitinimo įtampa yra 3,6 V, todėl šis lygis parenkamas kaip maksimali energijos kaupimo elemento įtampa. Rezistorinių daliklių nominalai OV lygio nustatymui:

$$R_{OV1} = \frac{3}{2} \cdot \frac{RSUM_{OV} \cdot VBIAS}{VBAT_{OV}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{10 \cdot 10^6 \cdot 1.25}{3.6} = 5,208M\Omega \quad (2.5)$$

$$R_{OV2} = RSUM_{OV} - R_{OV1} = 10 \cdot 10^6 - 5,208 \cdot 10^6 = 4,792M\Omega \quad (2.6)$$

Parinkamos realios artimiausios rezistorių vertės $R_{OV1} = 5,1M\Omega$ ir $R_{OV2} = 4,7M\Omega$. Naudojant realias vertes, gaunamas OV lygis:

$$VBAT_{OV} = \frac{3}{2} VBIAS \left(1 + \frac{R_{OV2}}{R_{OV1}} \right) = \frac{3}{2} \cdot 1,25 \cdot \left(1 + \frac{4,7 \cdot 10^6}{5,1 \cdot 10^6} \right) = 3,602V \quad (2.7)$$

Rezistorinių daliklių nominalai UV lygio nustatymui:

$$R_{UV1} = \frac{RSUM_{UV} \cdot VBIAS}{VBAT_{UV}} = \frac{10 \cdot 10^6 \cdot 1,25}{2,2} = 5,68M\Omega \quad (2.8)$$

$$R_{UV2} = RSUM_{UV} - R_{UV1} = 10 \cdot 10^6 - 5,68 \cdot 10^6 = 4,32M\Omega \quad (2.9)$$

Realios artimiausios rezistorių vertės gana skiriasi nuo apskaičiuotų, todėl reikiama nominalas gaunamas kombinuojant po du rezistorius. $R_{UV1} = 5,1M\Omega + 470k\Omega = 5,57M\Omega$ ir $R_{UV2} = 2,4M\Omega + 2M\Omega = 4,4M\Omega$. Naudojant realias vertes, gaunamas OV lygis:

$$VBAT_{UV} = VBIAS \left(1 + \frac{R_{UV2}}{R_{UV1}} \right) = 1,25 \left(1 + \frac{4,4 \cdot 10^6}{5,57 \cdot 10^6} \right) = 2,23V \quad (2.10)$$

Nebūtina, tačiau patartina apkrovą įjungti naudojant išorinį tranzistorių, jį valdant VBAT_OK signalu. Šie lygiai nustatomi R_{OK1} , R_{OK2} ir R_{OK3} rezistorių pagalba.

$$R_{OK1} = \left(\frac{VBIAS \cdot RSUM_{OK}}{VBAT_OK_HYST} - 1 \right) = \left(\frac{1,25 \cdot 10 \cdot 10^6}{2,4} - 1 \right) = 5,208M\Omega \quad (2.11)$$

$$R_{OK2} = \left(\frac{VBAT_OK_PROG}{VBIAS} - 1 \right) \cdot R_{OK1} = \left(\frac{2,2}{1,25} - 1 \right) \cdot 5,208 = 3,958M\Omega \quad (2.12)$$

$$R_{OK3} = RSUM_{OK} - R_{OK1} - R_{OK2} = 10 - 5,208 - 3,958 = 0,834M\Omega \quad (2.13)$$

Realios reikšmės $R_{OK1} = 5,1M\Omega$, $R_{OK2} = 4M\Omega$, $R_{OK3} = 0,8M\Omega$. Su šiomis reikšmėmis gaunami lygiai:

$$VBATOK_{PROG} = VBIAS \left(1 + \frac{R_{OK2}}{R_{OK1}} \right) = 1,25 \left(1 + \frac{4 \cdot 10^6}{5,1 \cdot 10^6} \right) = 2,23V \quad (2.14)$$

$$VBATOK_{HYST} = VBIAS \left(1 + \frac{R_{OK2} + R_{OK3}}{R_{OK1}} \right) = 1,25 \left(1 + \frac{4 \cdot 10^6 + 0,8 \cdot 10^6}{5,1 \cdot 10^6} \right) = 2,426V \quad (2.15)$$

Gautieji įtampų slenksčiai artimi numatytiems. MPPT veikimas nustatomas ties 50% nuo šaltinio atviros grandinės įtampos .

$$R_{SUM}_{OC} = R_{OC1} + R_{OC2} = 20M\Omega \quad (2.16)$$

$$R_{OC1} = \left(\frac{VREF_SAMP}{VIN_DC(OC)} \right) \cdot R_{SUM}_{OC} \quad (2.17)$$

Čia santykis $VREF_SAMP/VIN_DC(OC)$ yra dydis, nurodantis MPP tašką priklausomai nuo atviros grandinės įtampos. Kadangi didžiausia galia gaunama ties pusė atviros grandinės įtampos, koeficientas parenkamas 0,5.

$$R_{OC1} = 0,5 \cdot 20 \cdot 10^6 = 10M\Omega \quad (2.18)$$

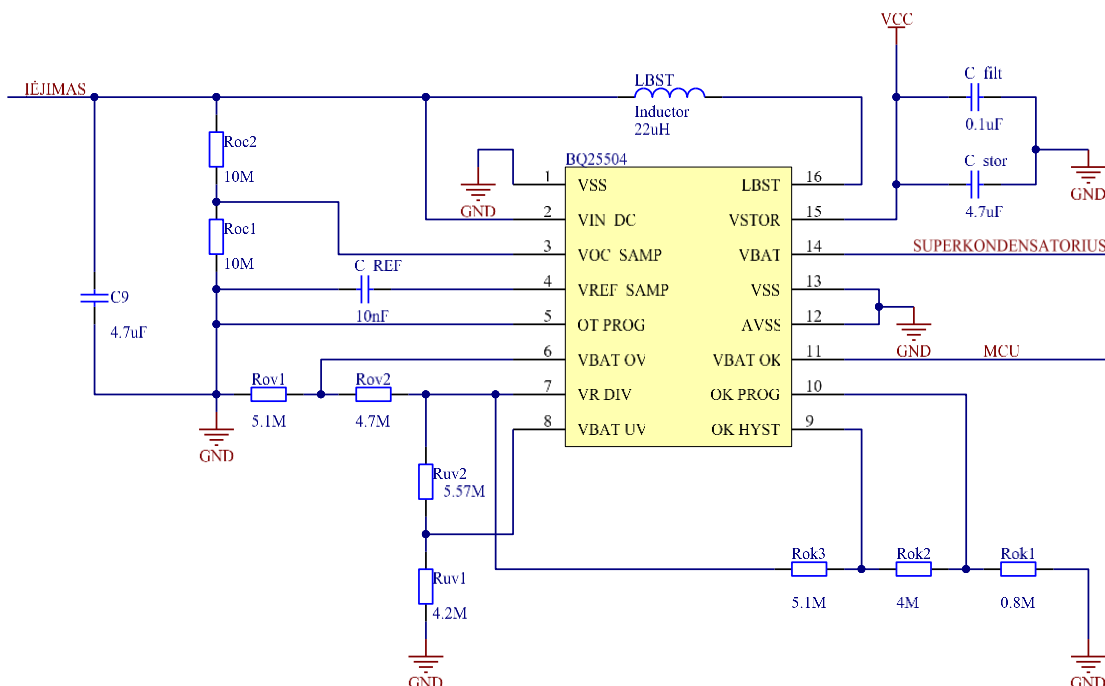
$$R_{OC2} = R_{SUM}_{OC} - R_{OC1} = 10M\Omega \quad (2.19)$$

BQ25504 įėjimo įtampa palaikoma, atsižvelgiant į atraminę įtampą, kuri apskaičiuojama taip:

$$VREF_SAMP = VIN_DC_{OC} \left(\frac{R_{OC1}}{R_{OC1} + R_{OC2}} \right) \quad (2.20)$$

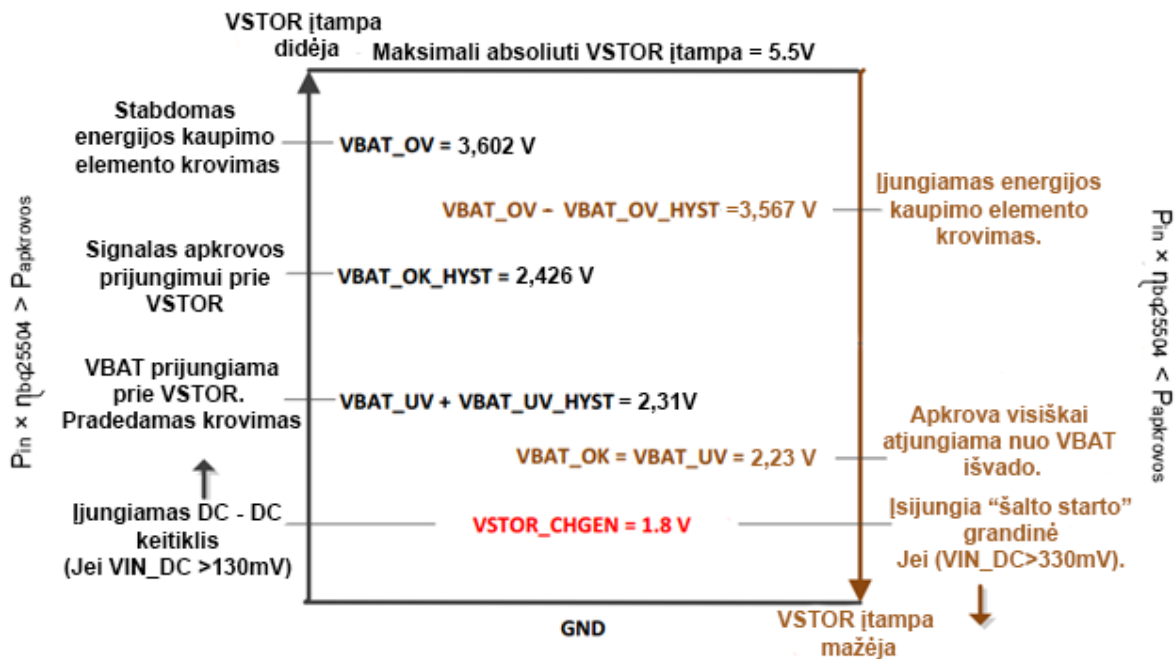
čia VIN_DC_{OC} - atviros grandinės įtampa, V.

VBAT_OK signalu valdomo tranzistoriaus pagrindiniai kriterijai – atsidarymo įtampa ir varža tarp santakos ir ištakos, lemsianti įtampos kritimą. Šiam tikslui tinkamiausi loginio lygio tranzistoriai, todėl buvo parinktas IRLR024N tranzistorius, turintis minimalią 1V atsidarymo įtampą ir $R_{DS} = 0.065\Omega$ [44] varžą tarp santakos ir ištakos. Suprojektuotas BQ25504 galios valdymo mazgas pateiktas 2.15 pav.



2.15 pav. BQ25504 galios valdymo mazgas

Supaprastintas BQ25504 veikimo algoritmas atsižvelgiant į įėjimo galią su apskaičiuotais frikcinės dviračio pavaros kontrolės sistemoje naudojamais įtampos slenksčiais pateiktas 2.16 pav.



2.16 pav. BQ25504 veikimas su apskaičiuotais įtampų slenksčiais

Juodai pažymėtos funkcijos ir įtampų lygiai naudojami esant didesnei, o pažymėti rudai – mažesnei įėjimo galiai palyginti su apkrovos naudojama galia.

2.6. Bevielė sąsaja

Vienas pagrindinių projektuojamos sistemos kriterijų – kaina bei paprastumas. Ši kriterijų tenkina pigūs radijo dažnio moduliai. Kadangi atstumas nuo pedalų iki elektrinės dviračio pavaros yra mažesnis nei 1 metras, RF moduliui dideli nuotolio reikalavimai nekelti. Čia svarbiausia yra suvartojama galia. „Texas Instruments“, kaip vienas lyderių mažos galios elektronikoje turi visą seriją mažos galios RF siųstuvų – imtuvų [45]. Plačiausiai naudojami yra CC2500 IR CC1101. Rinkoje RF modulių pasirinkimas labai didelis, o jų kaina svyruoja nuo keletos centų iki dešimčių eurų.

2.4 lentelė. Bevielio ryšio moduliai

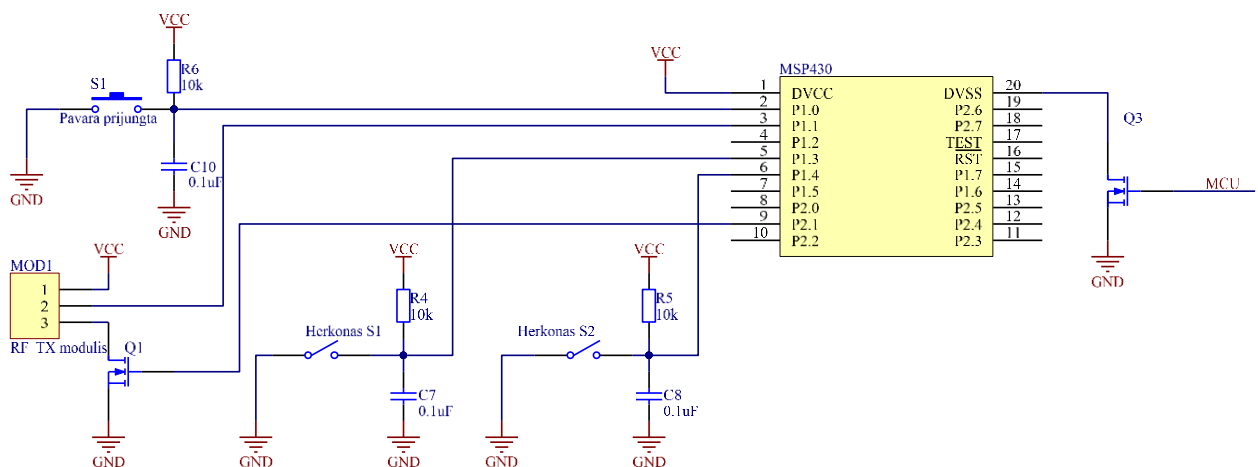
| | Maitinimo įtampa | Veikimo dažnis | Srovės suvartojimas | Maksimali duomenų perdavimo sparta | Kaina |
|--------|------------------|----------------|---------------------|------------------------------------|---------|
| CC2500 | 1,8 - 3,6 V | 2,4 GHz | Budėjimo 1.5mA | 250kbit/s | Apie 4€ |

| | | | | | |
|-------------------|-------------|---------------------------------|---|-----------|---------------|
| | | | Siuntimo 21mA Priėmimo 15mA | | |
| CC1101 | 1,8 - 3,6 V | 315/433/868/915 MHz | Budėjimo metu: <u>1.7mA@433MHz</u> Siuntimo metu: 13mA @433MHz Priėmimo metu 16mA @433MHz | 250kbit/s | Apie 5€ |
| nRF24L0 | 1,9 – 3,6V | 2.4GHz | Budėjimo metu: 22uA Siuntimo metu: 11,3mA Priėmimo metu: 12.3mA | 2Mbit/s | Apie 1€ |
| XBee | 2,8-3,4V | 2,4 GHz | Budėjimo metu: 50uA Siuntimo metu: 45mA Priėmimo metu: 50mA | 250kbit/s | 23€ |
| SemTECH sx1211 | 2,1 – 3.6 V | 863-870,902-928,950- 960 MHz | Budėjimo metu: 80uA Siuntimo metu: 11,3mA Priėmimo metu: 3mA | 200kbit/s | Apie 4€ |
| MX-FS- 03V | 3 - 12 | 433 MHz | Nepateikta | 4kb/s | Mažiau nei 1€ |

Pigiausias RF turi mažiausią duomenų perdavimo spartą, ir aukštesnę maitinimo įtampą. MX-FS-03V keletą kartų pigesnis nei Texas Instruments CC serijos moduliai, todėl dėmesys orientuojamas į jį. Informacijos apie kitus techninius MX-FS-03V mažai, todėl reikiamos charakteristikos bus iširtos eksperimentiškai. Vizualiai matoma, kad MX-FS-03V modulis valdomas dviem tranzistoriais. Darant prielaidą, kad tranzistorius prasidaro esant 0,7V įtampai, modulis turi veikti žemesnėje įtampoje nei nurodyta 2.4 lentelėje.

Mikrovaldiklis įjungiamas pasinaudojant prieš tai suprojektuotoje energijos valdymo grandinėje esančio BQ25504 „VBAT_OK“ signalu papildomai panaudojant išorinį loginio lygio tranzistorių IRLR024N.

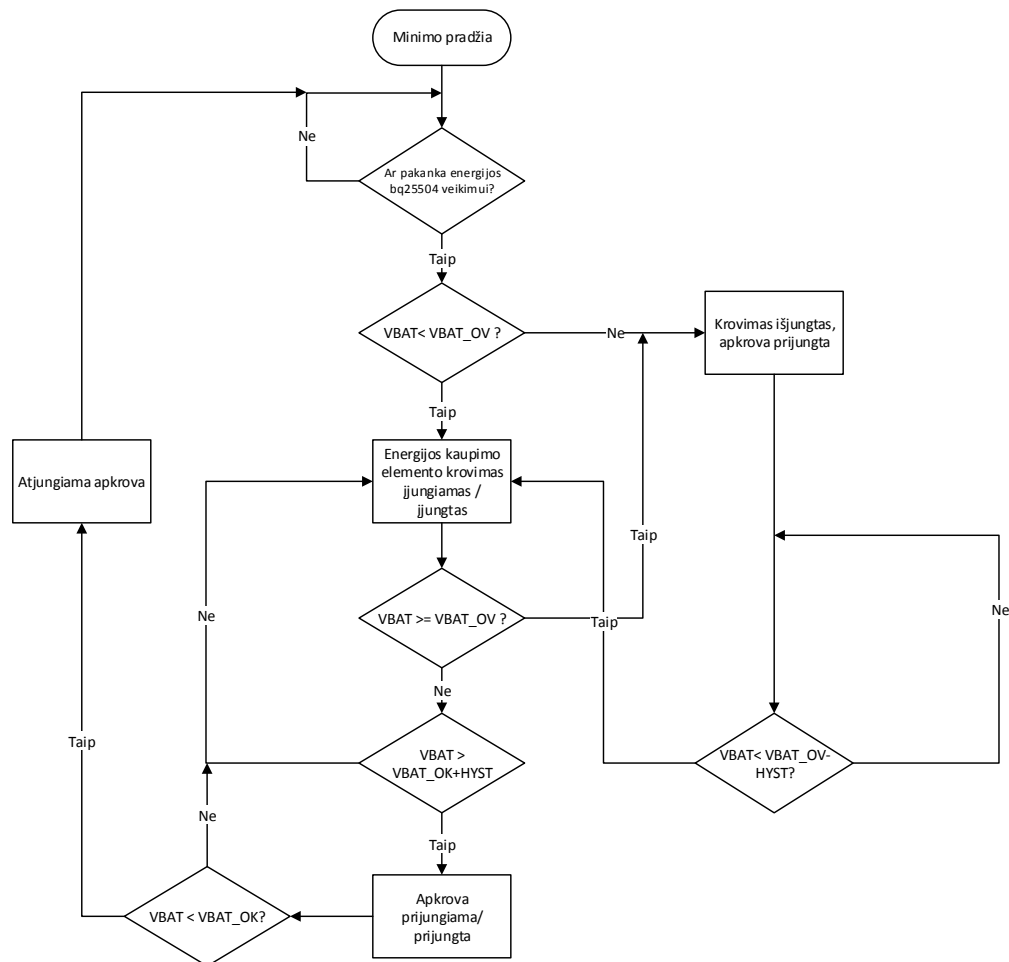
Mikrovaldiklio su beviële sąsaja ir pedalų minimo krypties indikacija schema pateikta 2.17 pav.



2.17 pav. Beviële sąsaja ir sukimosi krypties detekcija

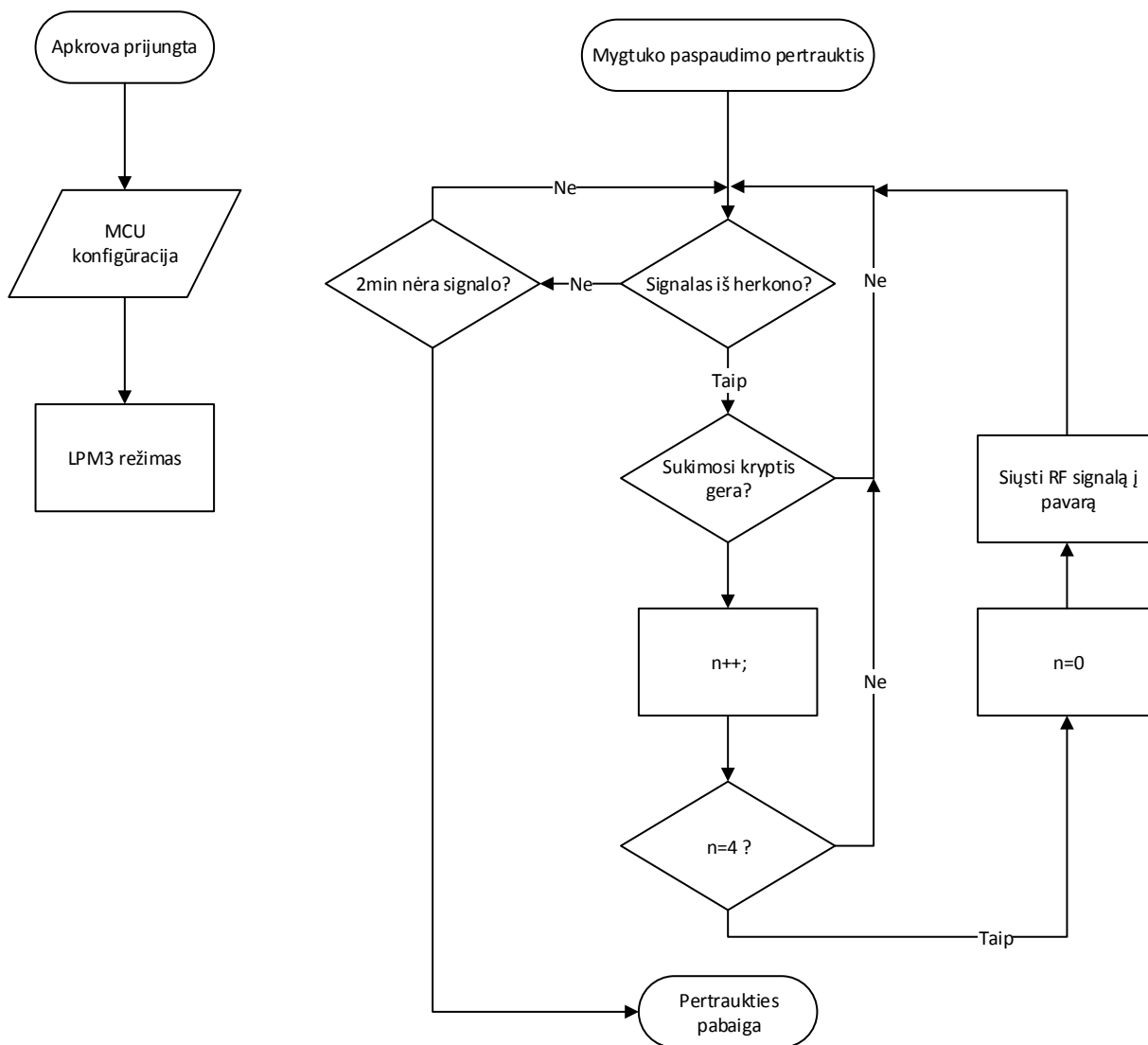
2.7. Realizuota sistema ir jos veikimo algoritmas

Pilnas frikinės dviračio pavaros kontrolės sistemos veikimas apibūdinamas galios valdymo ir likusios sistemos algoritmais, pateiktais 2.18 ir 2.19 pav.



2.18 pav. Frikcinės dviračio pavaros kontrolės sistemos maitinimo valdymo grandinės veikimo algoritmas

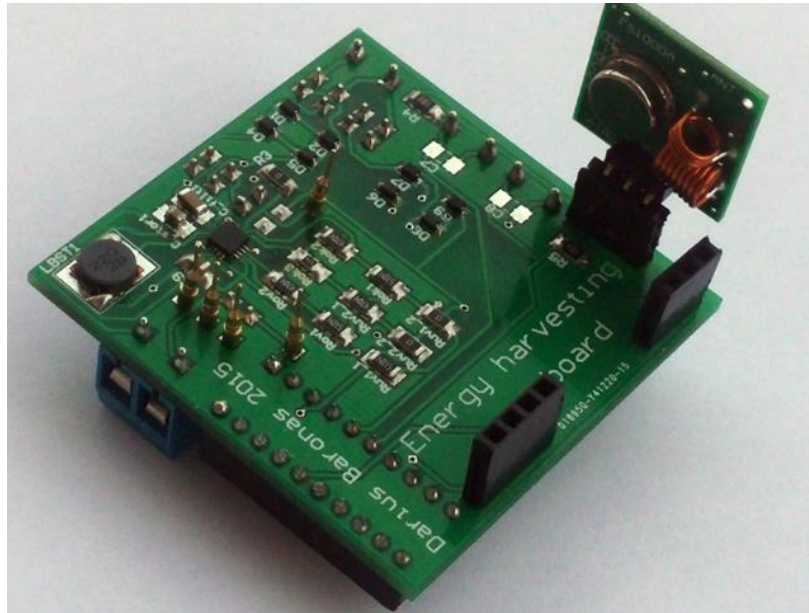
Prieš įjungiant energijos kaupimo elemento krovimą nustatomas esamas įtampos lygis. Jei įtampa žemesnė nei $VBAT_{OV}$, tuomet įjungiamas krovimo grandinė. Jeigu jau yra pasiektas $VBAT_{OK}+HYST$ lygis, tuomet prijungiama apkrova. Priklausomai ar prijungus apkrovą įtampa kaupimo elemente auga ar krenta, pasiekus slenkstines sąlygas krovimas išjungiamas dėl pilnai įkrauto elemento, arba atjungiamas, įtampai nukritus per žemai. Prijungus apkrovą sistema vykdo 2.19 pav. algoritimą.



2.19 Sistemos algoritmas, vykdomas esant prijungtai apkrovai

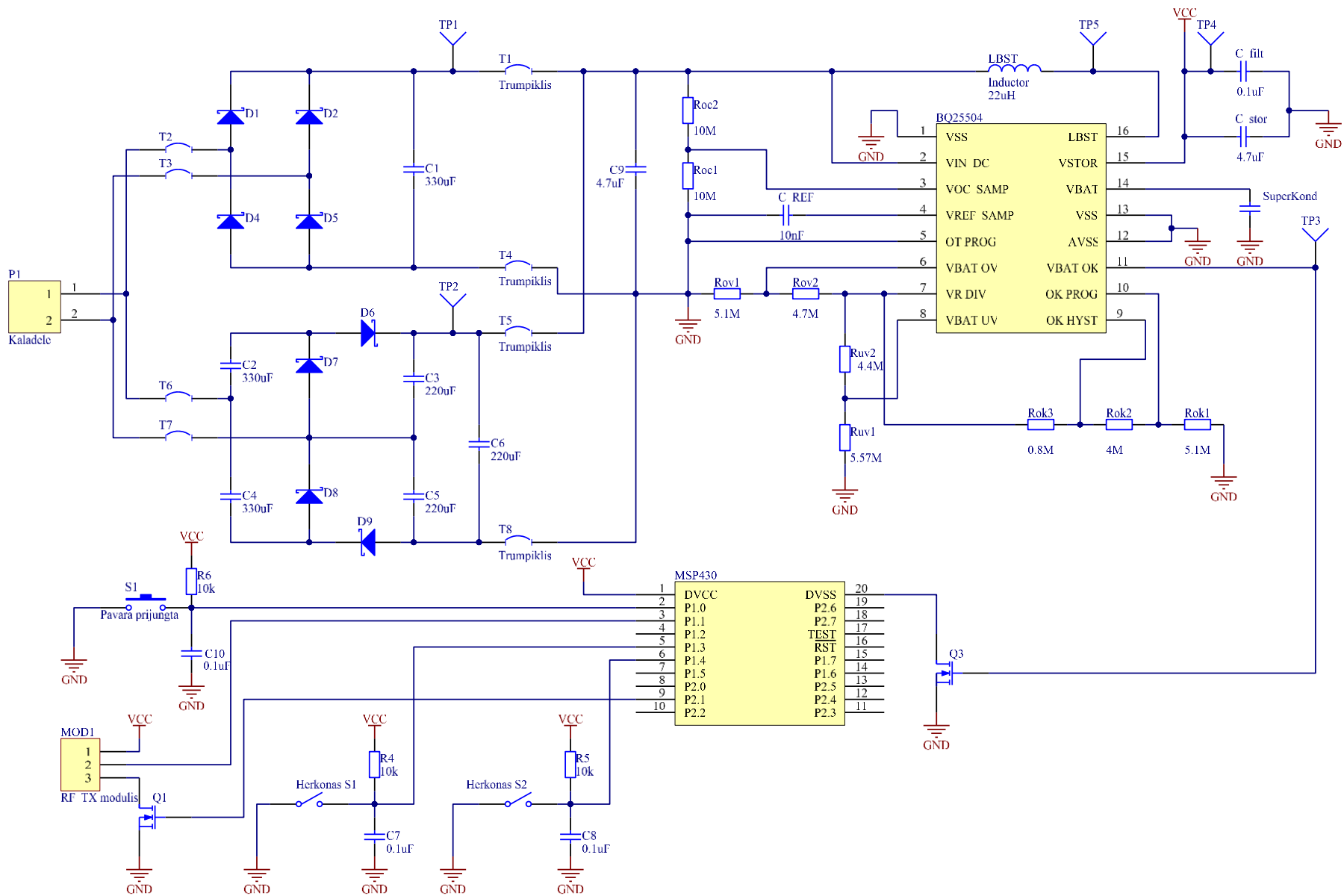
Įsijungus mikrokontrolieriui, atsižvelgiant į Texas Instruments programavimo gide [45] pateiktus patarimus siekiant kiek įmanoma sumažinti mikrovaldiklio vartojamą galią, sukonfigūruojami naudojami įėjimo / išėjimo ir nenaudojami mikrokontrolierio išvadai. Taip pat, inicializuojama UART sąsaja, kurios pagalba formuojami duomenys RF siųstuvui. Pasibaigus konfigūravimo procesui, mikrovaldiklis pereina į mažos galios LMP3 režimą ir yra pažadinamas tik vartotojui paspaudus mygtuką. Po paspaudimo iškart pasirošama signalų iš herkoninių jutiklių priėmimui ir apdorojimui. Gavus impulsus nustatoma pedalų minimo kryptis. Jei kryptis gera, didinama skaitliuko reikšmė vienetu. Pasiekus $n=4$ reikšmė skaitliukas įnulinamas ir bevieliu ryšiu išsiunčiamas duomenų paketas frikcinei dviračio pavarai. Jeigu minimo kryptis bloga – jokie duomenys nesiunčiami. Ilgai negaunant signalų iš herkonų interpretuojama, pavara nebenaudojama, pertrauktis baigiama ir vėl pereinama į miego režimą.

Sudaryta frikcinės dviračio pavaros kontrolės sistemos eksperimentinė schema pateikta 2.21 pav., o sulituota eksperimentinė PCB plokštė pateikta 2.20 pav.



2.20 pav. Eksperimentinė frikinės dviračio pavaros kontrolės sistemos

Altium Designer aplinkoje sutrasuotos plokštės brėžiniai, 3D vizualizacija pateikta 1 ir 2 priede. 3 priede pateikta pagaminta PCB plokštė.



2.21 pav. Principinė frikinės dviračio pavaros kontrolės sistemos bandymų plokštės schema

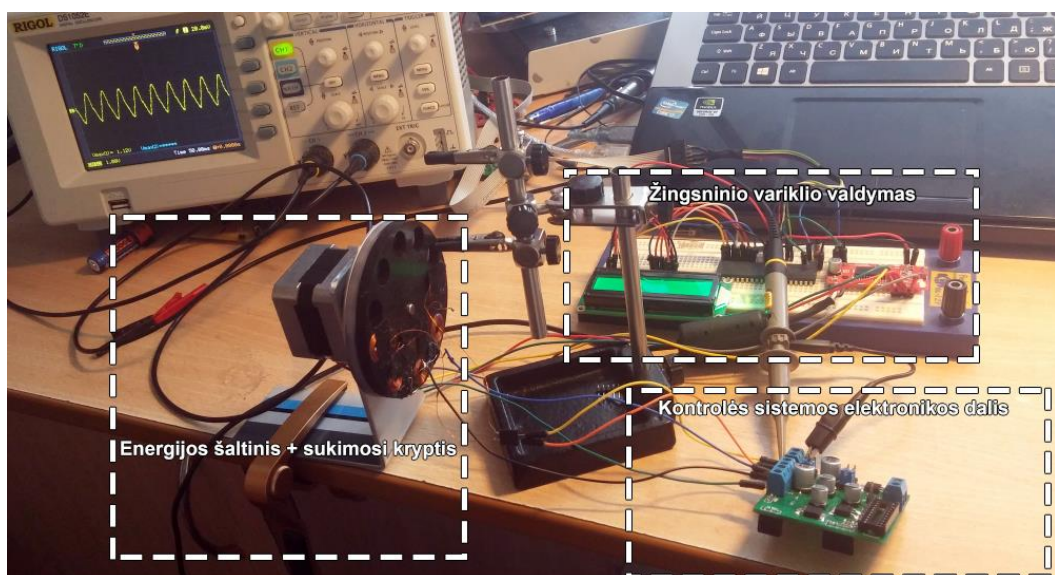
2.8. Apibendrinimai

Remiantis „Comsol Multiphysics 5“ atliktų modeliavimų ir skaičiavimų rezultatais parinktas magnetų skaičius rotorinėje dalyje yra 16. Atsižvelgiant į magnetines savybes, parinkti NdFeB N50 magnetai. Ričių (5) kiekis ir geometriniai dydžiai parinkti atsižvelgiant į statorinės dalies plotą. Iš gautų rezultatų matyti, kad tostant nuo rotorinės dalies, magnetinio lauko srauto tankis mažėja eksponentiniu dėsnio. Nustatyta, kad tarpas tarp statorinės ir rotorinės dalies būtų ne didesnis kaip 3mm. Parodyta, kad norint magnetinį lauką sutelkti į vieną pusę taip jį sustiprinant, reikia naudoti ekranavimą. Atsižvelgus į realizavimo paprastumą, priimtas sprendimas sukimosi krypties detektavimui naudoti du herkoninius jutiklius. „TINA TI“ programiniu paketu atlikti įtampos lygintuvo ir daugiklio modeliavimai. Tai leido parinkti ir pagrįsti elementų parinkimą. Atsižvelgiant į platų įėjimo diapazoną (0,08-5V), integruotus MPPT ir energijos kaupimo elemento valdymo algoritmus ir įtampos maitinimo įtampos reguliavimą buvo parinktas BQ25504 mikrograndynas.

Jis panaudojamas apkrovos maitinimo reguliavimo, energijos kaupimo elemento valdymo ir MPPT algoritmo realizavimui frikcinės dviračio pavaros kontrolės sistemoje. Atsižvelgiant į galios sunaudojimą parinktas MSP430 mikrovaldiklis. Remiantis mažiausios kainos kriterijumi, bevielei sąsajai realizuoti parinktas 433MHz dažniu veikiantis MX-FS-03V bevielio ryšio modulis. Atsižvelgus į pasirinktus sprendimus, suprojektuota frikcinės dviračio pavaros kontrolės principinė schema. „Altium Designer“ programinio paketo pagalba sutrasuota ir realizuota spausdintinio montažo plokštė. Pateikta 3D plokštės vizualizacija.

3. EKSPERIMENTINĖ DALIS

Dviračio ašies sukimosi imitavimui sukonstruotas stendas su žingsniniu varikliu. Sukimosi greitis programuojamas naudojant Atmega32 mikrovaldiklį ir “AVR Studio 4.19” programavimo aplinką. Ant variklio ašies užmaunama rotorinė dalis su magnetais, o statorinė dalis centruojama panaudojus tą pačią ašį, tačiau ji įtvirtinama kad nesisuktų. Energijos šaltinio išėjimas jungiamas į eksperimentinės plokštės įėjimo prijungimo kaladėlę. Į jiems skirtas vietas prijungiami herkoniniai jutikliai. Visa eksperimentinė sistema pavaizduota 3.1 pav. Matavimams atlikti naudojami RIGOL DS1052E oscilografas ir Pro’sKit MT-1270 multimetras.



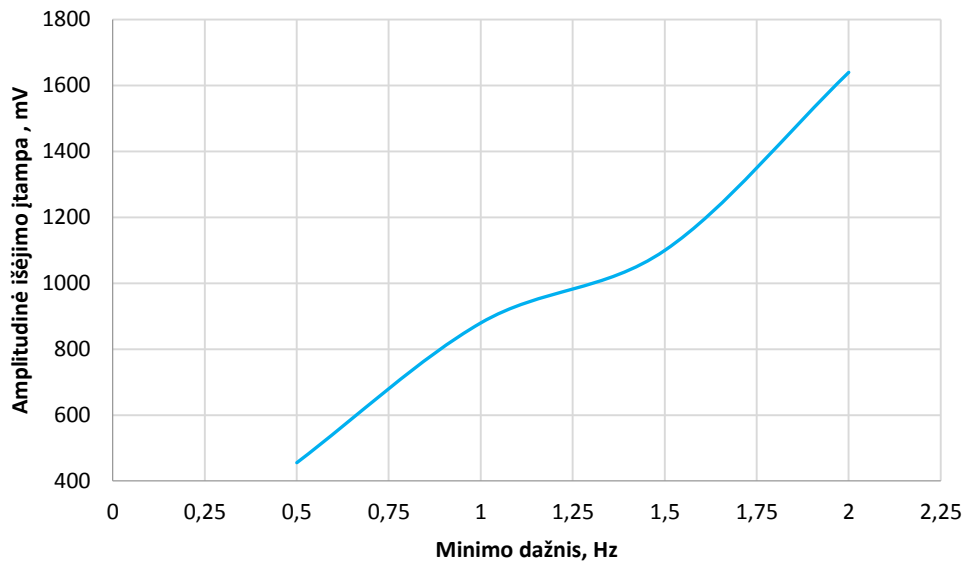
3.1 pav. Eksperimentinė sistema

3.1. Energijos šaltinio charakteristikų tyrimas

Energijos šaltinio išėjimas matuojamas esant keturiems skirtingiems dažniams, kurie imituoja skirtingą pedalų minimo greitį. Atstumas tarp magnetų ir ričių 1mm. Gautieji rezultatai pateikiami 3.1 lentelėje ir grafiškai atvaizduoti 3.2 paveiksluose.

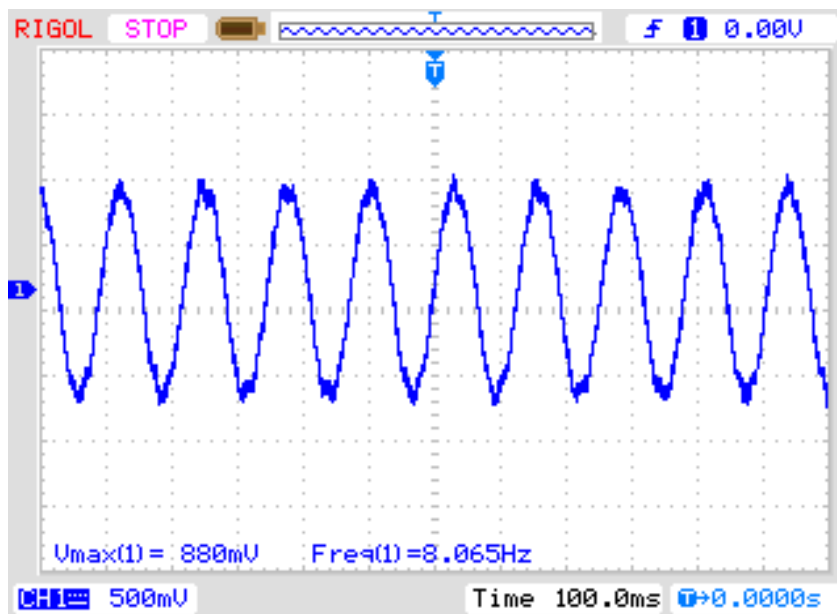
3.1 lentelė. Energijos šaltinio išėjimo charakteristikos

| Minimo dažnis, Hz | Šaltinio amplitudinė įtampa, mV |
|-------------------|---------------------------------|
| 0,5 | 456 |
| 1 | 880 |
| 1,5 | 1100 |
| 2 | 1640 |



3.2 pav. Energijos šaltinio išėjimo charakteristikos

3.2 pav. pateiktas grafikas rodo, kad išėjimo įtampas kitimas beveik tiesiškai priklauso nuo sukimosi dažnio. Oscilografe stebimas išėjimas esant 1Hz sukimosi dažniui pavaizduotas 3.3 pav.



3.3 pav. Energijos šaltinio išėjimas esant 1Hz sukimosi dažniui

Iš 3.3 pav. matyti, kad gaunamas 8Hz dažnio 880mV įtampos harmoninis signalas. Teoriškai apskaičiuotos ir eksperimento metu išmatuotos įtampų skirtumas:

$$\Delta V = V_{teor} - V_{eksp} = 960 - 880 = 80mV \quad (3.1)$$

Galima teigti, kad eksperimentiniai rezultatai nuo teoriškai apskaičiuotų skiriasi ~10% ribose.

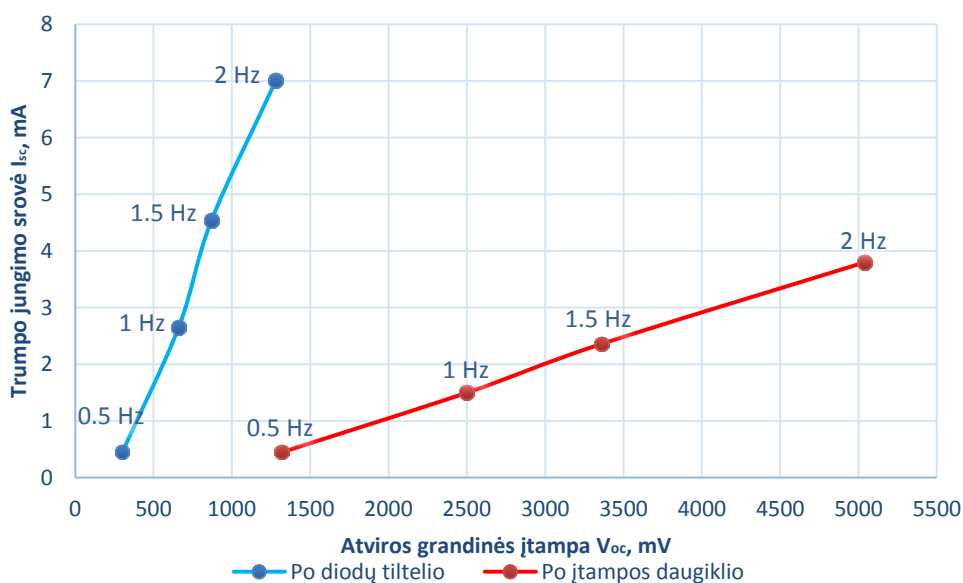
3.2. Įtampos daugiklio ir diodų tiltelio tyrimas

Atliekamas diodų tiltelio ir įtampos daugiklio išėjimo charakteristikų tyrimas, kai įėjimas paduodamas iš energijos šaltinio. Eksperimentas atliekamas esant keturiems rotorinės dalies sukimosi dažniams, kurie atitinka skirtingus pedalų minimo greičius. Išėjimo charakteristikos matuojamos be apkrovos. Diodų tiltelis su įtampos daugikliu yra atskiros, tarpusavyje nesusijusios grandinės, komutuojamos naudojant specialius trumpiklius, todėl niekada neprijungiamos vienu metu. Gauti rezultatai pateikti 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. Išėjimo charakteristikos be apkrovos

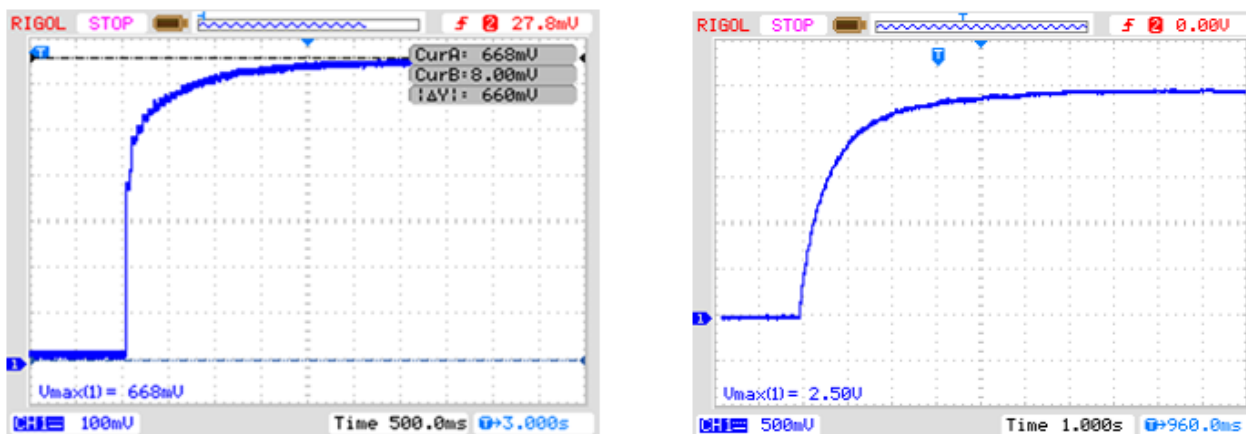
| Minimo dažnis, Hz | Po diodų tiltelio | | Po įtampos daugiklio | |
|-------------------|-------------------|---------|----------------------|---------|
| | Voc, mV | Isc, mA | Voc, mV | Isc, mA |
| 0,5 | 300 | 0,45 | 1320 | 0,45 |
| 1 | 660 | 2,65 | 2500 | 1,5 |
| 1,5 | 870 | 4,54 | 3360 | 2,36 |
| 2 | 1280 | 7 | 5040 | 3,8 |

Nubraižytos išėjimo charakteristikos pateiktos 3.4 pav.



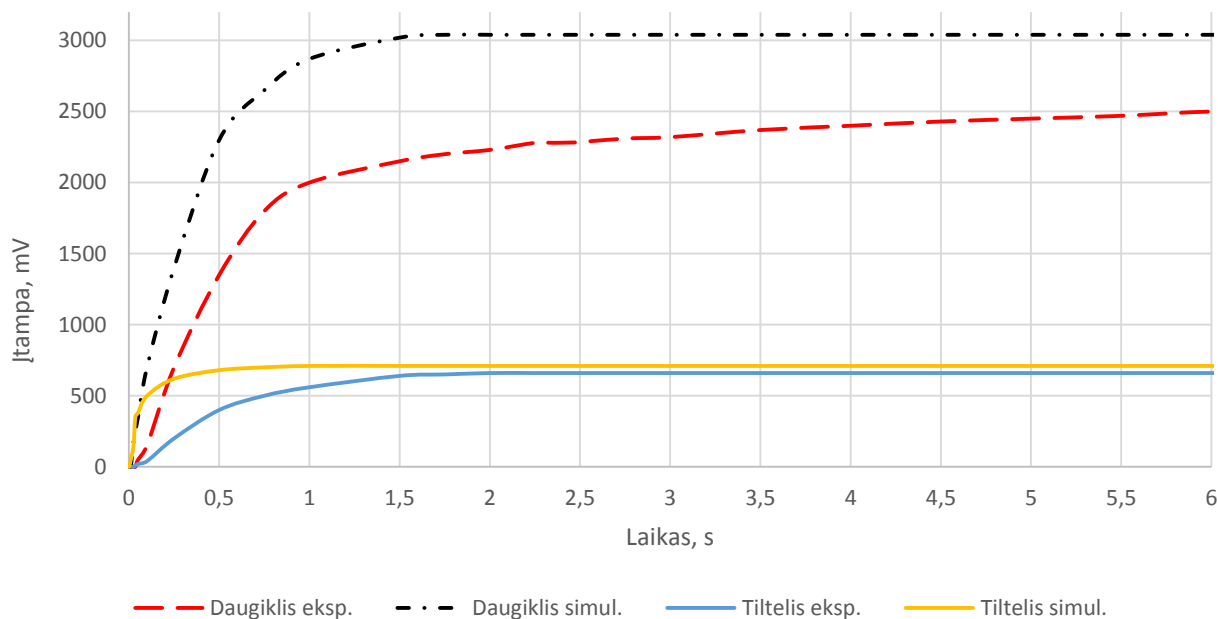
3.4 pav. Diodų tiltelio ir įtampos daugiklio išėjimo charakteristikos esant skirtingiems pedalų minimo dažniams

Lyginant įtampą diodų tilteliu gaunamas 220mV įtampos kritimas „šotkio“ diodams, todėl išėjime gaunama 660mV įtampa (DC), esant 880mV (AC) įėjimui. Esant 1Hz sukimosi dažniui, gaunama 2,5V įtampos daugiklio išėjimo įtampa. Tai rodo, kad įtampa pakeliama truputį daugiau nei 3 kartus. Maksimali daugiklio išėjime gaunama įtampa siekia 5,04V. Ši įtampa mažesnė nei maksimali galima BQ25504 įėjimo įtampa. 3.5 pav. gautos diodų tiltelio ir įtampos daugiklio oscilogramos, esant 1Hz sukimosi dažniui.



3.5 pav. Rezultatai, esant 1Hz sukimosi dažniui. Kairėje – diodų tiltelio išėjimas, dešinėje – įtampos daugiklio išėjimas

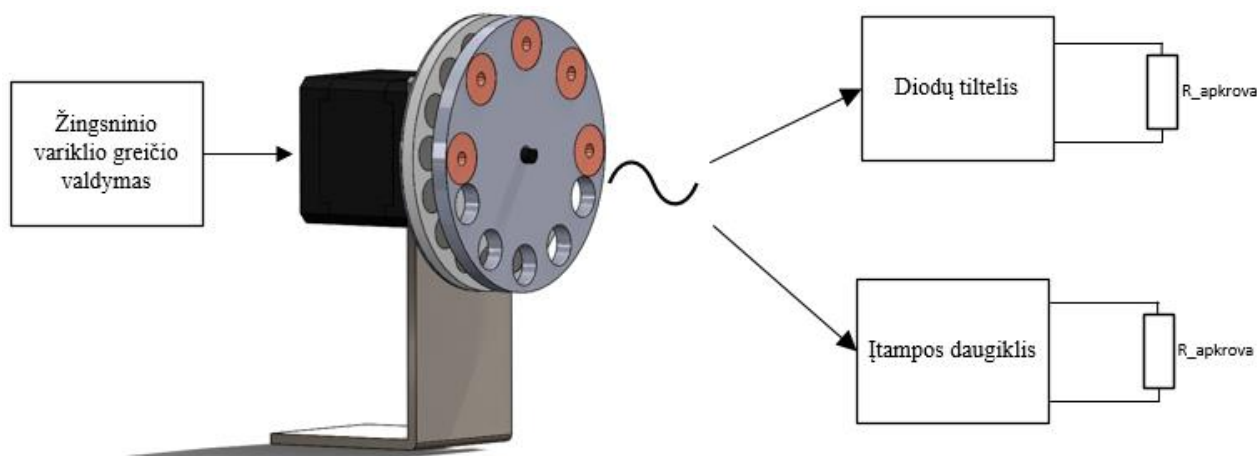
Gauti rezultatai rodo, kad diodų tiltelio išėjimas maksimalią savo įtampą pasiekia apytiksliai po 3 sekundžių, įtampos daugiklio maksimali reikšmė pasiekama po 6 sekundžių. 3.6 pav. palyginami TINA TI simuliacijos ir eksperimentiniai rezultatai.



3.6 pav. Simuliacijos ir eksperimentinių rezultatų palyginimas

Iš 3.6 pav. pastebima, kad eksperimentiniu būdu gauti rezultatai blogesni nei gautieji simuliacijos metu. Įtampos daugiklio atveju skirtumas siekia 18 procentų, ir maksimali įtampa pasiekama 4 sekundėmis vėliau. Diodų tiltelio atveju maksimalių įtampų skirtumas siekia vos 7 procentai, tačiau vėl pastebimas ženklus fronto kilimo laiko skirtumas.

Tyrimas su apkrova atliekamas esant pastoviam 1Hz sukimosi dažniui. Eksperimento schema pavaizduota 3.7 pav.

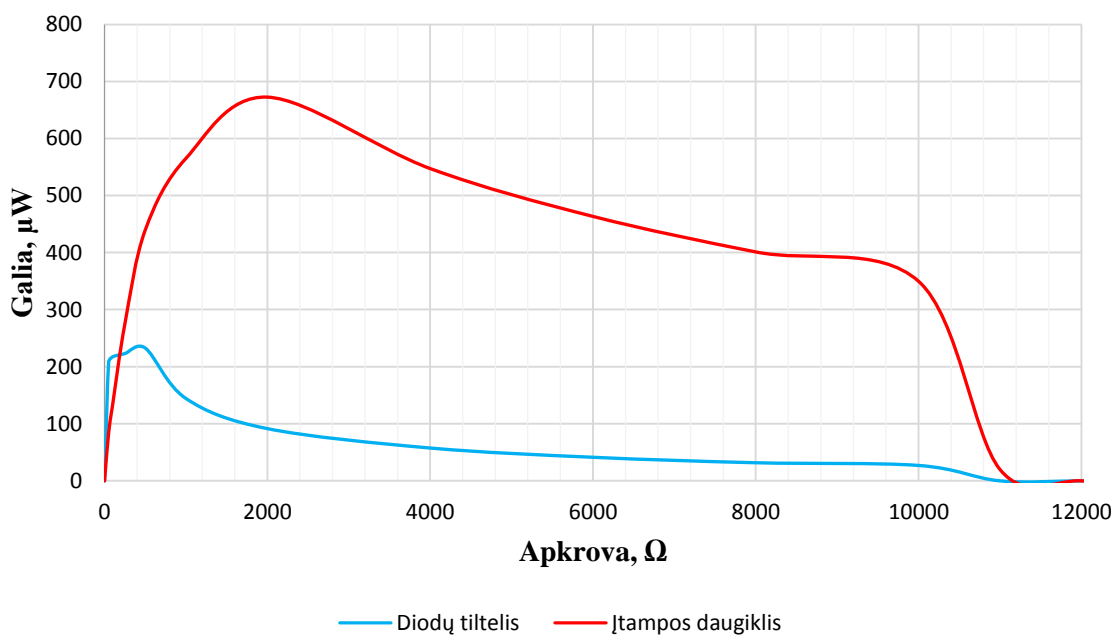


3.7 pav. Įtampos lygintuvų charakteristikų tyrimo eksperimentinė schema

Apkrovai naudojamas 10kΩ precizinis potenciometras. Prie generatoriaus prijungiamas diodų tiltelis, ir keičiant apkrovą matuojama įtampa ir srovė. Toks pat bandymas atliekamas prie generatoriaus prijungus įtampos daugiklį. Rezultatai pateikiami 3.3 lentelėje.

3.3 lentelė. Tyrimo su apkrova rezultatai

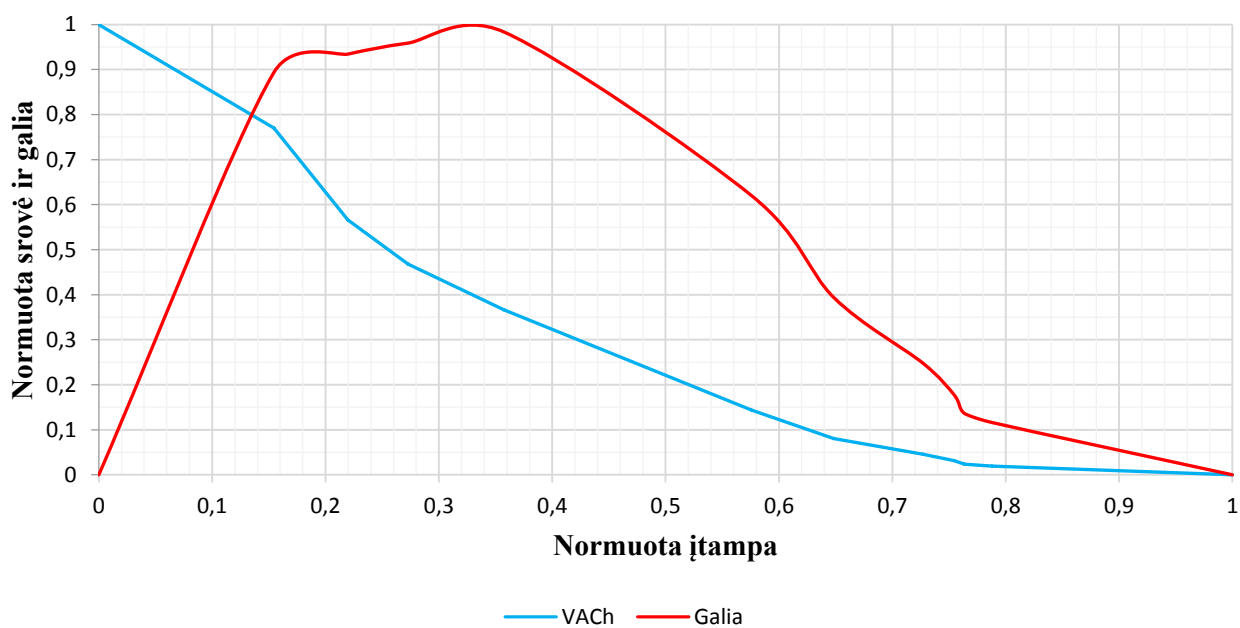
| Apkrova, Ω | Diodų tiltelis | | | Įtampos daugiklis | | |
|---------------|----------------|-----------|-----------|-------------------|-----------|-----------|
| | Įtampa, mV | Srovė, mA | Galia, μW | Įtampa, mV | Srovė, mA | Galia, μW |
| 0 | 0 | 2,65 | 0 | 0 | 1,5 | 0 |
| 50 | 102 | 2,04 | 208,08 | 65 | 1,3 | 84,5 |
| 100 | 145 | 1,5 | 217,5 | 116 | 1,16 | 134,56 |
| 250 | 180 | 1,24 | 223,2 | 262,5 | 1,05 | 275,625 |
| 500 | 240 | 0,97 | 232,8 | 469 | 0,938 | 439,922 |
| 1000 | 380 | 0,38 | 144,4 | 752 | 0,752 | 565,504 |
| 2000 | 428 | 0,214 | 91,592 | 1160 | 0,58 | 672,8 |
| 4000 | 480 | 0,12 | 57,6 | 1480 | 0,37 | 547,6 |
| 6000 | 498 | 0,083 | 41,334 | 1668 | 0,278 | 463,704 |
| 8000 | 504 | 0,063 | 31,752 | 1792 | 0,224 | 401,408 |
| 10000 | 520 | 0,052 | 27,04 | 1900 | 0,19 | 361 |
| >>10000 | 660 | 0 | 0 | 2500 | 0 | 0 |



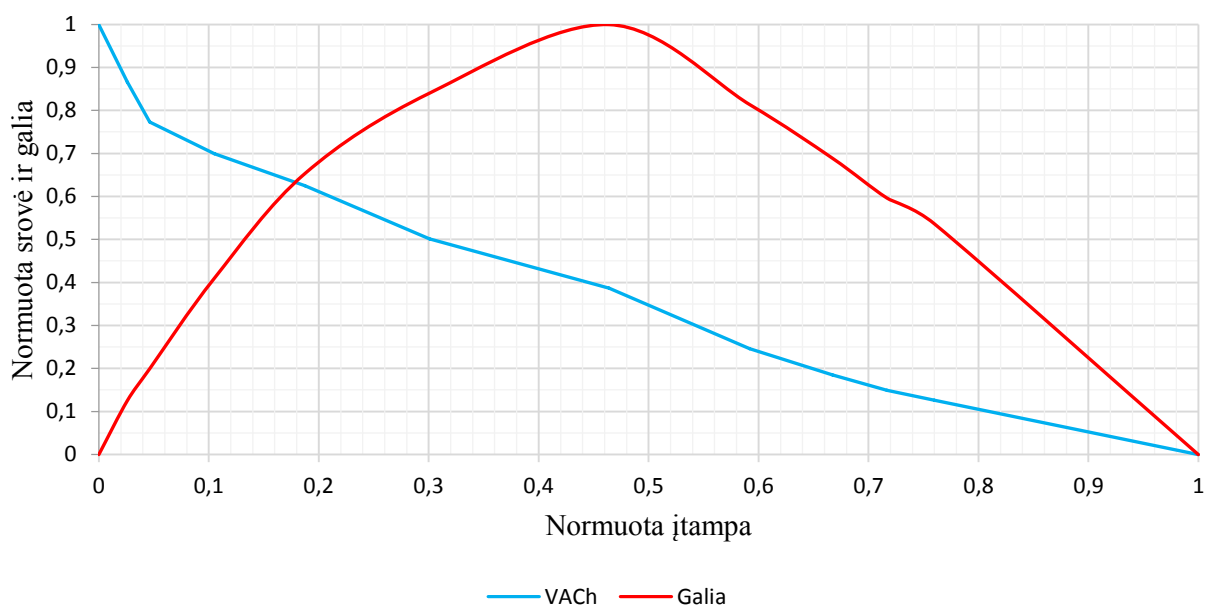
3.8 pav. Diodų tiltelio ir įtampos daugiklio išėjimo galios priklausomybės nuo apkrovos

Iš 3.8 pav. matyti, kad palaipsniui didinant apkrovą, galia didėja iki tam tikro taško, kur pasiekia savo maksimumą. Toliau didinant apkrovą galia krenta. Maksimalia galia tenkanti apkrovai po diodų tiltelio yra $232,2 \mu W$, po įtampos daugiklio $672,8 \mu W$.

3.9 ir 3.10 paveiksluose pateiktos normuotos voltamperinės charakteristikos ir galios kreivės, kur 1 atitinka maksimalią reikšmę iš 3.3 lentelės.



3.9 pav. Normuotos VCh ir galios charakteristikos diodų tiltelio išėjime



3.10 pav. Normuotos VCh ir galios charakteristikos įtampos daugiklio išėjime

Iš gautų grafikų nustatyta, kad pirmuoju atveju maksimali galia apkrovai perduodama esant apie 35% nuo atviros grandinės įtampos. Antruoju, įtampos daugiklio atveju didžiausia galia gaunama ties 50%. Išėjimo charakteristikos atitinka 1.2.2 skyriuje aprašyto pastovaus išėjimo impedanso keitiklio charakteristikas.

Suprojektuota BQ25504 galios valdymo grandinė, turinti MPPT algoritmą, nustatytą ties 50% atviros grandinės įtampos atitinka šaltinio maksimalios galios tašką naudojant įtampos daugiklį. Atsižvelgiant, kad esant 1Hz minimo dažniui ir naudojant įtampos daugiklį, į BQ25504 paduodama įtampa 2.5V, o energijos kaupimo elemento minimali įtampa 2.2V, o maksimali 3.6V, efektyvumas pagal 3.11 pav. gali kisti 80 – 90proc ribose.

BQ25504 efektyvumas išreiškiamas formule[49]:

$$\eta_{BQ25504} = \frac{V_{i\check{s}} \cdot I_{i\check{s}}}{V_{in} \cdot I_{in}} \quad (3.2)$$

čia $V_{i\check{s}}$ - išėjimo įtampa, V; $I_{i\check{s}}$ - išėjimo srovė, A; V_{in} - įėjimo įtampa, V; I_{in} - įėjimo srovė, A.

Išėjimo galia:

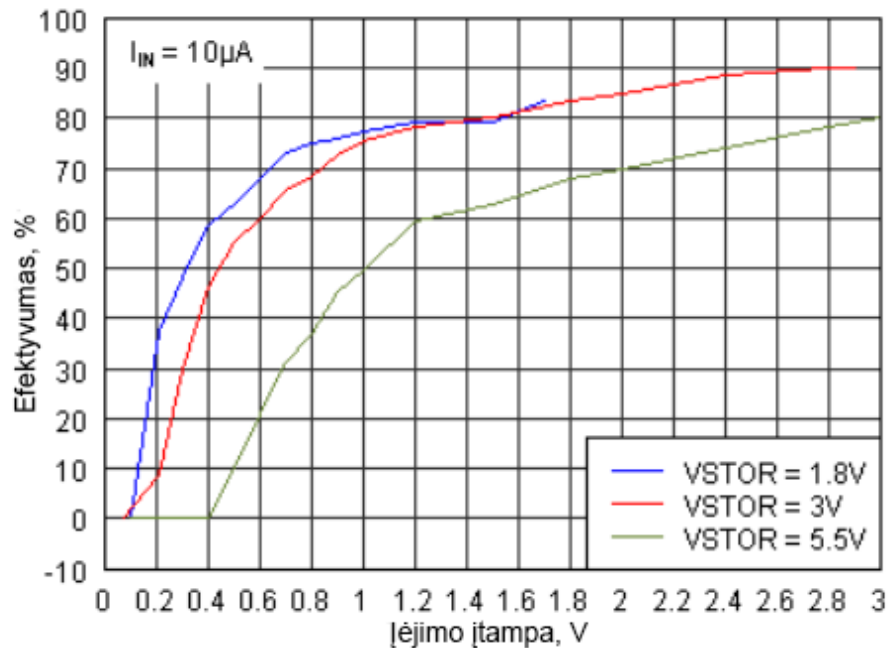
$$P_{i\check{s}} = \eta_{BQ25504} \cdot P_{in} \quad (3.3)$$

čia $\eta_{BQ25504}$ - bq25504 efektyvumas; P_{in} - įėjimo galia, W;

Esant 1Hz minimo dažniui energijos saugojimo elemento krovimo galia, priimama, kad efektyvumas 85 procentai. Tuomet išėjimo galia bus:

$$P_{out} = 0.85 \cdot 672.8 \cdot 10^{-6} = 571,88 \mu W \quad (3.4)$$

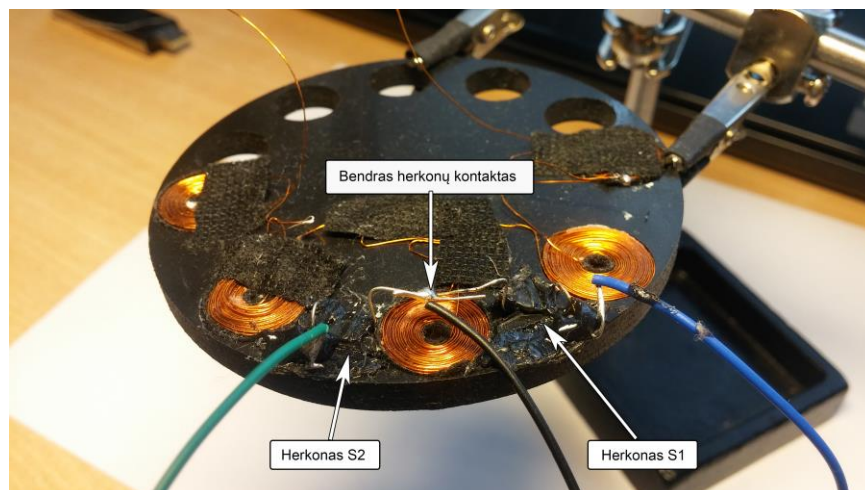
Apskaičiavus gauta, kad energijos kaupimo elementas esant 1Hz minimo dažniui yra kraunamas $571,88\mu\text{W}$ galia.



3.11 pav. BQ25504 efektyvumas [49]

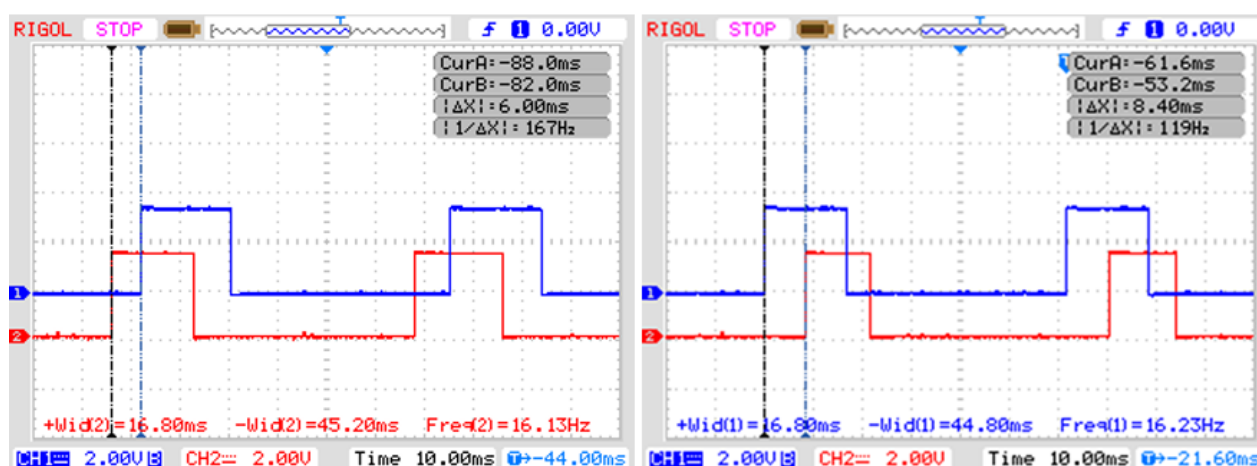
3.3. Sukimosi krypties nustatymo tyrimas

Į statorinę dalį tarp induktyvinių ričių įmontuoti du herkoniniai jutikliai, kurie pozicionuojami eksperimentiniu būdu, siekiant gauti 2.8 pav. pavaizduotą impulsų seką. Kalibravimo metu, bendrasis kontaktas prijungiamas prie 3.6V įtampos. Realioje sistemoje herkonų bendrasis kontaktas jungiamas į GND.



3.12 pav. Statorinė dalis su įmontuotais herkonais

Gauta herkoninių jutiklių impulsų seka esant 1Hz sukimosi dažniui pateikta 3.13 pav.



3.13 pav. a) Sukimasis prieš laikrodžio rodyklę; b) Sukimasis pagal laikrodžio rodyklę

Gauti rezultatai rodo, kad jutiklio kontaktai 16.8ms būna nesusijungę, o ~45ms susijungę. Laiko skirtumas tarp abiejų herkonų junginėjimosi svyruoja apie 6-8.4 ms. Šis laikas yra svarbiausias, į kurį reikia atsižvelgti rašant programinę įrangą. MPS430 sukimosi kryptį detekuoja pagal P1.3 ir P1.4 išvadų logines būsenas, kurios inicializacijos metu nustatomos į aukštą loginį lygį. Sukantis magnetams impulsų sekos persidengia, ir gali sudaryti 5 galimas kombinacijas, sukantis viena kryptimi. Kombinacijos pateikiamos 3.4 lentelėje.

3.4 lentelė. Sukimosi prieš laikrodžio rodyklę kombinacijos

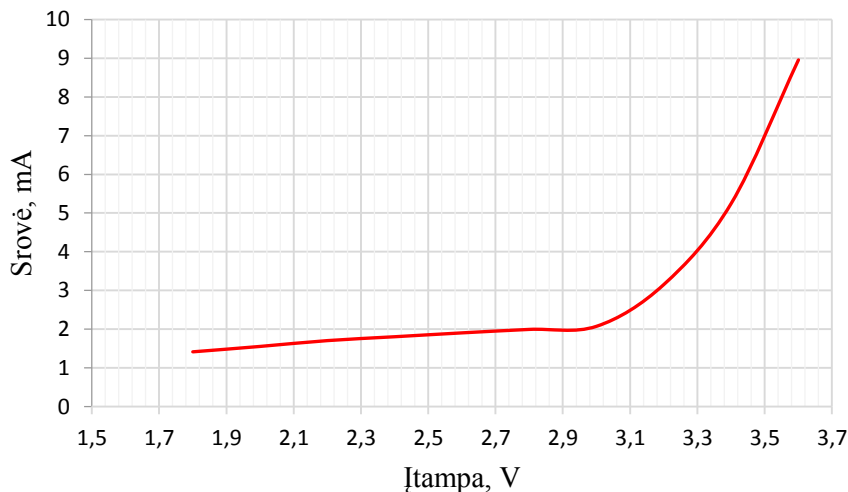
| MSP 430 P1.3 būsena | MSP 430 P1.4 būsena |
|---------------------|---------------------|
| 0 | 0 |
| 0 | 1 |
| 1 | 1 |
| 0 | 1 |
| 0 | 0 |

Sukantis viena kryptimi, mikrovaldiklis gauna įėjimo kombinacijas pagal 3.4 lentelę paeiliui nuo viršaus į apačią, sukantis kita kryptimi – paeiliui nuo apačios į viršų. Programinės įrangos kodas realizuojantis sukimosi krypties nustatymą pateiktas 4 priede.

3.4. Bevielė sąsaja

Atsižvelgiant į MSP430 mažos galios režimus [36], parenkamas LPM4 režimas, kuomet mikrovaldiklis pabunda tik dėl išorinės pertraukties signalo, frikcinės pavaros kontrolės sistemos atveju – mygtuko paspaudimo.

3.14 pav. pateiktas MX-FS-03V RF modulio srovės vartojimas, priklausomai nuo įtampos 1.8 – 3.6V įtampos ribose.

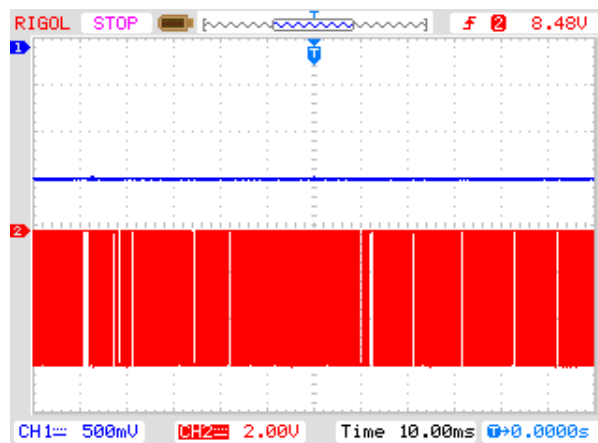


3.14 pav. MX-FS-03V srovės suvartojimo charakteristika

Remiantis išnagrinėta siųstuvo modulio sandara padaryta išvada, kad tranzistoriai Q1 ir Q2 esant mažesnei įtampai būna prasidareę dalinai, todėl srovės suvartojimas siekia mažiau nei 2mA. Įtampai viršijus 3V srovė ima stipriai augti.

Kadangi atstumas nuo siųstuvo iki frikcinės pavaros labai trumpas, duomenų siuntimo eksperimentas atliekamas išeinant už gamintojo nurodytos minimalios 3V modulio maitinimo įtampos.

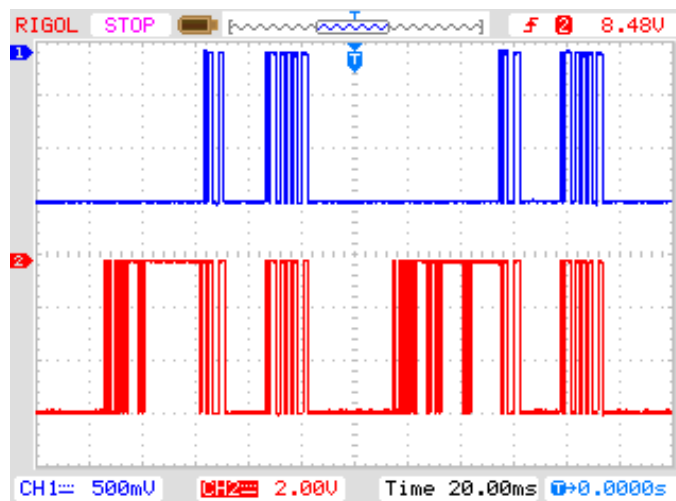
Frikcinės dviračio pavaros RF imtuvo imitavimui naudojamas Atmega32A mikrovaldiklis ir RF 433MHz MX-05V imtuvo modulis, pastatytas 1 metro atstumu nuo siųstuvo. 3.15 paveikslėlyje pateikta RF siųstuvo ir imtuvo modulių išėjimo signalai.



3.15 pav. Mėlyna spalva – RF TX modulio išėjimas, raudona spalva – RF RX modulio išėjimas

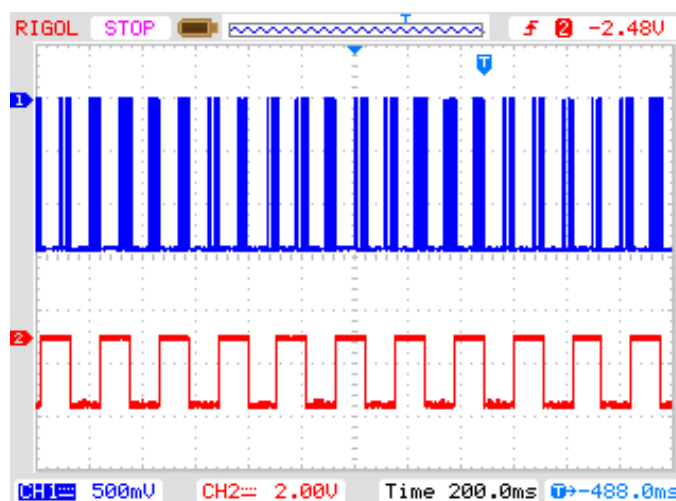
Siųstuvui duomenų nesiunčiant, imtuvo išėjime matomas nuolatinis triukšmas. Dėl šios priežasties negalima koduoti duomenų mažu bitų skaičiumi (ne mažiau 10 bitų), nes yra tikimybė, kad pasitaikys identiškas arba artimas uždokuotam signalui triukšmas, kuris bus interpretuojamas kaip duomenys iš siųstuvo.

Komunikacijai naudojama UART sąsaja sukonfigūruojama vienodai tiek MPS430 siųstuvo, tiek Atmega32 imtuvo dalyje. Bitų perdavimo sparta – 1.2kb/s. Eksperimentinis siunčiamas duomenų paketas – atsitiktinai parinkti trys skaičiai „912”. Pastebėta, kad imtuvas niekada teisingai nepriima duomenų. To priežastis – sugadintas pirmasis duomenų baitas dėl triukšmo. Pirmą baitą panaudojus kaip imtuvo išėjimo nusistovėjimui skirtus duomenis, o du likusius – kaip tikruosius duomenis, problema buvo išspręsta. 3.16 pav. pavaizduoti teisingo duomenų siuntimo rezultatas.



3.16 pav. Mėlyna spalva – siųstuvo išėjimas, raudona spalva – imtuvo išėjimas

3.16 pav. matomas imtuvo išėjimo triukšmuose paskendęs pirmasis duomenų baitas, ir be triukšmų priimtus likusius duomenis. Testavimui, imtuvo dalies mikrovaldiklis užprogramuotas teisingai atpažinus duomenis invertuoti vieną iš išėjimų. Rezultatas pateiktas 3.17 pav.



3.17 pav. Mėlyna spalva – siųstuvo išėjimas, raudona spalva – invertuojama išvado būseną

Iš 3.17 pav. pateiktos oscilogramos pastebėta, kad sulig kiekvienu duomenų paketu išėjimas invertuojamas. 1 metro atstumu duomenys priimami ir išsiunčiami be klaidų net esant 1.8V eksperimento metu naudotai RF siuntimo modulio maitinimo įtampai.

3.5. Galios suvartojimas

RF modulio vartojama srovė priklauso nuo įtampos, todėl buvo priimta, kad vidutinė srovė yra vidurkis minimalios ir maksimalios srovės verčių, paimtų iš 3.14 pav. esančio grafiko.

$$I_{RF_vid} = \frac{I_{max} + I_{min}}{2} = \frac{9 + 1.7}{2} = 5.35mA \quad (3.5)$$

Priimama, kad į frikcinę pavarą užtenka siųsti 4 impulsus per vieną pedalų apsisukimą, t.y kas 90°. Herkoniniai jutikliai vieno apsisukimo metu perduoda valdikliui 16 impulsų, todėl MPS430 atpažinus tinkamą sukimosi kryptį, skaičiuojami 4 impulsai iš herkonų ir siunčiamas vienas RF duomenų paketas į pavarą.

Visą siunčiamą duomenų paketą „912“ sudaro 30 bitų (start bitas, 8 duomenų bitai ir stop bitas vienam simboliui). Suskaičiuota, kad pakete yra 13 žemo loginio lygio ir 17 aukšto loginio lygio bitų. Vieno bito trukmė:

$$t_{bito} = \frac{1}{1200} = 833\mu s \quad (3.6)$$

Vidutinė duomenų paketo srovė [49]:

$$I_{vid_paketo} = \frac{I_{zemas} \cdot t_{bito} \cdot n_{zemas}}{T} + \frac{I_{aukštas} \cdot t_{bito} \cdot n_{aukštas}}{T}, \quad (3.7)$$

Čia I_{zemas} - loginio 0 srovė, A; n_{zemas} - loginio 0 bitų skaičius; $I_{aukštas}$ - loginio 1 srovė, A; $n_{aukštas}$ - loginio 1 bitų skaičius; t_{bito} - bito trukmė, s; T - periodas, s;

$$I_{vid_paketo} = 0 + \frac{5,35 \cdot 10^{-3} \cdot 833 \cdot 10^{-6} \cdot 17}{0,25} \quad (3.8)$$

Iš čia:

$$I_{vid_paketo} = 303\mu A \quad (3.9)$$

Pagal sukonfigūruotus bq25504 įtampos lygius priimama, kad vidutinė įtampa, kuomet prijungta apkrova yra minimalios ir maksimalios darbinės įtampos vidurkis.

$$U_{vid} = \frac{VBAT_UV + VBAT_OV}{2} = \frac{2.2 + 3.6}{2} = 2.9V \quad (3.10)$$

Vienam duomenų paketui sunaudojama galia.

$$P_{RF_data} = I_{vid_paketo} \cdot U_{vid} \quad (3.11)$$

$$P_{RF_data} = 303 \cdot 10^{-6} \cdot 2,9 = 878,7 \mu W \quad (3.12)$$

Žinant, kad išėjimo galia iš bq25504 esant 1Hz minimo dažniui yra 571,88μW, apskaičiuojama energijos kaupimo elemento krovimo srovė. Kadangi superkondensatorius atjungiamas nuo apkrovos esant 2,2 V, todėl jis yra įkraunamas 2,2 – 3,6 V ribose. Naudojama kondensatoriaus energija apskaičiuojama pagal 3.13 formulę. [51].

$$E = 0,5 \cdot C \cdot (V_{maks.}^2 - V_{min.}^2) \quad (3.13)$$

čia E – energija, Ws; C – kondensatoriaus talpa, F; $V_{maks.}$ ir $V_{min.}$ atitinkamai maksimali ir minimali įtampa, V.

Apskaičiuojame energiją, reikalingą 1F talpos kondensatorių įkrauti nuo 2,2 iki 3,6 V.

$$E = 0,5 \cdot 1 \cdot (3,6^2 - 2,2^2) = 4,06 W \cdot s \quad (3.14)$$

Laikas, per kurį kondensatorius bus pilnai įkrautas:

$$t = \frac{E}{P_{iš}} = \frac{4,06}{571,88 \cdot 10^{-6}} = 7100 sek. \quad (3.15)$$

Minant pedalus 1Hz dažniu 1F kondensatorius nuo nustatyto VBAT_UV iki VBAT_OV lygio būtų įkraunamas vidutiniškai per 118 minučių, važiuojant be frikcinės dviračio pavaros. Esant užkrautam kondensatoriui iki maksimalaus lygio ir važiuojant su frikicine dviračio pavara, išsikrovimo laikas yra:

$$t = \frac{E}{|P_{iš} - P_{RF_data} - P_{MCU}|} \quad (3.16)$$

Iš [36] MSP430G2553 galia aktyviu režimu esant 1MHz taktiniam dažniui yra $P_{MCU} = 506 \mu W$, miego režimu $P_{MCU_LPM4} = 0,25 \mu W$

$$t = \frac{4,06}{|571,88 \cdot 10^{-6} - (878,7 \cdot 10^{-6} + 506 \cdot 10^{-6})|} = 4995 sek \quad (3.17)$$

Rezultatai rodo, kad kondensatorius iki minimalios nustatytos įtampos, mikrovaldikliui esant aktyviame režime ir siunčiant duomenis bevieliu ryšiu būtų iškraunamas per 83 minutes.

Apskaičiuojamas kondensatoriaus išsikrovimo laikas mikrovaldikliui esant miego režime.

$$t = \frac{E}{P_{MCU_LPM4}} \quad (3.18)$$

$$t = \frac{4,06}{0,25 \cdot 10^{-6}} = 16,24 \cdot 10^6 \text{ sek} \quad (3.19)$$

3.6. Apibendrinimai

Remiantis eksperimentinių tyrimų rezultatais, nustatyta, kad energijos šaltinio išėjime gaunama 880mV įtampa esant 1Hz minimo dažniui nuo apskaičiuotos projektinėje dalyje skiriasi tik 8 %. Ištirtos išėjimo charakteristikos, naudojant diodų tiltelį ir įtampos daugiklį. Nustatyta, kad maksimali (5,04V) įtampa, gaunama naudojant įtampos daugiklį, neviršija BQ25504 maksimalios (5,5V) įėjimo įtampos. Maksimali galia gaunama naudojant įtampos daugiklį (672,88μW), o maksimalios galios taškas atitinka 46% nuo atviros grandinės įtampos. Pasiūlytas duomenų iš triukšmų išskyrimo būdas, kurį naudojant eksperimento metu, duomenys bevieliu ryšiu buvo perduodami be klaidų. Remiantis skaičiavimų ir tyrimų rezultatais apskaičiuota, kad 1F kondensatoriui esant įkrautam iki 3,6V suprojektuota frikcinės dviračio pavaros kontrolės sistema miego režimu gali veikti iki 141 paros. Įkrovimo laikas naudojant 1F superkondensatorių iki maksimalaus 3,6 V įtampos lygio ir minant pedalus 1Hz dažniu, būtų apie 118 minučių, esant neaktyviai frikcinės dviračio pavaros kontrolės sistemai. Sistemai esant aktyviai, 1F kondensatorius iki minimalaus 2,2V sistemos įtampos lygio iškraunamas per 83 minutes.

IŠVADOS

1. Atlikus panašių sistemų analizę nustatyta, kad yra poreikis patobulinti frikcinės dviračio pavaros kontrolę. Šiam tikslui pasiūlyta bevielė sistema, kuri kontroliuoja frikcinę pavarą atsižvelgiant į pedalų minimą. Pedalų minimas šiai sistemai yra ne tik kontroliuojamas procesas, bet ir energijos gavimo būdas.
2. Remiantis „Comsol Multiphysics 5“ modeliavimo ir skaičiavimų rezultatais, suprojektuotas ir ištirtas frikcinės dviračio pavaros kontrolės sistemos energijos šaltinis, panaudojant 16 NdFeB N50 magnetų ir 5 induktyvines rites. Tyrimo rezultatai parodė, kad maksimali tokio energijos šaltinio išėjimo galia, esant 1Hz minimo dažniui yra iki 672,8 μ W.
3. Remiantis skaičiavimais nustatyta, kad maitinimo dalies valdymo grandinės, realizuotos su BQ25504 mikrograndynu suvartojama galia siekia 15 proc. nuo įeinančios galios.
4. Eksperimentiniais tyrimais ištirtos pedalų minimo krypties nustatymo teisingumas ir bevielės sąsajos veikimas. Pasiūlytas siunčiamų duomenų išskyrimo iš triukšmų būdas, kuris leido be klaidų persiųsti signalą.
5. Remiantis eksperimentiniais tyrimais ir skaičiavimais, gauti frikcinės dviračio pavaros kontrolės sistemos įkrovimo ir iškrovimo laikai. Išsiaiškinta, kad įkrovimo laikas naudojant 1F superkondensatorių iki maksimalaus 3,6 V įtampos lygio ir minant pedalus 1Hz dažniu, būtų apie 118 minučių, esant neaktyviai frikcinės dviračio pavaros kontrolės sistemai. Sistemai esant aktyviai, 1F kondensatorius iki minimalaus 2,2V sistemos įtampos lygio iškraunamas per 83 minutes. Apskaičiuota sistemos budėjimo trukmė su 1F pilnai įkrautu kondensatoriumi siekia iki 141 paros.

LITERATŪROS ŠALTINIAI

1. Rubbee internetinis puslapis. [interaktyvus], [žiūrėta 2015-05-01]. Prieiga per internetą: <http://www.rubbee.co.uk/>.
2. Sub-Microamp, Intelligent Hall-Effect Sensing Delivers 20-Year Battery Life (Texas Instruments), 2014.
3. Alarmed Vehicle Hoods Use Reed Sensors. [interaktyvus], [žiūrėta 2014-08-10]. Prieiga per internetą: http://www.digikey.com/Web%20Export/Supplier%20Content/Meder_374/PDF/meder--auto-alarmed-vehicle-hoods.pdf?redirected=1
4. Meder electronic. The Basic Reed Switch. [interaktyvus], [žiūrėta 2014-09-02]. Prieiga per internetą: <http://www.biltek.tubitak.gov.tr/gelisim/elektronik/dosyalar/31/reed.pdf>
5. Artem D., Steve H., Stuart T., Joshua S. (2013). Power Consumption Analysis of Bluetooth Low Energy, ZigBee and ANT Sensor Nodes in a Cyclic Sleep Scenario. [interaktyvus], [žiūrėta 2014-08-10]. Prieiga per internetą: <http://research.microsoft.com/pubs/192688/IWS%202013%20wireless%20power%20consumption.pdf>
6. Faruk Y. (2009) Potential Ambient Energy-Harvesting Sources and Techniques. [interaktyvus], [žiūrėta 2014-09-4]. Prieiga per internetą: <http://scholar.lib.vt.edu/ejournals/JOTS/v35/v35n1/pdf/yildiz.pdf>
7. Singha S., Rangarib K., Sanagapallia S., Jayaramana V., Mahendraa S., Singha P. Nano-structured CdTe, CdS and TiO₂ for thin film solar cell applications // Solar Energy Materials and Solar Cells. Cancun, 2004. – Nr. 82(1-2). – P. 315-330.
8. Zhao J., Green M. Optimized Antireflection Coatings for High-Efficiency Silicon Solar Cells // Electron Devices, IEEE Transactions on. – Australia, 2002. – Nr. 38(8). – P. 1925-1934.
9. Barnett A. , Honsberg Ch. , Kirkpatrick D., Kurtz S., Moore D. 50% efficient solar cell architectures and designs // Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on . – Waikoloa, 2006. P. 2560-2564.
10. Measuring PV Efficiency. [interaktyvus], [žiūrėta 2014-09-4]. Prieiga per internetą: <http://www.pvpower.com/assets/Measuring-PV-Efficiency-Solar-Panels.pdf>
11. Luis R., Filho G., Dos D., Neto V., Cremasco C., Seraohim O., Caneppele F. Mathematical analysis of maximum power generated by photovoltaic systems and fitting curves for standard

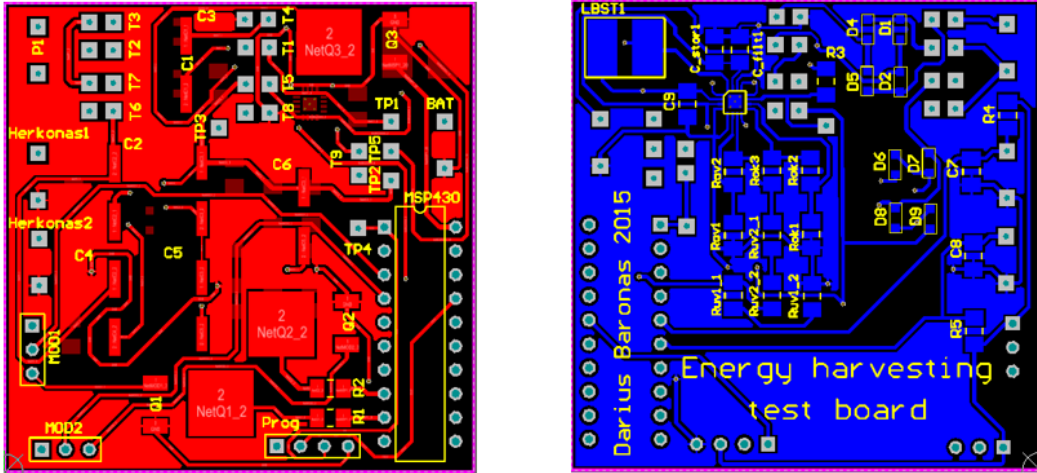
- test conditions. [interaktyvus], [žiūrėta 2014-09-4]. Prieiga per internetą: <http://www.scielo.br/pdf/eagri/v32n4/04.pdf>
12. Green M., Emery K., Hishikawa Y., Warta W., Dunlop E. Solar cell efficiency tables (version 39) // Progress in photovoltaics: reasearch and applications. – John Wiley & Sons, 2012. – Nr. 20. P. 12-20.
 13. Akpinar K., Akpinar S. An assessment on seasonal analysis of wind energy characteristics and wind turbine characteristics // Energy Conversion and Management. – Elazig: Elsevier, 2005. – Nr. 46. – P. 1848-1867.
 14. Fei F., Li W. A Fluttering-to-Electrical Energy Transduction System for Consumer Electronics Applications“. [interaktyvus], [žiūrėta 2014-09-4]. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5420607>
 15. Alim Dewan, Suat U. Ay, M. Nazmul Karim, Haluk Beyenal. Alternative power sources for remote sensors: A review //Journal of Power Sources. – Elsevier, 2014. – Nr. 245. – P. 129-143.
 16. Vatansever D., Siores E., Shah T. Alternative Resources for Renewable Energy: Piezoelectric and Photovoltaic Smart Structures. [interaktyvus], [žiūrėta 2014-09-4]. Prieiga per internetą: <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/39166.pdf>
 17. CBC915 EnerChip™ EP Energy Processor (Cymbet Corporation), 2014.
 18. Bouchouicha D., Dupont F., Latrach M., Ventura L. Ambient RF Energy Harvesting // International Conference on Renewable Energies and Power Quality. – Granada, 2010. – P. 1-5.
 19. Friist H. A Note on a Simple Transmission Formula // Proceedings of the IRE. – Holmdel, 2006. – Nr. 34(5). – P. 254-256.
 20. Triet L., Karti M., Terri F. Efficient Far-Field Radio Frequency Energy Harvesting for Passively Powered Sensor Networks // IEEE Journal of solid-state circuits. – 2008. – Nr. 43(5). – P. 1287-1302.
 21. Pinuela M., Yates D., Mitcheson P., Lucyszyn S. London RF Survey for Radiative Ambient RF Energy Harvesters and Efficient DC-load Inductive Power Transfer // 7th European Conference on Antennas and Propagation. London, 2013. – P. 2839-2843.
 22. Gupta V., Kandhalu A., Rajkumar R. Energy Harvesting from Electromagnetic Energy Radiating from AC Power Lines. [interaktyvus], [žiūrėta 2014-09-4]. Prieiga per internetą: <http://users.ece.cmu.edu/~vikramg/docs/hotemnets11.pdf>
 23. Yu Ch., Chau K. Thermoelectric automotive waste heat energy recovery using maximum power point tracking // Energy Conversion and Management. - Hong Kong, 2009. – Nr. 50. – P. 1506-1512.

24. Hendricks T. Engineering Scoping Study of Thermoelectric Generator System for Industrial Waste Heat Recovery (U.S. Department of Energy Industrial Technologies Program), 2006.
25. Abramson S., Kim W., Huxtable S., Yan H., Wu Y., Majumdar A., Tien Ch., Yang P. Fabrication and Characterization of a Nanowire/Polymer-Based Nanocomposite for a Prototype Thermoelectric Device // *Journal of Microelectromechanical systems*. – 2004. Nr. 13(3). – P. 505-513.
26. Lang S. Pyroelectricity: From Ancient Curiosity to Modern Imaging Tool. [interaktyvus], [žiūrėta 2014-09-4]. Prieiga per internetą: <http://www.slac.stanford.edu/grp/arb/tn/arbvol5/AARD459.pdf>
27. Yang Y., Wang S., Zhang Y., Wang Z. Pyroelectric Nanogenerators for Driving Wireless Sensors. [interaktyvus], [žiūrėta 2014-09-4]. Prieiga per internetą: <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/nl303755m>
28. Yang E., Kim S., Yeom J., Koo Ch., Hwang Ch., Yoon E., Kim D., Ha J. Piezoelectric and pyroelectric properties of Pb(Zr,Ti)O₃ films for micro-sensors and actuators. [interaktyvus], [žiūrėta 2014-09-4]. Prieiga per internetą: <http://dtfl.snu.ac.kr/cgi-bin/spboard/board.cgi?id=paper&action=download&gul=338>
29. Maurath D., Manoli Y. CMOS Circuits for Electromagnetic Vibration Transducers. [interaktyvus], [žiūrėta 2014-09-4]. Prieiga per internetą: http://www.springer.com/cda/content/document/cda_downloaddocument/9789401792714-c2.pdf?SGWID=0-0-45-1477824-p176835227
30. B. Axelrod Y. Berkovich A. Shenkman G. Golan. Diode – capacitor voltage multipliers combined with boost-converters: topologies and characteristics // *Power Electronics, IET*. – 2012. – Nr. 5(6). – P. 175-4535.
31. Merritt J., Asare S. Voltage Multipliers and the Cockcroft-Walton generator. [interaktyvus], [žiūrėta 2014-09-4]. Prieiga per internetą: http://s3.amazonaws.com/zanran_storage/hep.uchicago.edu/ContentPages/16126074.pdf
32. Cataldo G., Palumbo G. Design of an Nth Order Dickson Voltage Multiplier // *IEEE Transactions on Circuits and Systems I Fundamental Theory and Applications*. - Catania, 2014. – Nr. 43(5). P. 414-418.
33. Doutreligne J. Power Efficiency Optimization of Fully Integrated Dickson Charge Pumps // *Proceedings of the 9th WSEAS International Conference on Microelectronics, Nenoelectronics, Optoelectronics*. – Belgium, 2010. - P. 1790-5117.
34. The Discontinuous Conduction Mode. *Fundamentals of Power Electronics*. [interaktyvus], [žiūrėta 2014-09-4]. Prieiga per internetą: <http://ecee.colorado.edu/copec/book/slides/Ch5slide.pdf>

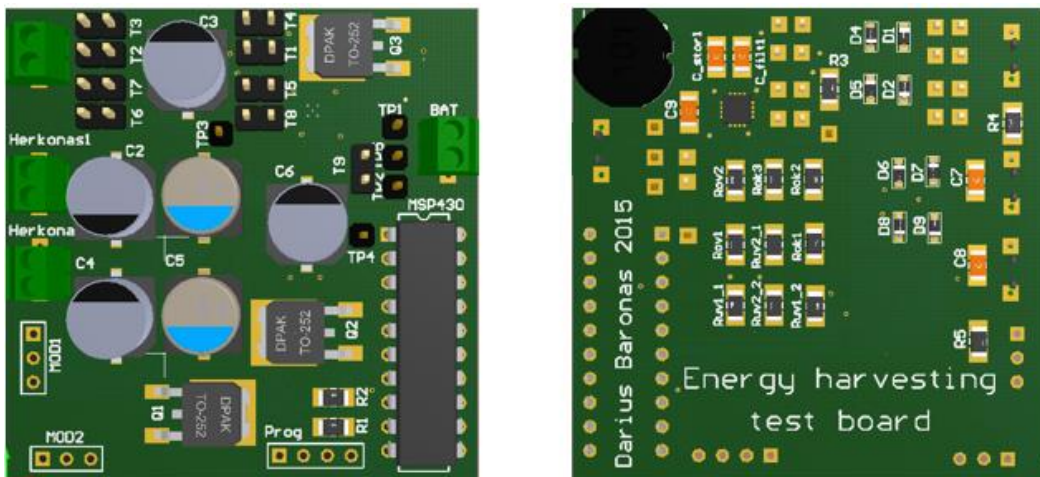
35. STM32L151x6/8/B Datasheet (STMicroelectronics), 2015.
36. MSP430G2x53. Mixed signal controller (Texas Instruments), 2013.
37. ATmega48P/88P/168P (Atmel), 2011.
38. Neodymium-Iron-Boron Magnets (NEOREC series), 2011.
39. Fizika biomedicinos ir fizinių mokslų studentams. [interaktyvus], [žiūrėta 2015-05-10].
Prieiga per internetą: http://www.fbml.ff.vu.lt/sites/default/files/I_knyga_-_Priedas.pdf
40. Example—A Permanent Magnet (Comsol Multiphysics).
41. Measuring Efficiency of the bq25504 Energy Harvesting Battery Charger (Texas Instruments), 2013.
42. BQ25504 Ultra Low-Power Boost Converter With Battery Management for Energy Harvester Applications (Texas Instruments), 2014.
43. IRLR024N (International IOR Rectifier), 2010.
44. PMEG1020EA (NXP Semiconductors), 2008.
45. TI Low Power RF (Texas Instruments). [interaktyvus], [žiūrėta 2015-05-10]. Prieiga per internetą: <http://www.ti.com/lit/sg/slya020a/slya020a.pdf>
46. Sudevalayam S. Kulkarni P. Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications // Communications Surveys & Tutorials, IEEE. – Mumbai, 2011. Nr. 13(3). P. 443-461.
47. Hernitscheck Ch. Designing for Ultra-Low Power with MSP430 // MSP430 Advanced Technical Conference. – 2006.
48. Electromagnetic induction. [interaktyvus], [žiūrėta 2015-05-10]. Prieiga per internetą: <http://www.owl.net.rice.edu/~phys112/Lab/induction.pdf>
49. Measuring Efficiency of the bq25504 Energy Harvesting Battery Charger (Texas Instruments), 2013.
50. Accurate power consumption estimation for low power MCUs (St.com), 2011.
51. Xiaolei H., Tseng K., Srinivasan, M. Optimizaation of battery energy storage system with super-capacitor for renewable energy applications // Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE). – Jeju, 2011. – P. 1552 – 1557.
52. Sudevalayam S., Kulkarni P. Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications // IEEE Cominications surveys and tutorials. 2011. – Nr. 13(3). – P. 443-461.

PRIEDAI

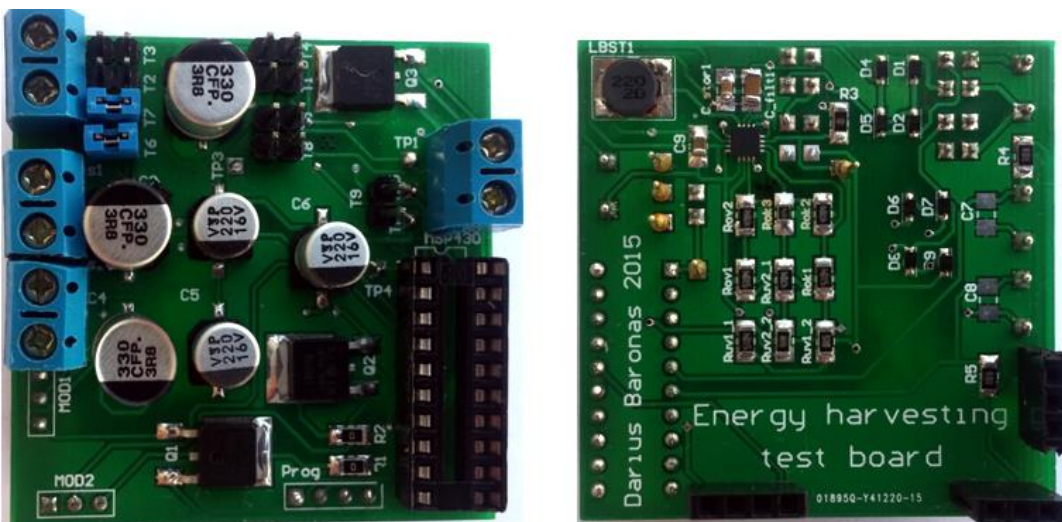
Priedas 1. Sutrasuota eksperimentinė PCB plokštė



Priedas 2. PCB plokštės 3D vizualizacija



Priedas 3. Sulituota eksperimentinė PCB plokštė



Priedas 4. Programos kodas

```
#include <stdio.h>
#include "serial.h"
#define TXD          0x04          //UART TX isvadas
#define MYGTUKAS     BIT0          //Pazadinimo is miego rezimo mygtukas
#define AUKSTAS (P1IN & 0x18)==0x18 //Herkoniniu jutikliu lygiai
#define ZEMAS (P1IN & 0x18)==0x00 //herkoniniu jutikliu lygiai
#define kryptis1 (P1IN & 0x18)==0x08 //Sukimosi kryptis 1
#define kryptis2 (P1IN & 0x18)==0x10 //Sukimosi kryptis 2

//Kintamieji-----

volatile unsigned int n=0, laikas=0;

//-----

void timer_init()
{
    BCSCCTL1 = CALBC1_1MHZ;          //SMCLK=MCLK
    DCOCTL = CALDCO_1MHZ;
    TA0CTL = TASSEL_2+ID_3 + MC_0;   // TASSEL_2 - 1Mhz, ID_3 - dalyba is 8, MC_0
- taimeris sustabdytas
    TA0CCTL0 = CCIE;                // Ijungiamo laikmacio pertrauktis
}

void taimeris (volatile unsigned int TIME)
{
    TA0CCR0 = TIME*125;              // milisekudes
    TA0CTL = TASSEL_2+ID_3 + MC_1;   // Paleidziam laikmati
}

//-----

void main( void )
{
    WDTCTL = WDTPW + WDT HOLD; //Isjungiamas watchdog laikmatis

    uart_init();                    //UART konfiguracija
    timer_init();                    //laikmacio konfiguracija

    //Mygtuko konfiguracija-----

    P1IE|=MYGTUKAS;                 //Pertraukties leidimas
    P1IES |=MYGTUKAS;               //nuo krentancio fronto
    P1IFG &= ~MYGTUKAS;            //Isvalomas pertraukties bitas

//-----Herkoniniu jutikliu iejimai-----

    P1DIR &=~0x18;                  //Herkoniniu jutikliu iejimo isvadai
    P1REN |= 0x18;                  //Vidiniu pullup varzu ijungimas
    P1OUT |= 0x18;                  //Aukstas loginis lygis
//-----

    __enable_interrupt();
}
```



```

while(1)
{

//Sukimosi krypties nustatymas-----

    if (ZEMAS) {

        taimeris(100);                //paleidziamas taimeris kas 1s

        if (kryptis1) {                //tikrinam ar BIT3=1 ir BIT4=0
            __delay_cycles(500);
            laikas=0;

        }

        if (kryptis2) {                //tikrinam ar BIT3=0 ir BIT4=1
            __delay_cycles(500);
            n++;
            laikas=0;

        }

    }

    if (AUKSTAS) {

        taimeris(100);                //paleidziamas laikmatis kas 1s

        if (kryptis1) {                //tikrinam ar BIT3=1 ir BIT4=0
            __delay_cycles(500);
            laikas=0;
            n++;
        }

        if (kryptis2) {                //tikrinam ar BIT3=0 ir BIT4=1
            __delay_cycles(500);
            laikas=0;

        }

    }

    if (n==4) {

        n=0;

        send_int(9);                    //duomenu nusistovejimui
        __delay_cycles(23000);

        send_int(1);
        send_int(2);

    }

} //while pabaiga
} //main pabaiga

```

```

//-----P1 Mygtuko pertrauktis -----
#pragma vector=PORT1_VECTOR
__interrupt void Port_1(void)
{
    P1IFG &= ~MYGTUKAS;    // isvalomas pertraukties bitas
    LPM4_EXIT;              //pabudimas is miegp rezimo
}

// -----Laikmacio pertrauktis-----
#pragma vector=TIMER0_A0_VECTOR
__interrupt void Timer0_A0_ISR (void) {
    laikas++;

    if (laikas==1200)      //10 atitinka 1s, tai 2 min bus 1200
    {
        laikas=0;
        LPM4;              //perejimas i miego rezima
    }

}
}

```