

Vytenis AKSTINAS, Darius MALIŠAUSKAS

**EFEKTYVAUS APLINKOS ENERGIJOS PANAUDOJIMO MAŽOS GALIOS
SISTEMOSE TYRIMAS**

**INVESTIGATION OF EFFICIENT AMBIENT ENERGY USE FOR LOW POWER
SYSTEMS**

Baigiamasis magistro darbas

Elektronikos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX050

Kompiuterizuotų elektroninių sistemų specializacija

Elektronikos inžinerijos studijų kryptis

Efektyvaus aplinkos energijos panaudojimo mažos galios sistemose tyrimas. Magistro baigiamasis darbas elektronikos inžinerijos laipsniui. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius, 2021, 94 p., 65 iliustr., 8 lent., 56 bibl., 1 priedas.

Sparčiai plintant IoT technologijoms, didėja ir baterijas naudojančių nešiojamų prietaisų rinka. Šio darbo tikslas yra ištirti alternatyvius kasdienėje aplinkoje sutinkamus energijos šaltinius, kurie galėtų, esant tam tikroms sąlygoms, pakeisti baterijas ilgaamžiais, aplinkai saugiais ir tvariais sprendimais. Tokio tipo tyrimai nėra nauji mokslinėje bendruomenėje, tačiau šis išsiskiria savo lankstumu, vertinant jo pritaikymo galimybes. Atlikdami šį tyrimą išanalizavome dažniausiai literatūroje randamus aplinkos energijos kaupimo būdus ir nusprendėme detaliau ištirti kinetinės ir radijo bangų energijos keitimo elektrine metodus dėl jų struktūrinių panašumų: abi sistemos reikalauja su aplinkos dažniais suderinto virpesių šaltinio, turi šiems dažniams pritaikytą virpesių lyginimo grandinę ir dėl aplinkos sąlygų nepastovumo reikalauja efektyvaus energijos kaupimo ir perdavimo metodo. Pasinaudoję šiais panašumais suprojektavome sistemą, kuri gali būti naudojama tiek kinetinei, tiek radijo bangų energijai kaupti. Taip pat atlikome eksperimentinius tyrimus siekdami išsiaiškinti abiejų technologijų sistemos energijos perdavimo efektyvumą ir sukaupiamą galią. Rezultatai parodė, kad sistemos efektyvumas labai priklauso nuo aplinkoje esančių virpesių dažnių ir galios, tačiau esant optimalioms sąlygoms, sistema gali sukaupti pakankamai energijos, kad galėtų palaikyti pastovų WSN veikimą.

Analysis of Efficient Ambient Energy Harvesting for Low Power Systems. Masters graduation thesis for electronics engineering degree. Vilnius Gediminas technical university. Vilnius, 2021, 94 p., 65 pictures, 8 tables, 56 lit., 1 ex.

As the IoT technology evolves, the market for battery powered devices also increases. The goal of this paper is to research alternative energy sources, that could potentially change batteries as the new long term, environmentally safe and sustainable power sources. This type of research is not new in the academic field but this work has a wider scope of use cases. In this paper we evaluated various energy harvesting methods and decided to focus on kinetic and radio frequency energy harvesting because of their similarities: both methods need generators tuned to their resonant frequencies, need a voltage rectifier and require efficient energy storage due to inconsistent environmental conditions. Using these similarities we developed a system that can be used for both types of energy harvesting and storage. On top of that, we experimentally investigated both technologies evaluate the efficiency and capabilities of our system. The results show that the system is very sensitive to the surrounding frequencies, but, given good conditions, it can generate enough energy to continuously power a wireless sensor.

TURINYS

Ivadas	7
Darbo aktualumas ir tikslas	7
Darbo uždaviniai	7
Naudoti tyrimo ir analizės metodai	8
Darbo naujumas ir praktinė nauda.....	8
Darbo struktūra.....	8
1. Aplinkos energijos naudojimo technologijos	10
1.1. Mechaninių virpesių energijos naudojimas	10
1.2. Temperatūros svyravimų energijos naudojimas.....	13
1.3. Šviesos energijos naudojimas.....	17
1.4. Elektromagnetinių bangų energijos naudojimas	18
1.4.1. Maitinimo grandinių ir integrinių grandynų analizė	20
1.4.2. Antenų tipai ir jų efektyvumas	23
2. Kinetinės ir radijo bangų energijos surinkimo metodų analizė	25
2.1. Energijos surinkimo būdų iš mechaninių svyravimų palyginimas.....	25
2.2. Pjezoelektrinių keitiklių medžiagos ir konstrukcijos parinkimas.....	26
2.3. Pjezoelektrinių keitiklių efektyvios dažnių juostos derinimas	30
2.3.1. Keitiklių rezonansinio dažnio nustatymas ir derinimas	30
2.3.2. Dažnių juostos platinimas	31
2.4. Radijo bangų galios lygių analizė.....	34
2.5. Radijo bangų detektoriaus grandinė	39
2.6. Energijos kaupimo sistema.....	45
2.7. Aparatinės įrangos projektavimas	48
2.7.1. Pjezoelektrinio keitiklio kūrimas.....	48
2.7.2. Generatoriaus laikiklio projektavimas.....	49

2.7.3. Sistemos prievadų parinkimas	51
2.7.4. RF linijų projektavimas.....	52
2.7.5. PPM schemas projektavimas	53
3. Eksperimentiniai tyrimai ir duomenų atranka	55
3.1. Mechaninės energijos konversijos efektyvumo ir patvarumo tyrimas.....	55
3.1.1. Keitiklių parametrų nustatymas	56
3.2. Įtampos lygintuvo kinetinės energijos keitimui tyrimas	58
3.3. Radijo spektro tyrimas	62
3.4. RF linijos impedanso derinimas.....	67
3.5. Radijo bangų lygintuvo S parametrų tyrimas	69
3.6. Sistemos su radijo bangų lygintuvu efektyvumo tyrimas	72
4. Energijos surinkimo būdų tyrimo rezultatai	76
4.1. Kinetinės energijos gavybos tyrimo rezultatai.....	76
4.2. Radijo bangų energijos gavybos tyrimo rezultatai.....	77
Apibendrinimas. Išvados	79
Literatūra	81
PRIEDAI	86
A priedas. 24-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos medžiaga bei geriausio pranešimo apdovanojimai.....	86

SANTRUMPOS

AC (angl. <i>Alternating Current</i>)	kintamoji srovė
BLE (angl. <i>Bluetooth Low Energy</i>) „Bluetooth“	mažo energijos suvartojimo
DC (angl. <i>Direct Current</i>)	nuolatinė srovė
EGR (angl. <i>Exhaust Gas Recirculation</i>)	išmetamųjų dujų recirkuliacija
EMG (angl. <i>Electromagnetic Generator</i>)	elektromagnetinis generatorius
FM (angl. <i>Frequency Modulation</i>)	dažninė moduliacija
IC (angl. <i>Integrated Circuit</i>)	integrinis grandynas
IoT (angl. <i>Internet of Things</i>)	daiktų internetas
LDO (angl. <i>Low Drop-Out</i>)	mažo kritimo keitiklis
LTE (angl. <i>Long-Term Evolution</i>)	ilgalaikės raidos technologija
MEC (angl. <i>Micro-energy Cell</i>)	mikroenergijos kaupimo celė
PCB (angl. <i>Printed Circuit Board</i>)	spausdintinė plokštė
PEG (angl. <i>Piezoelectric Generator</i>)	pjezoelektrinis generatorius
PPM (angl. <i>Power Path Management</i>)	galios valdymo sistema
PVDF (angl. <i>Polyvinylidene Fluoride</i>)	polivinilidenfluoridas
PZT (angl. <i>Lead Zirconate Titanate</i>)	švino cirkonato titanatas
RF (angl. <i>Radio Frequency</i>)	radijo dažniai
SMT (angl. <i>Surface-Mount Technology</i>)	paviršinio montavimo technologija
SOC (angl. <i>System on Chip</i>)	sistema luste
SOI (angl. <i>Silicon on Insulator</i>)	silicis ant dielektrinės medžiagos
TEG (angl. <i>Thermoelectric Generator</i>)	termoelektrinis generatorius
UWB (angl. <i>Ultra Wide Band</i>)	labai plati dažnių juosta
WPT (angl. <i>Wireless Power Transfer</i>)	belaidis galios perdavimas
WSN (angl. <i>Wireless Sensor Network</i>)	belaidžių jutiklių tinklas

ĮVADAS

Darbo aktualumas ir tikslas

Didelė šiuolaikinių technologijų raidos dalis susijusi su belaidžių jutiklių tinklų tobulinimu ir jų diegimu įvairiose aplinkose. WSN sąvoka apibrėžiama kaip įvairių prietaisų tinklas, renkantis informaciją apie jį supančią aplinką ir galintis su ja sąveikauti [1]. Pastaraisiais metais prognozuojama, kad 2020 m. pasaulinis WSN tinklas jungs 20–30 milijardų prietaisų [2]. Viena iš problemų, kylančių dėl spartaus IoT prietaisų skaičiaus augimo, yra reikalingo energijos kiekio išgavimas ir paskirstymas. Įprastai dauguma belaidžių jutiklių maitinami baterijomis, kurios gaminamos iš aplinkai žalingų medžiagų. Šios baterijos greitai išsikrauna ir kartais gaminio vertė yra per maža, kad apsimokėtų jas keisti. Dėl to, dažnai išmetamos ne tik baterijos, bet ir visa jas naudojanti elektronika.

Yra du šios problemos sprendimo būdai – energijos suvartojimo mažinimas ir švarios, atsinaujinančios energijos vartojimas. Pirmasis būdas technologijų kompanijų nuolat tobulinamas, nes mažai galios vartojantys elektronikos komponentai yra lengvai parduodami. Antrasis sprendimo metodas – aplinkos energijos naudojimas belaidžių prietaisų tinklams maitinti – praktiškai beveik netaikomas, nes kainos ir patogumo atžvilgiais baterijos yra geresnis pasirinkimas. Įvertinus paminėtas energijos išgavimo, aplinkosaugos problemas ir tai, kad per pastaruosius 30 metų baterijų talpos augimas, lyginant su kitomis technologijomis (pvz.: procesoriaus greitis, atminties talpa) buvo labai mažas [3], nuspręsta, kad šis darbas bus skirtas nagrinėti įvairius galios šaltinius, kurie leistų panaudoti kasdienėje aplinkoje sutinkamą, skirtingais metodais išgaunamą, energiją.

Darbo uždaviniai

Šio darbo uždavinius galima išskaidyti į tris pagrindines dalis. Pirmiausia bus aiškinamasi apie aplinkoje esančias energijos formas, jų savybes ir technologijas, leidžiančias keisti įvairią energiją į elektros. Šiame tyrime bus akcentuojamas energijos gavybos efektyvumas, todėl pagal tai bus lyginami visi energijos keitimo metodai.

Antrasis uždavinys bus išsiaiškinti energijos keitimo metodų ypatybes ir nuspręsti, kuriuos iš jų naudosime. Atlikus šiuos žingsnius, paaiškės, kokios įrangos reikės tyrimui, todėl šiame etape taip pat bus kuriami energijos keitikliai ir kaupimo sistema.

Trečioje darbo dalyje bus praktiškai panaudotos sukauptos žinios ir bandymams paruošti prietaisai. Siekiant išanalizuoti nagrinėtų metodų efektyvumą, bus atlikti eksperimentai ir pateiktos galutinės darbo išvados.

Naudoti tyrimo ir analizės metodai

Tyrimai ir analizė buvo tikslingai atliekami atsižvelgiant į pagrindinį darbo tikslą – surasti efektyvų būdą praktiškai panaudoti aplinkos energiją mažo suvartojimo sistemoms maitinti. Šis tikslas nurodo, kad darbe bus tiriamas skirtingų energijos gavybos metodų efektyvumas ir galimybės juos pritaikyti. Didelė dalis tyrimų atlikta matuojant sukurtos sistemos dalių naudingumo koeficientą ir jo kitimą. Efektyvumo suvokimas ir matavimo metodai priklauso nuo matuojamos sistemos dalies, tačiau esmė visada tokia pati – išgauti didžiausią įmanomą galią išėjime.

Darbo naujumas ir praktinė nauda

Atliekant aplinkos energijos panaudojimo analizę pastebėta, kad didžioji dalis su tuo susijusios literatūros yra skirta vienos energijos formos keitimui arba esamų straipsnių ar įmonių apžvalgai. Tai pastebima ir įmonėse, siūlančiose komercinius energijos keitiklius – visos jos susikongregavusios į vieną kryptį. Dėl to buvo nuspręsta analizuoti įvairius keitimo būdus ir sudaryti galimybes vienu metu naudoti kelis iš jų.

Taip pat buvo nustatyta, kad nedidelė jau atliktų tyrimų dalis akcentavo efektyvumą plačiąja prasme. Technologijos ar energijos gavybos metodo labai efektyviu vadinti negalima, jei jis veikia tik laboratorinėmis sąlygomis. Be to, energijos keitimo būdų, kurie nebūtų komerciškai naudingi, kol neįvyktų technologinis proveržis jų gamybos srityje, taip pat ne visada galima laikyti efektyviais.

Darbo struktūra

Šiame tyrime pasirinkta tokia darbo struktūra, kuri leistų panaudoti kiekviename etape įgyjamą žinias ir jas toliau taikyti. Dėl šios priežasties darbas pradedamas nuo aplinkos energijos panaudojimo technologijų analitinės apžvalgos, kuri suteikia žinių apie progresą šioje srityje ir leidžia geriau įvertinti bei išsirinkti norimus detaliau analizuoti aplinkos energijos tipus.

Išsirinkus siauresnes kryptis analizei, nagrinėjami tikslūs metodai pasirinktoms energijos formoms keisti elektros energija. Metodų analizė užbaigiama aparatinės įrangos projektavimu.

Suprojektuota aparatinė įranga naudojama praktiniams energijos gavybos metodų tyrimams atlikti. Eksperimentiniu būdu bandoma ištirti skirtingų metodų efektyvumą ir gautus rezultatus pritaikyti galutiniam aplinkos energijos naudojimo sistemos prototipui sukurti.

1. APLINKOS ENERGIJOS NAUDOJIMO TECHNOLOGIJOS

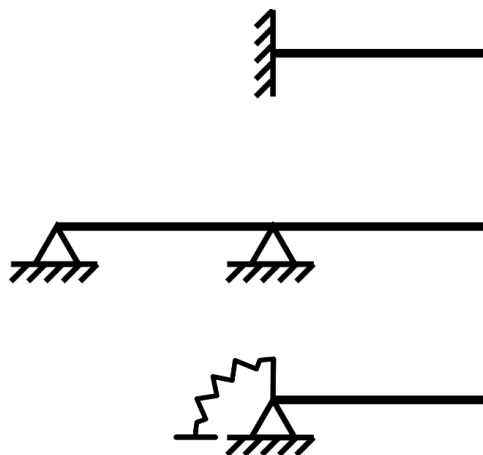
Šiame skyriuje nagrinėjama naujausia mokslinė literatūra, susijusi su įvairių formų aplinkos energijos naudojimu įrenginiams, kurių veikimas paremtas mažo energijos suvartojimo technologijomis. Pagrindinis šio skyriaus tikslas – surasti patikimus informacijos šaltinius, susijusius su mažo suvartojimo jutiklių maitinimo grandinėmis, ir juos kritiškai įvertinti.

1.1. Mechaninių virpesių energijos naudojimas

Vienas iš pagrindinių mechaninės energijos trūkumų naudojant WSN yra tai, kad didžiausias efektyvumas ir energijos kiekis išgaunamas tik arti rezonansinio generatoriaus dažnio. Tolstant nuo šio dažnio, keičiamos energijos kiekis eksponentiškai mažėja. Taip pat kiekviena aplinka ar patalpa turės daug įvairių dažnių virpesių, dėl to kuriant ar diegiant mechaninių vibracijų generatorių, labai svarbu kiek įmanoma daugiau išplėsti jo efektyvių dažnių ruožą [4].

Energijos gavyba iš vibracijų galima trimis pagrindiniais būdais:

- Pjezoelektriniu – šis efektas pasireiškia pjezoelektrinėse medžiagose. Tokias medžiagas veikiant išorinei mechaninei jėgai, atsiranda krūvininkų judėjimas.
- Elektromagnetiniu – šis būdas pagrįstas elektromagnetinės indukcijos principu, t. y. judantis magnetas kuria kintantį magnetinį lauką, kuris šalia esančios ritės vijose indukuoja kintančią elektros srovę.
- Elektrostatiniu – šiuo atveju naudojamas kintamos talpos kondensatorius, kurio plokštelių vieta ar dydis (aplinkinių plokštelių atžvilgiu) kinta. Dėl minėtų priežasčių pakinta kondensatoriaus įtampa arba krūvis. [5]

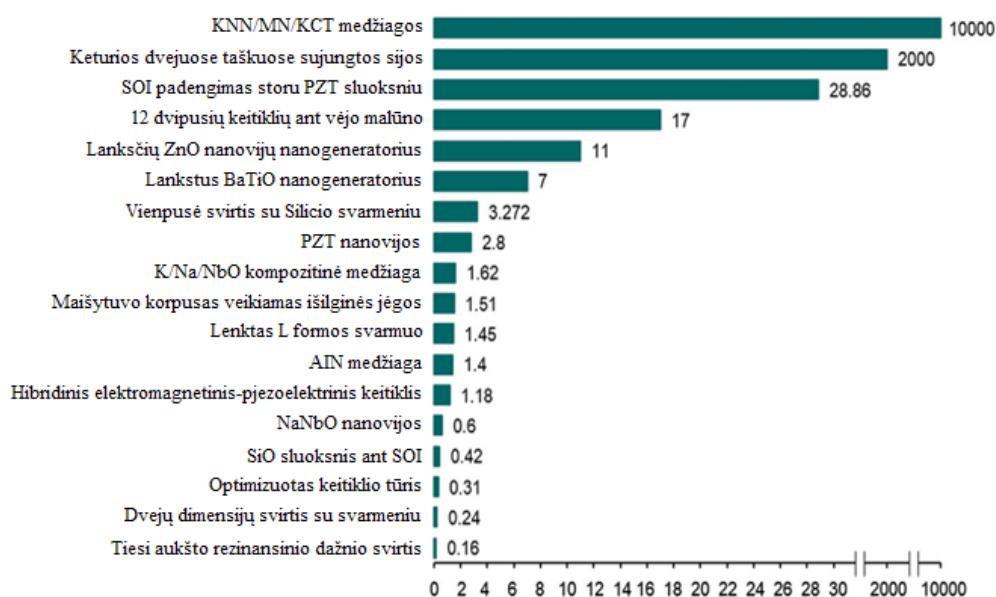


1.1 pav. Konstrukcija – svirtis

Šiuo metu pjezoelektrinis mechaninės energijos išgavimo būdas yra plačiausiai naudojamas iš trijų minėtų. Pagrindinės to priežastys yra šios [6]:

- didesnis galios tankis tokio paties dydžio generatoriuje,
- dėl medžiagų savybės sukurti krūvį tokie generatoriai yra žymiai paprastesni, nes jiems reikia mažiau pagalbinių komponentų,
- generatoriaus mastelį labai lengva keisti.

Siekiant pjezoelektrinį gavybos būdą padaryti dar efektyvesnį, įgyvendinant šiuos generatorius dažniausiai pasirenkama pjezoelektrinės medžiagos svirties konstrukcija. Tai yra ilga konstrukcijos atšaka, stabiliai įtvirtinta tik viename gale (žr. 1.1 pav.). Svirtis (angl. *Cantilever*) yra struktūrinis elementas, pasižymintis pertekline deformacija arba gaunama didele deformacija nuo santykinai nedidelės jėgos. Naudodami tokią konstrukciją, įvairias jos atmainas ir pasirinkdami optimalią pjezoelektrinę medžiagą, pastaraisiais metais mokslininkai šią technologiją stipriai išstobulino. 1.2 pav. matome paskutinio dešimtmečio pjezoelektrinių energijos išgavimo sistemų analizę.



1.2 pav. Efektyviausios pjezoelektrinio generatoriaus struktūros ir medžiagos [7]

Pavaizduotame grafike matome įvairius svirtinės generatoriaus konstrukcijos tobulinimo metodus ir jais pasiekiamą išgaunamos galios tankį viename kubiniame centimetre. Daugelis minimų itin efektyvių sistemų naudoja sudėtingas, sunkiai prieinamas technologijas ir tik aukščiausio lygio laboratorijose pagaminamas medžiagas. Tai naudoti plačiai ir masiškai visiškai netinka. Tačiau net ir pati „blogiausia“ sistema – tiesi aukšto rezonansinio dažnio svirtis – pasiekia daugiau nei pakankamą naudingumo koeficientą, kad būtų patraukli diegti šiuolaikiniuose jautiklių tinkluose. Nurodoma

pastarosios konstrukcijos potenciali galia siekia $160 \mu\text{W}/\text{cm}^3$ [8]. Ši sistema yra itin paprastos konstrukcijos, o šiuolaikiniams jutikliams, procesoriams ar kitiems elektronikos komponentams pakanka dešimčių mikrovatų eilės energijos kiekio miego režimu.

Viena iš pagrindinių problemų, su kuriomis susiduriama plečiant pjezoelektrinių keitiklių gamybą, yra tinkamos medžiagos parinkimas. Šiuo metu populiariausias junginys yra PZT. Ši medžiaga pasižymi maža kaina, dideliu efektyvumu ir ištobulintu gamybos procesu. Kitą vertus, tai yra trapi ir mažai jėgos atlaikanti medžiaga. Tai reiškia, kad PZT netinkamas aplinkoje, kurioje daug didelio dažnio periodinių virpesių. Be to, net ir naudojimo aplinkoje nesant minėtiems virpesiams, šiai medžiagai pakanka vieno nedidelio smūgio, kad generatoriuje atsirastų konstrukcijos iškrypimų ar įtrūkimų [7].

Nors pjezoelektrinis konversijos metodas yra pats populiariausias, kaip minėta anksčiau, yra ir kitų būdų. Pavyzdžiui, elektromagnetinė energijos konversija paranki tuo, kad tokio tipo generatoriuje nebus mechaninės sąveikos tarp dalių. Taip pat nereikės ir išorinės mechaninės jėgos, kad būtų keičiama energija. Tačiau tokio tipo keitikliai, lyginant su kitais, yra mažos išėjimo galios ir didesnių matmenų. Kaip ir pjezoelektrinių, elektromagnetinių aplinkos energijos keitiklių efektyvumas labai priklauso nuo parinktos medžiagos, šiuo atveju – magneto. Skirtingos medžiagos turi skirtingą magnetinio lauko stiprį, skirtingą savaiminio išsimagnetinimo spartą ir kt. Kadangi dažniausiai kalbama apie itin mažus dydžius ir sroves, medžiagos pasirinkimas yra viena iš svarbiausių projektavimo dalių, nes nuo to priklausys naudingumas, ilgaamžiškumas ir pan. Taip, kaip pjezoelektrinėse sistemose dažniausiai naudojama PZT, elektromagnetinėse sistemose plačiausiai naudojami NeFeB magnetai. Jie kitus dažnai naudojamus tokio paties tūrio magnetus pagal magnetinio lauko stiprį lenkia nuo pusantro iki keturių kartų [9]. Taip pat NeFeB neišsimagnetina nuo pastovių vibracijų.

Remiantis pastarųjų metų tyrimais, pagrindinis elektromagnetinių keitiklių trūkumas – labai maža išėjimo įtampa. Tinkamas pavyzdys yra [10] straipsnyje pasiūlytas generatoriaus variantas. Šiame darbe sukurta sistema, telpanti į 20 kubinių milimetrų tūrį ir gebanti išgauti iki $20,9 \mu\text{V}$ amplitudės įtampą esant 365 Hz virpesių dažniui. Šis tyrimas nusako dabartinę elektromagnetinių aplinkos energijos keitiklių būklę:

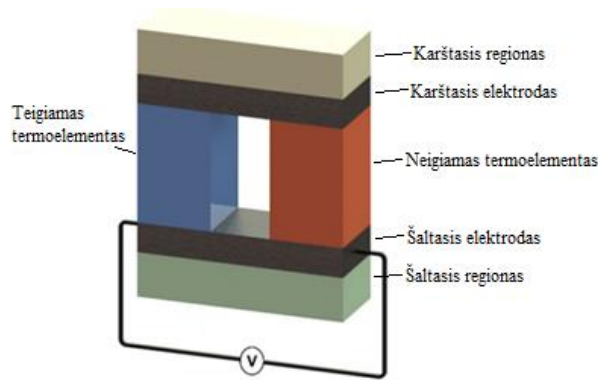
- generatorių matmenys gali būti gana maži ir būti tinkami belaidžiams jutiklių tinklams;
- naudoja gerai išplėtotas technologijas ir medžiagas, dėl to įmanoma masinė gamyba;
- surenkama nedaug energijos.

Dešimčių mikrovoltų dydžio įtampa netinkama beveik jokiai elektroninei sistemai. Tokio lygio įtampą galima panaudoti kondensatoriams įkrauti, o visiškai jiems įsikrovus energija būtų atiduodama baterijai naudojant įtampą didinančius keitiklius. Nors tokiu būdu galėtume panaudoti minimalias elektrines vertes, kiti konversijos metodai generuoja daugiau įtampos naudodami tokius pačius matmenis ir aplinkos sąlygas. Dėl to galima daryti išvadą, kad šis konvertavimo būdas nėra optimalus pritaikant WSN.

Dar vienas kinetinės energijos keitimo variantas – elektrostatinis. Šis metodas pasižymi vienu dideliu trūkumu, kurio kiti metodai neturi – reikalinga pradinė įtampa ir krūvis. Tokie generatoriai sukuria srovę, kai dėl išorinio mechaninio poveikio pasikeičia sistemoje esančio kondensatoriaus talpa. Lyginant su kitais metodais, tai nėra patogu, tačiau generatorius, kurio veikimas pagrįstas kondensatoriais, yra lengvai gaminamas dėl pažangių IC kūrimo technologijų. 2012 m. G. Altena, D. Hohlfeld’as, L. Elfrink’as simuliacijomis nustatė, kad įmanoma pagaminti SOC generatorių, gebantį kurti 5,891 μW galią iš 2000 Hz virpesių. Iš pirmo žvilgsnio atrodo, kad susiduriame su ta pačia problema kaip ir elektromagnetinių keitiklių atveju, tačiau reikia įvertinti tai, kad kalbame apie mikronų eilės, o ne milimetrų fizinį dydį. Pasirinkus tinkamą struktūrą ir matmenis, šią galią galima padidinti arčiau naudingos ribos. Eksperimentiškai buvo įrodyta, kad įmanoma stabili 3 V išėjimo įtampa [12]. Taip pat minima, kad įmanomas kompromisas tarp gamybos sudėtingumo ir generatoriaus rezonansinio dažnio. Generatoriaus dydžio ir kainos atžvilgiu šis energijos keitimo būdas yra geriausias. Nepaisant to, pradinio kondensatoriaus įkrovimo reikalavimas iš dalies prieštarauja visai nepriklausomų belaidžių įrenginių idėjai. Taigi elektrostatinio keitimo metodo tinkamumas priklauso nuo konkretaus panaudojimo atvejo.

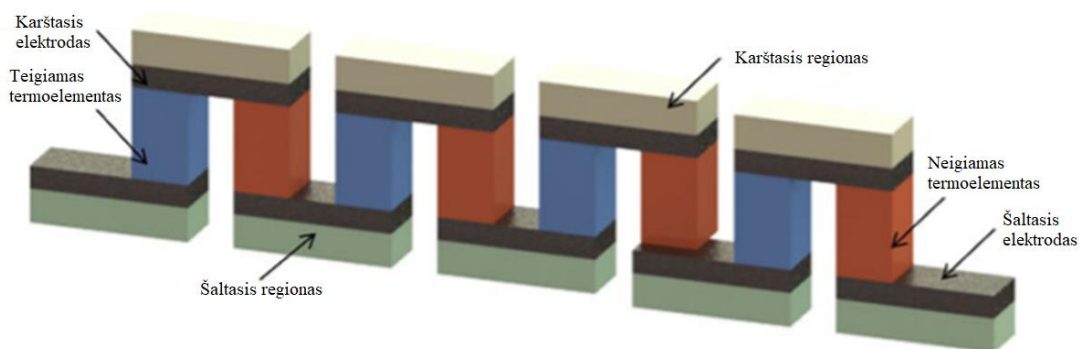
1.2. Temperatūros svyravimų energijos naudojimas

Šilumos energiją išgauti galima keliais būdais, tačiau literatūroje dažniausiai aptariami du pagrindiniai: termoelektrinis ir piroelektrinis. Pirmasis būdas naudoja Zėbeko efektą (angl. *Seebeck*). Šis fizikinis reiškiny yra krūvininkų pernašos atsiradimas dėl temperatūros skirtumo tarpusavyje sujungtuose skirtinguose laidininkuose ar puslaidininkuose – termoporose. Tokio junginio konstrukcija pavaizduota 1.3 pav. Zėbeko efektas taip pat apibrėžia, kad šis potencialų skirtumas yra tiesiogiai proporcingas temperatūrų skirtumui. Ši priklausomybė dar vadinama termogalia arba Zėbeko koeficientu.



1.3 pav. Termoporos struktūra [12]

Vienos termoporos pasiekti norimą galią neužtenka ir jos yra sujungiamos nuosekliai (žr. 1.4 pav.). Tai yra n sujungtų termoporų eilė, kur jos jungiamos nuosekliai, o šiltų ar šaltų regionų atžvilgiu – lygiagrečiai. Kitas esminis termoelektrinių keitiklių bruožas – itin paprasta konstrukcija. Ji yra pigi, lengvai atkartojama dideliu masteliu, netriukšminga ir neturinti jokių judančių dalių.



1.4 pav. Nuosekliai sujungtos termoporos [12]

Apžvelgus labiausiai cituojamus su TEG susijusius tyrimus [12], buvo nustatyta, kad vieno iš sėkmingiausių pastarųjų metų eksperimentų metu buvo pasiekta $2,5 \text{ W/cm}^2$ galia [13]. Tai buvo pasiekta naudojant iš ErAs: InGaAs ir ErAs: $(\text{InGaAs})_{0,8}(\text{InAlAs})_{0,2}$ lydinių pagamintas plėveles, sujungus 200 termoporų. Nors tai yra dešimtimis kartų daugiau galios nei reikia nedideliams belaidžiams įrenginiams, toks rezultatas pasiekiamas tik esant 140 Kelvinų temperatūros skirtumui, kuris realiame pasaulyje yra retas. Realesnėmis sąlygomis, pavyzdžiui, esant vieno laipsnio skirtumui, naudojant BiSbTe – BiTe ir PbTe – PbSeTe junginius, įmanoma pasiekti $56,25 \mu\text{W/cm}^2$ galią [14].

Kadangi temperatūros svyravimai yra beveik visose aplinkose, TEG turi labai platų panaudojimo spektrą, įskaitant vieną iš aktualiausių sričių – automobilius. Plačiausiai pritaikomas panaudojimo atvejis aprašytas 2010 m. N. Espinosa'os ir M. Lazard'o [15] tyrime. Šios komandos

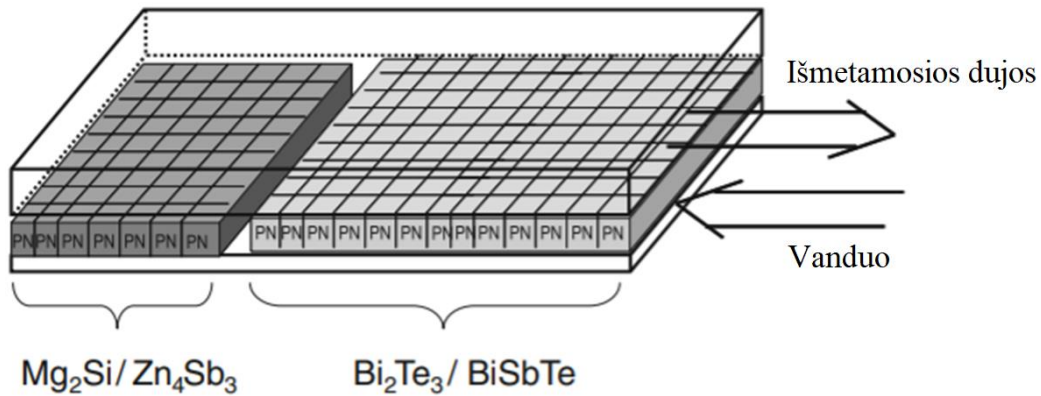
tikslas buvo išnagrinėti termoelektrinių generatorių pritaikomumą dyzeliniuose, ilgiems atstumams skirtuose sunkvežimiuose. Siekiant maksimalaus efektyvumo, TEG turėtų būti sumontuotas tarp dviejų transporto priemonės techninių mazgų su skirtingomis temperatūromis. Išskirtos 4 potencialios vietos, kuriose įmanoma išgauti reikalingus temperatūros svyravimus:

- Aušinimo skystis (temperatūra nuo 50 °C iki 110 °C).
- Išmetamosios dujos (temperatūra nuo 250 °C iki 350 °C).
- Išmetamųjų dujų recirkuliacijos sistema (temperatūra nuo 400 °C iki 500 °C).
- Aukšto slėgio oro aušintuvo išėjimas (temperatūra svyruoja apie 150 °C ribą).

Iš išvardintų variantų išsiskiria du: išmetamosios dujos ir jų recirkuliacija. Nors abiejų sistemų temperatūros svyravimas yra panašus, išmetamosios dujos turi vieną privalumą lyginant su EGR – didesnę dujų srautą. Tai reiškia daugiau keičiamos energijos ir didesnę keitiklio efektyvumą. Tyrime šaltajai TEG sistemos daliai pasirinkta variklio aušinimo sistema.

Išsprendus konstrukcijos ir montavimo problemas, kitas tyrimo etapas – optimalus medžiagų pasirinkimas. Kaip minėta anksčiau, esminis TEG medžiagų parametras yra termoelektrinis naudingumas. Espinosa et al. kaip vieną iš tinkamiausių medžiagų nurodė įvairios kompozicijos bismuto, švino ir telūro lydinius. Verta paminėti, kad tokios medžiagos siūlomos ir kituose tyrimuose. Taip yra, nes šios medžiagos yra prieinamos ir nebrangios, o reikiamose temperatūrose jų termoelektrinis naudingumas yra 0,7–1. Svarbu pabrėžti, kad realybėje tokios medžiagos tikriausiai netiktų dėl didelių švino kiekių. Žemesnėms temperatūroms (iki 100 °C) iš šių lydinių galima pašalinti šviną ir išlaikyti gerą efektyvumą, tačiau aukštos temperatūros sistemos dalies taip įgyvendinti nepavyks. Kadangi automobilių industrija dėl aplinkosaugos reikalavimų privalo mažinti švino kiekius savo gaminiuose, aukštos temperatūros sistemos pusei nuspręsta naudoti Mg_2SiSn ir Zn_4Sb_3 lydinius (jų termoelektrinis naudingumas atitinkamai 1,3 ir 1,1). Pastebėtina, kad dideliame kiekyje analizuotos literatūros naudojami masiškai gaminti dar neparuošti cheminiai junginiai, dėl to plataus komercinio panaudojimo netolimoje ateityje nebūtų.

Kitas svarbus šio tyrimo sprendimas yra termoporų išdėstymas (žr. pav. 1.5). Naudojant dviejų tipų termoporas, kurios efektyvios skirtingose temperatūrose, ir šias termoporų sekcijas išdėsčius vieną šalia kitos, buvo padidintas sistemos našumas: išmetamosioms dujoms keliaujant pro aukštos temperatūros Mg_2SiSn/ Zn_4Sb_3 zoną, jos atvėsta ir likusi energija panaudojama žemos temperatūros zonoje. Galima pridėti dar daugiau temperatūrinių zonų, tačiau dėl to nukentėtų kaina ir būtų sunkiau pagaminti. Tyrimo eigoje nustatyta, kad šis sprendimas apie 11 % padidino sistemos generuojamą galią.



1.5 pav. Efektyviai dujų aušinimą naudojanti termoporų struktūra [15]

Atlikus teorinius skaičiavimus ir juos patikrinus eksperimentiškai, galutinėje iteracijoje 50x31x10 cm generatoriumi buvo pasiekta išėjimo galia, svyruojanti tarp 1000 W ir 1200 W.

Termoelektrinė energijos gavyba yra senas metodas lyginant su kitomis technologijomis. Pats Zėbeko efektas atrastas 1821 m., o praėjus šimtmečiui, radioaktyvių medžiagų šilumą naudojančios TEG buvo siunčiami į kosmosą kaip palydovų sudedamoji dalis. 1999 metais pristatytas ir pirmasis miniatiūrinis komercinis TEG naudojantis įrenginys. Tai buvo laikrodis, naudojantis žmogaus kūno šilumą. Pastaraisiais metais, eksperimentiškai įrodyta, kad galimas ir „Bluetooth“ modulio maitinimas [16].

Piroelektrinis metodas yra panašus į aptartą pjezoelektrinį metodą, tik šiuo atveju naudojama piroelektrinė medžiaga. Temperatūros svyravimai keičia tokių medžiagų struktūrą (poliarizaciją), dėl ko atsiranda potencialų skirtumas ir kryptingas krūvininkų judėjimas piroelektrinės medžiagos paviršiumi. Bendruoju atveju tokius generatorius galima įsivaizduoti kaip tarp dviejų elektrodų įtvirtintą piroelektrinę plokštelę, kai vienas elektrodas liečiasi su karštu, o kitas su šaltu kūnu. Piroelektrinės medžiagos išsiskiria tokiomis savybėmis [17]:

- Šildant tokias medžiagas srovė teka viena kryptimi, o šaldant – priešinga;
- Poliarizacijos kryptis kai kuriose medžiagose gali būti pakeista panaudojant išorinį priverstinės poliarizacijos elektrinį lauką;
- Visos feroelektrinės medžiagos yra piroelektrinės, o visos piroelektrinės medžiagos yra pjezoelektrinės.

1.3. Šviesos energijos naudojimas

Saulės energijos naudojimas yra pats paprasčiausias būdas maitinti jutiklių tinklus. Šis metodas yra daugiausia ištirtas ir labiausiai paplitęs. Taip pat, saulės elementų energijos konversijos naudingumas yra didžiausias iš jau aptartų metodų.

1.1 lentelė. Saulės elementų tipų palyginimas

TIPAS	EFEKTYVUMAS	PRIVALUMAI	TRŪKUMAI
Silicio saulės elementai			
Monokristaliniai	15–24 %	Aukštas efektyvumas, brandžiausia technologija, aukštas patikimumas	Didelės silicio sąnaudos, aukšta kaina, sudėtinga gamybos technologija
Polisilicio	14–20,4 %	Efektyvumas laikui bėgant nekrenta, pigi gamyba, daug pigesnis už monokristalinius elementus	Santykinai didelės silicio sąnaudos ir aukšta kaina, sudėtinga gamybos technologija
a-Si	8–13,2 %	Žema kaina, lengva gaminti masiškai, gerai veikia mažo apšvietimo sąlygomis, laikui bėgant nekrenta efektyvumas	Šviesos sukeltas ilgalaikis efektyvumo mažėjimas, žemesnis naudingumas, mažas stabilumas
Daugiakomponentiniai saulės elementai			
CdS	Iki 16 %	Maža kaina ir lengva gamyba	Toksiškos sudedamosios dalys (Kadmis)
CdTe	Teoriškai 28 %	Maža kaina, paprasta struktūra, aukštas efektyvumas ir stabilumas, idealus apšvietos spektras	Toksiškos ir sunkiai prieinamos sudedamosios dalys
GaAs	Iki 30 %	Labai aukštas efektyvumas, geras temperatūrinis stabilumas	Per didelė kaina
CIGS	Iki 20 %	Žema kaina, gerai veikia mažo apšvietimo sąlygomis, laikui bėgant nekrenta naudingumas, derinamas efektyvios apšvietos spektras	Naudojamos retos medžiagos, sunku užtikrinti gamybos proceso stabilumą, kai naudojamos keturios medžiagos
PPVC	Iki 5 %	Maža kaina, lankstumas, nesudėtinga gamyba	Žemas efektyvumas, nestabilumas
TiO ₂	Virš 10 %	Maža kaina, lankstumas, nesudėtinga gamyba, stabilumas	Žemas efektyvumas, jauna technologija

Saulės elementai skaidomi į dvi kategorijas pagal jų naudojamą medžiagą (žr. 1.1 lentelę). Turint omenyje, kad saulės spindulius žemės paviršiuje galima sulyginti su 100 mW/cm² energijos šaltiniu [1], matome, kad geriausiomis sąlygomis iš šviesos galima išgauti iki 30 mW/cm² galią. Tai įmanoma tik idealiomis sąlygomis, o kai kuriais atvejais, pavyzdžiui, CdTe (Cd – kadmis, Te – telūras), tik teoriškai. Įvertinus gamybos kaštus, technologinį sudėtingumą ir medžiagų prieinamumą,

praktiškai naudojami tik silicio monokristaliniai ir polikristaliniai elementai dėl gero kainos ir efektyvumo santykio. Esminis saulės elementų trūkumas yra tai, kad jie efektyviai veikia tik lauke. Kitą vertus, dėl pakankamai didelio efektyvumo, saulės elementai dienos metu surinktą energiją gali kaupti baterijoje ar kondensatoriuose, o, naktį ar pablogėjus aplinkos sąlygoms, tą energiją naudoti prietaiso maitinimui. Dėl to, toks energijos gavimo būdas yra dažnas pasirinkimas IoT įrenginiams. Šis konversijos metodas įmanomas ir po stogu veikiančioms įrenginiams, naudojant dirbtinį apšvietimą. Tokių keitiklių galios tankis retai viršija $0,1 \text{ mW/cm}^2$. Veikimas galimas ir su tokiu energijos kiekiu, tačiau jutiklio ar kitokio prietaiso funkcionalumas būtų labai varžomas.

1.4. Elektromagnetinių bangų energijos naudojimas

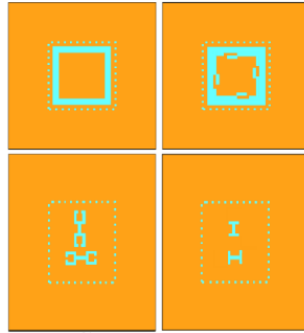
Radijo bangų energijos panaudojimas jutiklių maitinimo grandinėse yra rečiausiai naudojamas iš aptartų metodų šiandieninėje jutiklių rinkoje, tačiau sėkmingai įgyvendinus, turi didelį potencialą WSN srityje. Pirmieji šią idėją iškėlė Nikolas Tesla ir Heinrichas Hertcas. Jie teigė, kad įmanoma išspinduliuoti energiją į aplinką ir paskui vėl paversti ją naudojama nuolatinės srovės energija. Ši mintis plėtojama IEEE (angl. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) publikuotame straipsnyje „Ambient RF Energy-Harvesting Technologies for Self-Sustainable Standalone Wireless Sensor platforms“ [18]. Straipsnio autoriai WPT technologijas išskirsto į artimo ir tolumo lauko sistemas (angl. *near-field and far-field systems*). Artimo lauko sistemos energijos perdavimui nedideliais atstumais naudoja elektromagnetinę indukciją ar magnetinį rezonansą ir, pasak autorių, gali pasiekti didesnę nei 80 % energijos perdavimo naudingumo koeficientą. Pagrindinis šios technologijos trūkumas yra tai, kad elektromagnetinė energija artimo lauko ribose (kai atstumas nuo šaltinio mažesnis nei dešimtadalis bangos ilgio) silpsta 60 dB per dekadą greičiu, todėl nuotolinis energijos perdavimas labai mažina perdavimo efektyvumą [19]. Dėl šios priežasties WSN technologijoms artimo lauko WPT sistemos yra netinkamos. Tačiau tolumo lauko energijos perdavimo sistemos elektromagnetinėms bangoms priimti naudoja antenas ir tam tikras diodų ar tranzistorių konfigūracijas kintamos srovės energijai paversti nuolatine. Šis būdas tinkamas WSN maitinimui, tačiau leidžia perduoti santykinai mažą kiekį energijos, palyginus su kitomis aplinkos energijos panaudojimo technologijomis. Šiame straipsnyje pateikiama lentelė, kurioje lyginamos skirtingos aplinkos energijos išgavimo technologijos pagal jų galios tankį, įtampos lygį, laiką kada energija prieinama, bendrus privalumus ir trūkumus (žr. 1.2 lentelę). Taip pat pateikiami integrinių grandynų pavyzdžiai, kuriuos galima naudoti realizuojant skirtingų tipų sistemas. Radijo bangų panaudojimas energijos perdavimui straipsnyje plačiai apžvelgiamas: aprašomi skirtingi antenų

dizaino variantai, nurodoma grandinė skirta kintamos srovės energijai pakeisti nuolatine, aptariamas visas sistemos veikimo ciklas.

1.2 lentelė. Panaudojamų aplinkos energijos šaltinių palyginimas [18]

	Saulės energija	Šiluminė energija	Radijo bangų energija	Pjezoelektrinė energija (vibracijų)
Galios tankis	100 mW/cm^2	$60 \text{ }\mu\text{W/cm}^2$	$0,002\text{--}1 \text{ }\mu\text{W/cm}^2$	$200 \text{ }\mu\text{W/cm}^2$
Išėjimo įtampa	0,5 V	-	3–4 V	10–25 V
Prieinamumas	Dienos metu	Pastovus	Pastovus	Priklauso nuo veiklos
Svoris	5–10 g	10–20 g	2–3 g	2–10 g
Privalumai	Didelis energijos kiekis; išstobulinta technologija;	Pastovus energijos šaltinis;	Plačiai prieinama; antena gali būti integruota į konstrukciją;	Ištobulinta technologija; lengva konstrukcija;
Trūkumai	Reikia didelių matmenų; nepastovi energija; stiprus kryptingumas.	Reikia didelių matmenų; generuoja nedaug energijos; mažas lankstumas.	Priklauso nuo atstumo iki šaltinio; priklauso nuo šaltinio prieinamumo.	Reikia didelių matmenų; nepastovi galia išėjime.

Radijo bangų energiją galima išgauti iš daugelio šaltinių, bet dažniausiai sutinkami energiją pernešantys signalai iš mobiliųjų tinklų bazinių stočių, Wi-Fi prisijungimo taškų, palydovinės komunikacijos retransliatorių ir analoginių/skaitmeninių TV signalų siųstuvų. Šio tipo energijos išgavimo grandinės gali būti skirstomos į dvi kategorijas: viena grandinė, skirta išgauti energiją iš vienos dažnio juostos bangų arba grandinių rinkinys, kur kiekviena jų priderinta konkrečiai dažnių juostai [20]. Kadangi aplinkos mikrobangų energijos lygiai dažniausiai yra labai žemi, reikia labai efektyvių antenų norint išgauti net mažiausius energijos kiekius, todėl siekiant šį energijos tipą pritaikyti praktiškai, būtina naudoti daugelio dažnių juostų energiją. Daugelio dažnių juostų grandinė su plačiajuoste antena, naudojama vietoj daug siaurajuosčių antenų, yra plačiau aprašoma [21] ir leidžia sumuoti visų dažnių bangų energijas, net jei visi energijos šaltiniai nėra prieinami vienu metu. Efektyviausi antenos dizainai skirti mikrobangų energijos panaudojimui aptariami [22] straipsnyje (žr. 1.6 pav.). Taip pat [23] aptariamos kompaktiškos antenos ir kaip galima sumažinti žinomus antenų dizainus neprarandant jų efektyvumo.



1.6 pav. Antenų pavyzdžiai pateikiami [22] straipsnyje

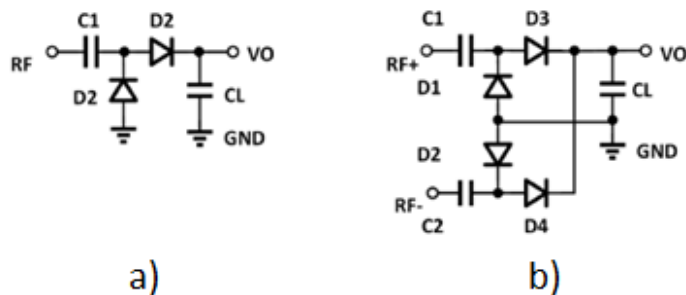
Taip pat labai svarbu kad visa mikrobangų energijos kaupimo ir panaudojimo grandinė yra pakankamai efektyvi, nes net maži nuostoliai tokio tipo sistemose gali nulemti ar sistema galės funkcionuoti. Plati apžvalga pateikiama [24] straipsnyje, kuriame aptariama tokio tipo sistemos blokinė diagrama ir kiekvieno iš šių blokų galios perdavimo naudingumo koeficientai, kurių suma sudaro bendrą sistemos efektyvumą. Taip pat straipsnyje charakterizuojama mikrobangų panaudojimo sistema, kurios dizainas leidžia išgauti didžiausią šiuo metu įmanomą išėjimo galią.

Taigi apžvelgus nedidelę dalį straipsnių, susijusių su mikrobangų energijos panaudojimu, matyti, kad informacijos visapusiškai šios temos analizei tikrai yra, tik reikia ją kritiškai išsianalizuoti ir tinkamai panaudoti.

1.4.1. Maitinimo grandinių ir integrinių grandynų analizė

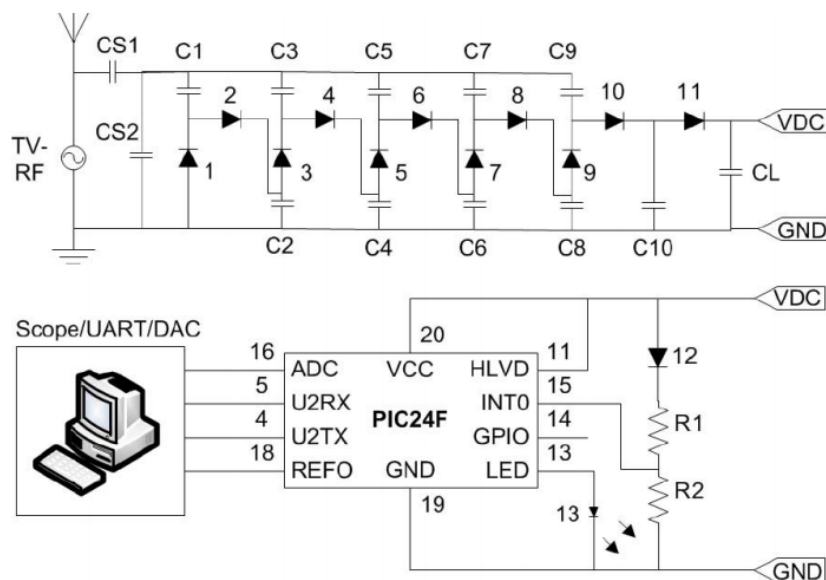
Siekiant panaudoti mikrobangų energiją, reikia ne tik gerai priderinti anteną norimiems dažniams bet ir sukurti efektyvią grandinę, kuri paverstų kintamą įtampą nuolatine. Taip pat reikia efektyvios grandinės išgauti galiai apdoroti ir kaupti. Tam geriausia naudoti integrinį grandyną, nes jų naudingumo koeficientas dažniausiai aukštesnis už kitų tipų grandines.

Pradėsime maitinimo grandinę nagrinėti nuo lygintuvo dalies, kuri konvertuos kintamąją įtampą įėjime į panaudojamą nuolatinę įtampą. Nagrinėdami šią dalį turėsime omenyje, kad antena jau suderinta ir efektyviai priima signalą. Įtampos lygintuvų grandinės gali būti skirstomos pagal simetriją į vieno įėjimo arba diferencines, ir pagal signalo lyginimo pobūdį į vieno arba dviejų pusperiodžių grandines (žr. 1.7 pav.). Dviejų pusperiodžių grandinės dažniausiai būna efektyvesnės konvertuojant AC-DC. Dažnai tokio tipo grandinėse naudojamas Diksono lygintuvas, nes efektyviai panaudoja signalų energiją ir išėjime duoda aukštesnę įtampą. RF signalai dažniausiai perneša mažą kiekį energijos, todėl signalo amplitudės yra mažos, taip pat jų dažnis yra didelis, taigi reikalingi mažą inertiškumą turintys komponentai. Dėl šios priežasties RF lygintuvuose dažniausiai naudojami Šotkio diodai [20].



1.7 pav. Tipinės vieno (a) ir diferencinio (b) įėjimų lygintuvų schemas [25]

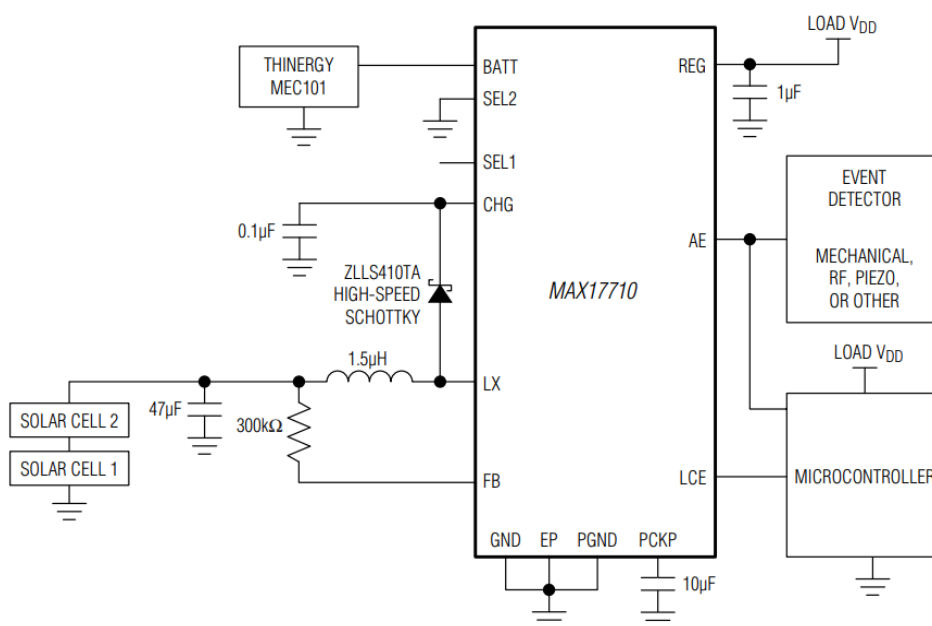
Tokio tipo lygintuvų grandinės gali būti pritaikytos maitinti įvairaus tipo sensorius ir mažos galios mikroprocesorius. Šios grandinės yra specialiai pritaikomos konvertuoti mikrovatų lygio RF energiją ir tuo pačiu padidinti išėjimo įtampą į panaudojamą lygį. Tai realizuojama naudojant įvairių struktūrų įtampos daugintuvus. Viena tokių grandinių, skirtų maitinti PIC24F mikrovaldiklį, pateikiama [26] straipsnyje (žr. 1.8 pav.). Tokio tipo sistemos gali būti plačiai pritaikomos, nes yra mobilios, joms neturi įtakos sezoniškumas ar įvairūs aplinkos veiksniai ir nereikalauja pastovios priežiūros. Dėl šių priežasčių RF energijos panaudojimas šiuolaikiniuose jutiklių tinkluose būtų naudingas ir leistų įvairaus tipo jutiklius palikti ilgam rinkti duomenis be jokios papildomos priežiūros.



1.8 pav. RF lygintuvo panaudojimo mikrovaldiklio maitinimui schema [26]

Tokios RF energijos panaudojimo grandinės taip pat gali būti įgyvendinamos ir baterijos krovimo aplikacijose. Paprastai jos būna sudarytos iš keturių pagrindinių struktūrinių elementų: antena, diodų lygintuvas, PPM grandinė, baterija. PPM grandinė paprastai būna įgyvendinama integrinio grandyno pavidalu, nes tokios mažos galios kaip perneša RF signalai panaudojimui

reikalingas didelis grandinės efektyvumo koeficientas, maži įtampos kritimai ir žema įėjimo įtampa. „Maxim integrated“ pateikia savo sprendimą MAX17710 (žr. 1.9 pav.). Tai integrinis grandynas, skirtas energijos kaupimui naudojant nestabilius mikroenergijos šaltinius. Ši mikroschema leidžia panaudoti tokius energijos šaltinius kaip TEG, RF, saulės elementai ir t. t. [27]. Integrinis grandynas gali panaudoti energija nuo 1 μW iki 100 mW mikroenergijos kaupimo celėms (MEC) krauti. Įėjimo įtampa gali būti nuo 0,75 V, o panaudojus integruotą įtampą aukštinantį keitiklį, išėjime išduodamos trys stabilios įtampos variantai: 3,3 V, 2,3 V ir 1,8 V. Taip pat mikroschema turi integruotas apsaugas nuo celės perkrovimo ir arba per didelio išsikrovimo. Dokumentacijoje detalai aprašomi įvairūs mikroschemos panaudojimo variantai ir pateikiama tipinio pritaikymo schema.



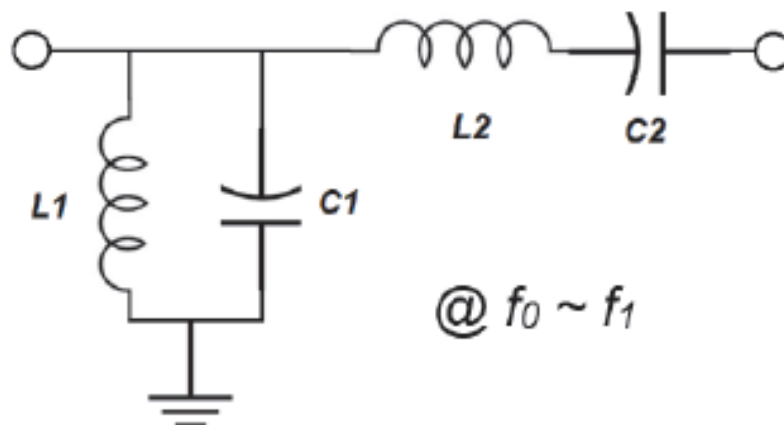
1.9 pav. MAX17710 integrinio grandyno tipinio pritaikymo schema [27]

Taip pat yra panašios paskirties modulių su visiškai integruota lygintuvo grandine, įtampą aukštinančiu keitikliu ir įtampos stebėjimo sistema. Kompanija „PowerCast“ yra sukūrę savo RF energijos kaupimo modulį P2110 [28]. Jis yra skirtas 915 MHz dažnio radijo bangų panaudojimui maitinant mažo suvartojimo mikrovaldiklius. Veikimo principas labai panašus į kitas šio tipo sistemas, tačiau šiuo atveju įtampa yra kaupiama išoriniame kondensatoriuje kol pasiekiamas tam tikras lygis, tada atidaromas išėjimas ir maitinamas mikrovaldiklis kol įtampa nukrinta žemiau nustatytos ribos ir išėjimas vėl būna uždaromas. Taigi esant didesniai mikrovaldiklio suvartojimui ar silpnam RF signalui galima tikėtis, kad sistema persikraus ir po kiek laiko iš naujo išsijungs. Toks metodas taip pat naudojamas kitose sistemose, tačiau ten tokie energijos išdavimo impulsai skirti baterijos krovimui, kas užtikrina pastovesnę sistemos veikimą net ir esant nestabilioms maitinimo sąlygoms.

1.4.2. Antenų tipai ir jų efektyvumas

Norint sukurti funkcionalią radijo bangų energijos panaudojimo grandinę, reikia geros antenos, kuri galėtų efektyviai šias bangas priimti. Antenos būna įvairių konstrukcijų ir formų priklausomai nuo pritaikymo ir norimų panaudoti radijo bangų dažnio. Šiame poskyryje aptariami keli žinomi antenų tipai ir įvertinama, kuris iš jų tinkamiausias radijo bangų energijai panaudoti.

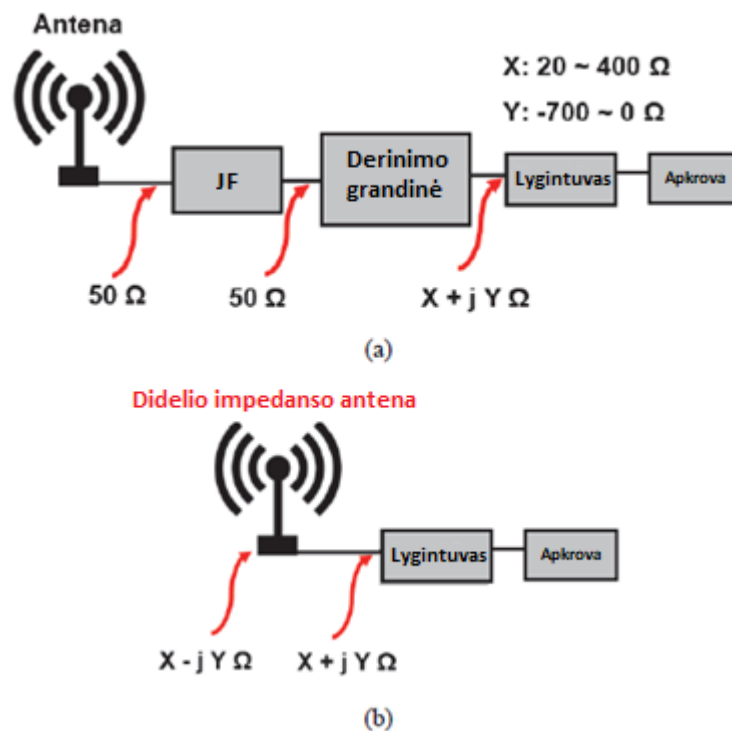
Pirmasis idėjas apie belaidį energijos perdavimą išklėlė Nikolas Tesla 1890 metais, tačiau sėkmingas energijos perdavimas buvo įgyvendintas tik 1963 metais „Raytheon Spencer“ laboratorijoje, kai buvo perduota 100 W galia. Tai paskatino įvairių sričių specialistų susidomėjimą belaide energija. Šiais laikais augantis jutiklių tinklų naudojimas taip pat spartina šios technologijos raidą, nes baterijomis maitinami jutikliai kainuoja brangiau ir negali būti labai ilgalaikiai, jei siekiamas pakankamai dažnas duomenų rinkimas. Taigi tokiems gaminiams reikalingos antenos, kurios tiktų efektyviam radijo bangų energijos rinkimui.



1.10 pav. Tradicinė LC antenos derinimo grandinė nuo 450 iki 900 MHz dažniams [31]

Daugiajuostės ir plačiajuostės antenos gali būti šio metodo problemos sprendimas, nes komunikacijos signalai yra išdėstyti plačiame dažnio ruože tarp 200 MHz ir 5 GHz. Tokios antenos gali surinkti daugiau energijos iš skirtingų šaltinių ir kanalų, todėl išgauna didesnę galią. Dėl tokio tipo antenų netiesiškumo yra sunku suprojektuoti gerai veikiančią ir efektyviai konvertuojančią radijo bangų energiją anteną. Daugiajuostės antenos dažniausiai turi aukštą energijos konvertavimo efektyvumą, tačiau siauras priimamų dažnių juostas. Dėl šios priežasties tokios antenos yra labiausiai tinkamos naudojant siaurajuosčius signalus, kaip GSM1800, UTMS2100 ar Wi-Fi. Tokioms antenos sunku suprojektuoti derinimo grandinę daugiau nei trims skirtingiems dažniams (žr. 1.10 pav.). RF linijos gali būti skirtingos ir ne visos turės impedanso derinimo grandinę (žr. 1.11 pav.). Dėl šios

priežasties daugiajuosčių antenų energijos konvertavimo efektyvumas krinta priklausomai nuo parinktų dažnio juostų skaičiaus. Atsižvelgiant į tai, reikia gerai įvertinti ar naujos dažnių juostos įnešamas energijos kiekis kompensuos bendrą antenos efektyvumo kritimą. Tačiau šiai problemai spręsti galima panaudoti kitą struktūrą, kuri naudojama [29] straipsnyje. Šiame straipsnyje aprašoma kaip panaudota daugiau antenų ir jų derinimo grandinių skirtų skirtingoms dažnio juostoms. Antenų išlyginti išėjimai tada buvo sujungti į bendrą grandinę ir tokiu būdu sugebėtas pasiekti iki 84 % naudingumo koeficientas. Taigi, galima pastebėti, kad šio tipo antenų projektavimas nėra paprastas ir gali turėti daug skirtingų įgyvendinimo būdų.



1.11 pav. RF grandinės su (a) ir be (b) antenos kompleksinės varžos suderinimo [31]

Plačiajuostes antenas suprojektuoti dar sunkiau dėl lygintuvo grandinės netiesiškumo. Labai sudėtinga išlaikyti aukšto naudingumo koeficiento energijos konvertavimą plačioje dažnių juostoje, todėl vienos pirmųjų tokio tipo antenų pasiekdavo palyginus mažą 20 % efektyvumą. Prie -20 dBm aplinkos radijo bangų energijos lygio šio tipo antenos gali siekti tik apie 10 % [30]. Nepaisant to vis tiek apsimoka išbandyti šio tipo antenas, nes jos gali pagerinti išėjimo galią, kai aplinkos signalų spektras yra labai įvairus.

2. KINETINĖS IR RADIO BANGŲ ENERGIJOS SURINKIMO METODŲ ANALIZĖ

Ankstesniame skyriuje buvo aptartos skirtingos aplinkos energijos rūšys ir atlikta įvairių jos panaudojimo metodų analitinė apžvalga. Analizės metu nuspręsta detaliai tyrimui pasirinkti dvi – kinetinę ir radijo bangų energiją. Toliau analizuosime energijos surinkimo metodus ir jų praktinio įgyvendinimo galimybes. Aptarsime pasirinktų metodų efektyvumą ir kaip galima jį pagerinti.

2.1. Energijos surinkimo būdų iš mechaninių svyravimų palyginimas

Prieš tęsiant darbą su mechaninės energijos naudojimu, buvo įvertinti visi anksčiau aptarti energijos surinkimo metodai. Su elektromagnetiniais generatoriais galima išgauti pakankamą energijos kiekį, tačiau jie turi trūkumų, kurie, lyginant su kitais keitimo metodais, yra kritiniai. Nors EMG yra santykinai paprasti ir nenaudoja sunkiai prieinamų medžiagų, fizinių matmenų atžvilgiu jie užima daug daugiau vietos nei PEG ar ESG.

Kitas jų naudojimą apribojantis trūkumas yra itin maža išėjimo įtampa, beveik niekada neviršijanti 0,1 V [7]. Ją galima padidinti iki reikiamos vertės naudojant įtampos keitiklį, tačiau sistemoje, kurioje kiekvienas μW yra svarbus, tai reikštų papildomus elektrinius nuostolius. Taip pat reikia įvertinti ir tokio įtampos keitiklio projektavimo trukmę ir papildomus kaštus. Dėl šios priežasties buvo atmesti ir elektrostatiniai keitikliai. Jų privalumai ir trūkumai persidengia tiek su PEG, tiek su EMG, bet generuojama galia yra daug mažesnė [5].

Pjezoelektriniai generatoriai neturi kitų dviejų metodų pagrindinių trūkumų. Taip pat, bendruoju atveju juos sudaro tik vienas elementas, o tai reiškia, kad keitiklis bus patvaresnis ir paprastesnis. Taip pat PEG pasižymi aukščiausiu išgaunamos galios tankiu. Šie bruožai lemia efektyvią tokių keitiklių gamybą ir eksploataciją. Galutinio keitiklio technologijos pasirinkimui pagrįsti 2.1 lentelėje apibendrinti iki šiol minėti visi trijų gamybos metodų punktai.

2.1 lentelė. Mechaninės energijos konversijos metodų palyginimas

Konversijos metodas	Privalumai	Trūkumai
Pjezoelektrinis	Aukšta išėjimo įtampa; aukščiausias galios tankis; mažas mechaninis slopinimas; nereikalauja pradinės įtampos; lengvas įtampos lyginimas; labai paprasta struktūra; platesnis panaudojimo atvejų spektras.	Sudėtingas įgyvendinimas itin mažose sistemose; žema išėjimo srovė; didelis išėjimo impedansas.
Elektromagnetinis	Mažas mechaninis slopinimas; nereikalauja pradinės įtampos; labai paprasta struktūra; ilgaamžiškumas; aukšta išėjimo srovė; žemas išėjimo impedansas.	Didelis fizinis dydis; dėl žemos išėjimo įtampos reikalauja įtampos lyginimo grandinės.
Elektrostatinis	Itin tinkamas gaminti masiškai; patogus integravimas į elektroniką; aukšta išėjimo įtampa.	Daug parazitinių talpų; reikalauja išorinės įtampos keitiklio įjungimui; konstrukcija iš prigimties linkusi į savaiminį užsitrumpinimą; žema išėjimo srovė; didelis išėjimo impedansas; reikalauja itin aukšto gamybinio tikslumo.

Taigi įvertinus, kad visais svarbiausiais aspektais pjezoelektriniai aplinkos energijos keitikliai yra pranašesni, nuspręsta toliau analizuoti būtent šį konversijos metodą.

2.2. Pjezoelektrinių keitiklių medžiagos ir konstrukcijos parinkimas

Kadangi pjezoelektrinių generatorių naudingumą iš mechaninės pusės nulemia du pagrindiniai veiksniai – konstrukcija ir medžiaga – šis poskyris išskaidytas į dvi atitinkamas dalis. Kiekvienos dalies tikslas – nustatyti, geriausią variantą tyrimo sėkmės užtikrinimui. Prieš pradedant rinktis konkrečias, tinkamas medžiagas ir konstrukcijas, apsibrėžkime nuostatus, kuriais bus

vadovaujamasi. Kaip minėta ankstesniuose skyriuose, šis tyrimas yra orientuotas ne tik į išgaunamą energijos kiekį, bet ir į technologijos pritaikomumą masinei gamybai. Tai reiškia, kad atkreipsime dėmesį į tai, ar svarstomas pasirinkimas turi (ar gali turėti) užtikrintą tiekimo grandinę, komercinei veiklai tinkančią kainą, galimybę būti nesunkiai apdirbtas, paruoštas naudojimui ir pan. Kitaip tariant, šiame darbe siekiama sukurti galimybę, visas tyrimo išvadas ir rezultatus, su nedideliais patobulinimais perkelti komerciškai patrauklią veiklą.

Išsamiau panagrinėjus su PEG medžiagomis susijusią literatūrą akcentuojami du variantai – PZT ir PVDF. To priežastis yra optimaliausias santykis tarp pjezoelektrinių parametrų ir gamybinių procesų sudėtingumo. Šį teiginį galima patvirtinti patikrinus pjezoelektrinių medžiagų gamintojų katalogus (pavyzdžiui, „Mide Technology“, „Omega Piezo Technologies“, „APC International“). Dauguma rinkoje siūlomų produktų chemiškai labai artimi PZT ar PVDF.

Mokslinėje literatūroje, dažniausiai minima medžiaga yra PZT. Tai yra pati populiariausia pasaulyje pjezoelektrinė medžiaga, kuri pasižymi standumu, cheminiu bei temperatūriniu stabilumu, pakankamai nesudėtinga gamyba ir apdirbimu [39]. PZT naudojamas nuo žiebtuvėlių ir garsiakalbių iki mikronų eilės tikslumo pozicionavimo sistemų. Vienas iš PZT trūkumų, ribojančių jo panaudojimo sferą, yra standumas. Taip yra todėl, nes konstrukcijos standumas tiesiogiai koreliuoja su jos trapumu. PEG metodas yra pagrįstas pertekliniu pjezoelektrinės konstrukcijos išbalansavimu ir jos svyravimų sukėlimu, dėl to trapios medžiagos gali sukelti problemų. Visų pirma, aukštam keitiklio efektyvumui labai daug įtakos turi svyravimų amplitudės ir dažnio didinimas. Antra, standžiuose dariniuose blogai pasiskirsto mechaninės apkrovos, kas lemia dar spartesnę konstrukciją silpninančių įtrūkimų atsiradimą. Šie du trūkumai yra itin ryškūs pjezokeraminėse medžiagose, tarp kurių yra ir PZT [40]. Kitą vertus, keitikliai gali veikti ir žemesniuose dažniuose, kur svyravimų amplitudės ir pagreičiai nedideli. Čia svarbią rolę atlieka PEG konstrukcija, nuo kurios priklauso naudingumo koeficientas, PZT sluoksnių atsparumas ir ilgaamžiškumas. Taip pat, ši medžiaga turi kelias skirtingas atmainas, kas leidžia išsirinkti tinkamiausią variantą konkrečiam panaudojimo atvejui, taip sumažinant minėtų PZT trūkumų įtaką.

Kalbant apie PVDF, reikia pradėti nuo esminio skirtumo, lyginant su PZT – lankstumo. PVDF nėra keraminė medžiaga, dėl to ji nėra trapi ir jos atsparumas deformacijoms yra žymiai didesnis. Taip pat, PVDF tankis yra net 4 kartus mažesnis nei PZT, dėl to ši medžiaga itin tinkama mažo svorio reikalaujančiuose projektuose [50]. Nepaisant to, ši medžiaga dažniausiai nėra pirmasis pasirinkimas generatoriui, nes jos pjezoelektrinės savybės prastos. Pagrindinis platų naudojimą ribojantis parametras yra elektromechaninis sukabinimas (angl. *Electromechanical coupling*), kuris,

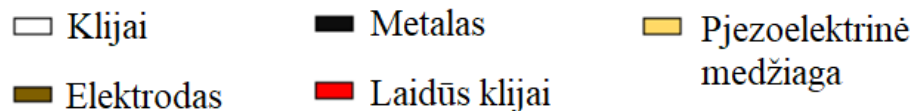
lyginant su PZT, yra 2,5 karto mažesnis [54]. Praktiškai tai reiškia, kad vienoda jėga paveikus PVDF plėvelę gautume 2,5 karto mažesnę elektros energijos kiekį nei PZT. Kitą vertus, lankstumas ir tvirtumas reiškia itin lengvą apdirbimą, sudėtingų formų išgavimą, naudojimą ant žmogaus kūno ir nešiojamuose projektuose (pavyzdžiui, PVDF integravimas į batų padą [51] ar kuprinę [52]).

Kaip buvo minėta literatūros apžvalgoje, pati populiariausia PEG konstrukcija yra svirtis. Vienas iš pagrindinių tokios konstrukcijos privalumų yra žemas rezonansinis dažnis. Tai yra itin svarbu, nes didelis kiekis vibracijų šaltinių aplinkoje yra žemo dažnio (žr. 2.2 lentelę). Praktiškai pati paprasčiausia svirtis įgyvendinama sujungiant aktyvųjį pjezoelektrinės medžiagos sluoksnį su neaktyviuoju laidininko sluoksniu. Norint išgauti didesnę naudingumą, dažnai aktyvusis sluoksnis pritvirtinamas abejose laidininko pusėse. Tai leidžia padvigubinti galią išėjime, beveik nepadidinant generatoriaus tūrio. Galima naudoti daugiau sluoksnių, tai priklauso nuo tikslo ir panaudojimo atvejo.

2.2 lentelė. Mechaninės energijos konversijos metodų palyginimas [46, 47, 48].

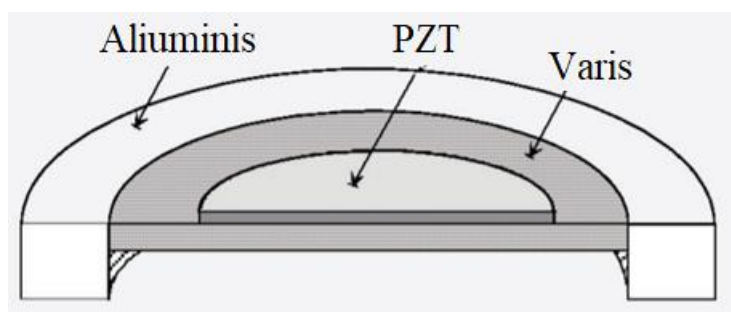
Šaltinis	Dažnis, Hz	Pagreitis, m/s ²
Automobilio panelė	13	3
Automobilio variklio skyrius	200	12
Virtuvinis plaktuvas	121	6,4
Drabužių džiovyklė	121	3,5
Oro kondicionavimo ortakiai	60	0,2–1,5
Šaldytuvas	240	0,1
Žmogaus eisena	2–3	2–3
Pravažiuojantis automobilis	1–35	–

Praktiškai eksperimentams įprasta naudoti dviejų sluoksnių keitiklius, dėl santykinai didelės generuojamos galios ir paprastos konstrukcijos. Dažniausiai naudojama dviejų sluoksnių svirties sandara pavaizduota 2.1 pav. Kalbant apie svirties konstrukciją, reikia paminėti, kad dar viena svarbi PEG dalis yra papildoma masė ant laisvai svyruojančio galiuko. Ji leidžia koreguoti keitiklio rezonansinį dažnį ir išgauti maksimalią galią. Svirties konstrukcijos generatoriaus galia išėjime yra proporcinga šiai masei [50].



2.1 pav. Dviejų sluoksnių PEG sandara [49]

Dar viena didelį efektyvumą turinti konstrukcija yra diafragma. Tipinė diafragmos PEG sandara pavaizduota 2.2 pav. Bendruoju atveju tai yra apvali pjezoelektrinė membrana, kurios visas kontūras tolygiai įtvirtintas. Pati membrana susideda iš dviejų pagrindinių dalių – aktyviosios (pjezoelektrinės), skirtos energijos keitimui, ir pasyvosios (šerdies), skirtos visos membranos lenkimo momentui didinti [41]. Dažniausiai pastaroji yra storas, sunkaus metalo (pavyzdžiui, vario) sluoksnis.



2.2 pav. Tipinė diafragmos PEG sandara [41]

Vienas iš sėkmingiausių tyrimų su diafragmos konstrukcijos PEG aprašytas 2005 m. M. Ericka'os, D. Vasik'o ir F. Costa'os 2005 [41]. Šiame tyrime panaudota anksčiau aptarta tipinė struktūra su stora vario šerdimi (0,4 mm storio) ir aktyviu P–7 PZT sluoksniu (0,23 mm storio). Priklausomai nuo pagreičio ir apkrovos varžos, buvo išmatuota galia viršijanti 3 mW. Nors prie silpnėsio pagreičio (1–2 G) išėjimo galia buvo mažesnė – 0,5–2 mW, tai vis dar yra pakankamas energijos kiekis WSN maitinimui.

Svirts ir diafragma yra dažniausiai naudojamos, tačiau ne vienintelės PEG konstrukcijos. Kitos konstrukcijos nebus nagrinėjamos, nes preliminarios analizės metu nustatyta, kad jų gamyba yra sudėtingesnė ir šio tyrimo sąlygomis sunkiai įgyvendinama. Taip pat, daugelis likusių konstrukcijų dėl išgaunamos galios, aukoja paprastumą, kainą ir patvarumą, kas prieštarauja šio

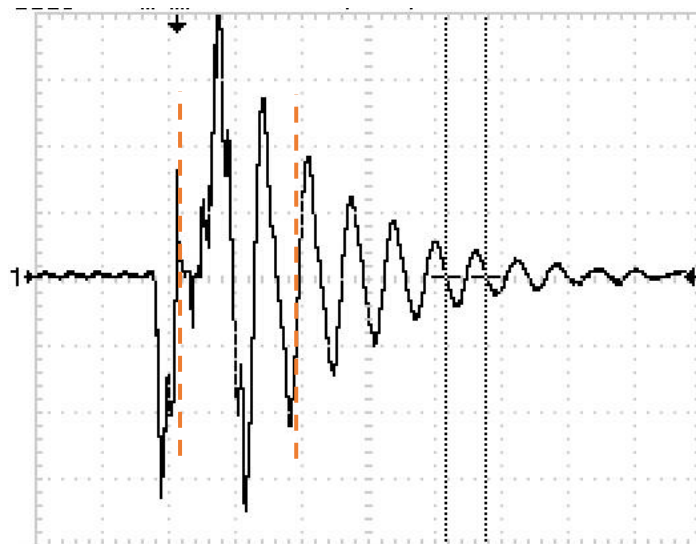
tyrimo tikslui. Lyginant diafragmą ir svirtį tarpusavyje, nuspręsta pasirinkti svirtį dėl lengvesnės prototipo gamybos.

2.3. Pjezoelektrinių keitiklių efektyvios dažnių juostos derinimas

Pjezoelektrinių generatorių, kaip ir kitų mechaninės energijos konversijos būdų, esmė yra rezonanso reiškinių naudojimas. Beveik visa naudinga energija gaunama tik labai siaurame dažnių ruože, kuriame keitiklis rezonuoja su aplinkoje vyraujančiais virpesiais. Dėl to labai svarbi eksperimentų ir PEG eksploatavimo dalis yra pasiruošimas ir derinimas.

2.3.1 Keitiklių rezonansinio dažnio nustatymas ir derinimas

Lengviausias būdas surasti PEG rezonansinį dažnį yra keitiklį tiesiogiai prisijungti prie oscilografo ir, lengvai užgavus galiuką, stebėti kokio dažnio yra nusistovėjusi banga (žr. 2.3 pav.). Šią reakciją galima skaidyti į tris dalis (2.3 pav. atskirtos punktyrine linija). Pirmiausia, grafiko kairėje dalyje, matomas pradinis pusperiodis, kai keitiklis yra nulenktas žemyn, bet dar neatleistas. Tada, staigiai patraukus pirštą, atsiranda aukštos amplitudės šuolis, kurio trukmė ir dydis priklauso nuo nulenkimo. Trečioji grafiko dalis yra nusistovėjusio dažnio slopstantis svyravimas, pagal kurį galima nustatyti rezonansinį keitiklio dažnį. Norint nustatyti aplinkoje vyraujančių vibracijų dažnį, proceso esmė išlieka tokia pati, tik keitiklis yra savaime sužadinamas aplinkos.



2.3 pav. PEG įtampa išėjime jį lengvai suvirpinus pirštu

Nustačius keitiklio ir aplinkos dažnius, kitas generatoriaus paruošimo darbui etapas – jo derinimas, t. y. jo rezonansinio dažnio keitimas, kad atitiktų aplinkoje vyraujančius dažnius. Tai yra atliekama dviem būdais: pjezoelektrinės plokštelės įtvirtinimo vietos keitimas ir masės ant galiuko

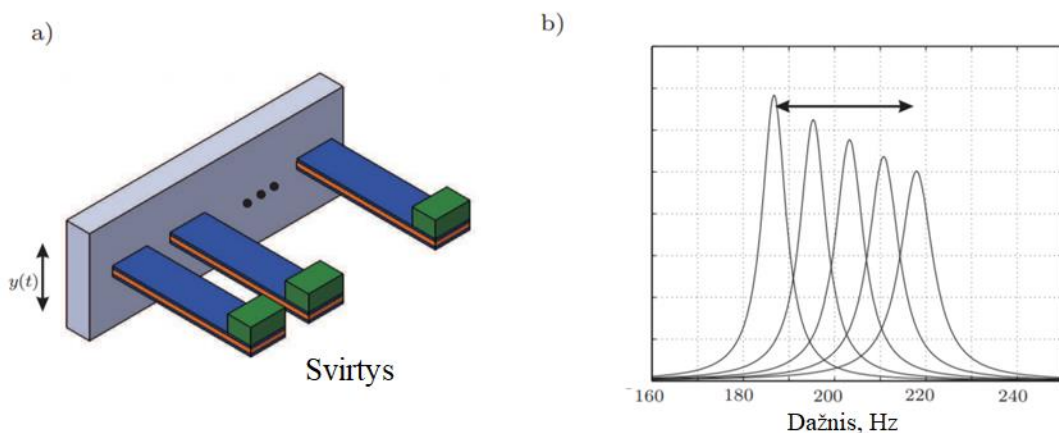
pridėjimas. Pirmąjį derinimo būdą galima įsivaizduoti kaip ant stalo krašto padėtą liniuotę – kuo liniuotė labiau išlindus už krašto, tuo žemesnio tono garsas girdimas ją užgavus.

2.3.2. Dažnių juostos platinimas

Mechaninės energijos keitiklių efektyvumas eksponentiškai didėja artėjant link jų rezonansinio dažnio. Šis šuolis yra toks staigus, kad kartais PEG neapsimoka eksploatuoti, jei aplinkoje nėra generatoriaus rezonansiniam dažniui artimų virpesių. Dėl šios priežasties atlikta daug tyrimų, susijusių su efektyvių dažnių juostos platinimu. Dažnių diapazono didinimo būdai skaidomi į du tipus [42]:

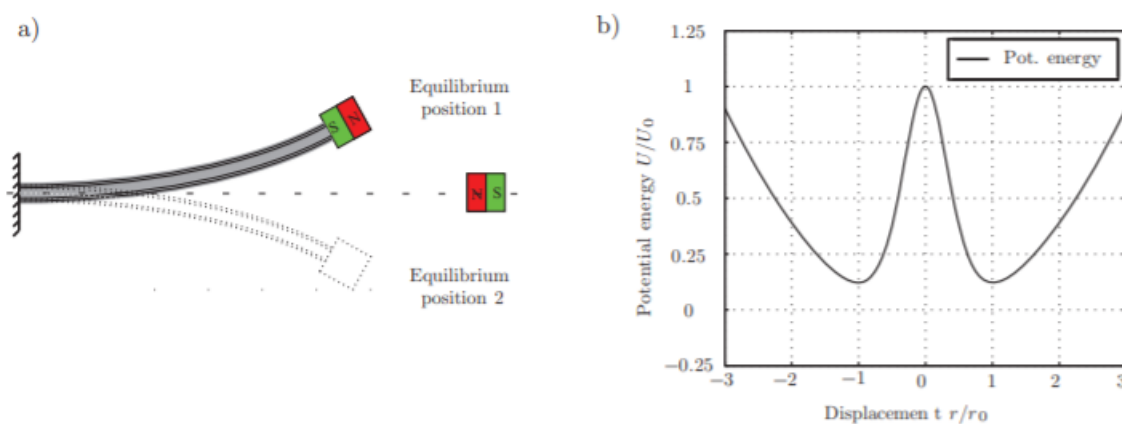
- Tiesinis – kai jungiami keli atskiri generatoriai į vieną bendrą sistemą;
- Netiesinis – naudojamas vienas generatorius, turintis platų efektyvių dažnių ruožą.

Pirmasis būdas yra paprastesnis ir, jei keitiklio išmatavimai neribojami, efektyvesnis. Jis įgyvendinamas tą pačią konstrukciją atkartojant kelis kartus, kiek vieną kartą šiek tiek pakeičiant geometriją, siekiant paslinkti rezonansinio dažnio tašką. 2.4 a) pav. pavaizduota tipinė tokio generatorių masyvo vizualizacija, o 2.4 b) pav. norima efektyvių dažnių juosta. Kadangi svirtis iš prigimties yra labai paprasta konstrukcija, ją yra lengva įdėti ir išimti iš tiesinio generatorių masyvo. Tokiu būdu galima greitai suderinti norimą dažnių juostą. Kitą vertus, tokius generatorius apribotų galimi fiziniai išmatavimai, nes kiekvienam papildomam rezonansiniam dažniui pridėti reikia daugiau vietos. Be to, kiek vienam šio masyvo elementui reikėtų atskiros energijos surinkimo ir valdymo grandinės, nes ji turi būti suderinta su atitinkamu rezonansiniu dažniu [42].



2.4 pav. Kelių skirtingų rezonansinių dažnių generatorių jungimo į bendrą sistemą konstrukcija (a) ir dažnių juosta (b) [42]

Didėjančių fizinių parametrų problemą, išlaikant platesnę dažnių juostą, išspręsti galima netiesiniais metodais. Pavyzdžiui, naudojant bistabilius (angl. *bistable*) arba multistabilius (angl. *multistable*) generatorius. Patogiausias būdas paaiškinti tokių generatorių veikimo principą, yra svirties konstrukcija (žr. 2.5 a) pav.). Neįtvirtintame svirties gale pritaisius magnetą, o lygiagrečiai rimties pozicijai kitą magnetą, gaunamos dvi lygybės (angl. *equilibrium*) pozicijos, kuriose svirties potencinė energija yra lygi jos kinetinei energijai [42]. Kitaip tariant, pradinėje pozicijoje masę svirties gale magnetai stumia į kraštus, o svyravimo kryptis priklauso nuo išorinių vibracijų. Tokios konstrukcijos potencinės energijos pasiskirstymas pagal deformaciją pateiktas 2.5 b) pav. Dėl magnetų sukurto netiesiškumo sistema veikia žymiai platesniame dažnių ruože.

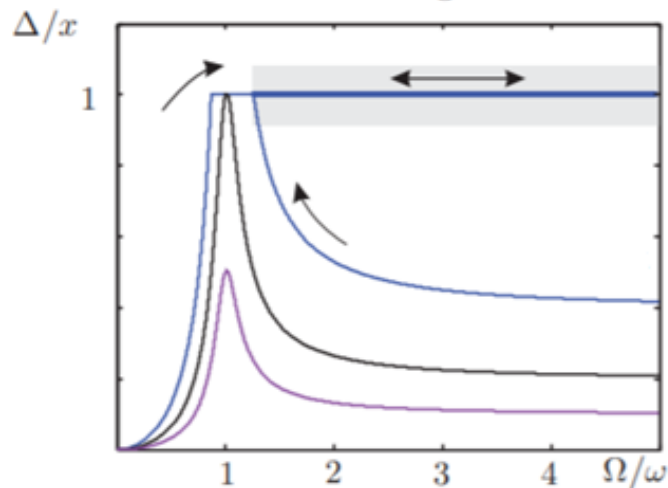


2.5 pav. Bistabilios sistemos konstrukcija (a) ir veikimo principas (b) [42]

Multistabilių sistemų veikimo principas yra toks pats, tačiau jos turi daugiau lygybės būsenų. Visos kelių stabilų būsenų sistemos pasižymi aukštu efektyvumu ir pakankamai plačiu dažnių ruožu, o visa tai pasiekama nedaug padidinus keitiklio matmenis. Vieninteli tokių generatorių panaudojimą apribojantys veiksniai yra sudėtingas projektavimas ir papildomi kaštai. Netiesines sistemas yra sunku simuliuoti ar apskaičiuoti, nes tam reikia žinoti naudojamų medžiagų parametrus bet kuriame veikimo taške. Kitaip tariant nepakanka žinoti sistemos elgsenos dviejuose taškuose (kaip tiesinėse sistemose) ir iš to apskaičiuoti visus likusius taškus. Su šia problema susiduriama visose inžinerinėse disciplinose.

Kitas netiesinis būdas platinti sistemos dažnių juostą yra amplitudės ribojimas. Naudojant tokį metodą sistemoje yra fiziškai nustatytos ribos kiek gali svyruoti keitiklis. Prie žemų dažnių sistema elgiasi taip pat, kaip bet kuris tiesinis generatorius [43]. Svyravimų amplitudė nedidelė, todėl apribota erdvė sistemos veikimui įtakos neturi. Didėjant dažniui, tam tikru laiko momentu bus pasiekta riba, kai švytavimų amplitudė taps pakankamai didelė ir keitiklio galiukas pradės atsimušinėti į stabdžius. Toliau didėjant dažniui, amplitudė išliks nustatytose ribose ir čia išliks stabili

iki tam tikros ribos, kol atsiras disbalansas [44]. Tokiu būdu tiesinė sistema visada prirakinta prie savo rezonansinio dažnio (žr. 2.6 pav.). Šio dažnių juostos derinimo metodo esminis privalumas yra patikimumas – neatsiranda naujų judančių ar brangių dalių. Taip pat, projektavimas yra nesudėtingas. Kitą vertus, tokios sistemos dažnai susiduria su nestabilumo problemomis. Norint pasiekti balanso būseną reikia lėtai kelti dažnį iki rezonansinio ir negali būti staigių šuolių žemyn, nes sistema išsibalansuos.



2.6 pav. Svyravimų amplitudės priklausomybė nuo dažnio [42]

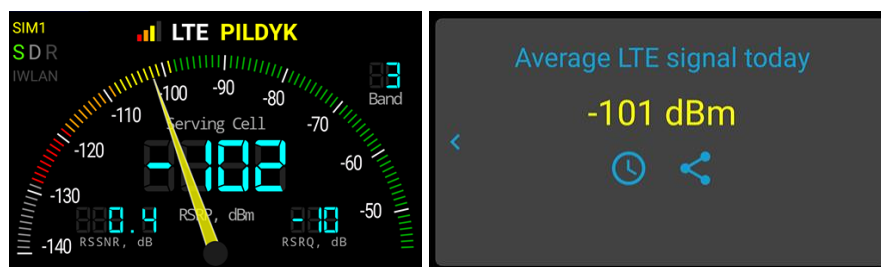
Dažniausiai aplinkoje, kurioje diegiamas energijos keitiklis ar jį naudojantis prietaisas, turės daug skirtingų dažnių virpesių, kurie laikui bėgant gali kisti. Dėl to projektuojant sistemą reikia įvertinti bet kokiame dažnyje veikiančios (savaime prisiderinančios) sistemos galimybes. Literatūroje aprašyti du autonominio sistemos derinimo būdai – masės ar standumo keitimas ir elektrinių parametrų keitimas. Praktinis pastarojo metodo realizavimas yra svirtis, prie kurios pritvirtinti du magnetai iš abiejų svarmens pusių [45]. Dar du magnetai pritvirtinti prie PEG laikiklio. Atstumas tarp pastarųjų dviejų magnetų yra reguliuojamas, o nuo jo priklauso kaip svirtis sąveikaus su jos laikikliu. Analizuojant tokią sistemą nustatyta, kad pats derinimas naudotų daug energijos, nes tai būtų aktyviai veikianti posistemė. Be to, tokio derintuvo konstrukcija yra sudėtinga, reikalauja papildomo projektavimo laiko ir mažina patvarumą.

Įvertinus įvairius dažnių juostos plėtimo metodus ir siekiant užtikrinti matavimų stabilumą pasirinkta eksperimentiniams tyrimams nei vieno iš jų nenaudoti dėl dviejų priežasčių. Pirmiausia, visi aptarti būdai didina keitiklio dydį, o tai mažiems WSN įrenginiams nėra tinkama. Antroji priežastis yra sudėtingas tokių keitiklių prototipų paruošimas.

2.4. Radijo bangų galios lygių analizė

Istoriškai, radijo bangų detektoriai buvo skirti įvairių tipų užkoduotai informacijai, perduodamai radijo bangomis atviroje erdvėje, nuskaityti, tačiau praktiškai visos detektorinės grandinės atlieka vieną funkciją – keičia elektromagnetinių bangų energiją į paprasčiau valdomą elektrinį signalą. Yra daug skirtingų šios technologijos pritaikymų, tačiau šiame darbe susikoncentruosim ties nedidelių elektromagnetinės energijos kiekių konvertavimu į elektrinę energiją. Tai nėra labai įprastas elektromagnetinių bangų panaudojimas, bet sparčiai besiplečiant mažo suvartojimo procesorių technologijoms, atsiranda galimybė šio tipo sistemas maitinti būtent komunikacijai naudojamų elektromagnetinių bangų energija.

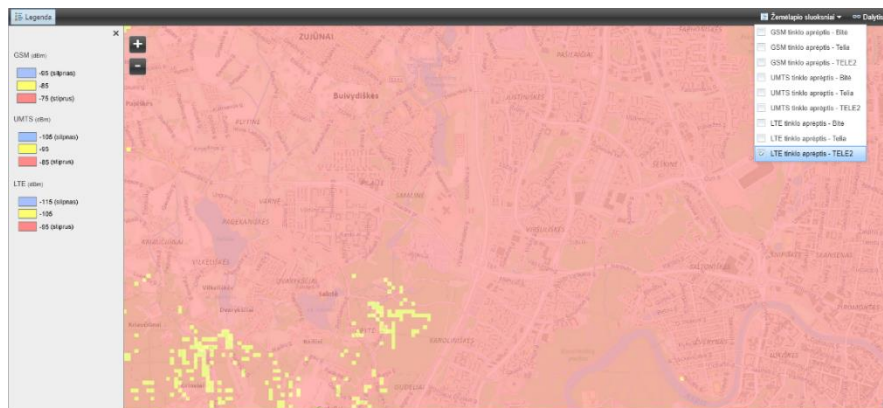
Pagrindinė išsikeltos užduoties problema yra tai, kad komunikacijai naudojamų radijo bangų lygiai paprastai yra labai žemi, o šių bangų konvertavimas į elektrinę energiją dažniausiai įneša labai didelius nuostolius ir išgaunama energija yra dar mažesnė. Todėl efektyvus šios energijos surinkimas reikalauja labai jautrios virpesių lygintuvo grandinės, kuri veiktų kuo platesniame elektromagnetinių bangų energijos lygių ruože ir idealiau atveju taip pat apimtų kuo platesnį dažnių ruožą. Kaip pavyzdį galima panagrinėti namų sąlygomis priimamo LTE signalo lygį (žr. 2.7 pav.). Tam panaudotos kelios skirtingos signalo lygio nustatymo aplikacijos, kad rezultatus būtų galima palyginti. Taip pat reikia paminėti, kad matavimai atlikti paprastu mobiliuoju telefonu ir nėra tikslaus signalo lygių matavimo pavyzdys, bet labai gerai atvaizduoja realiomis sąlygomis gaunamus signalo lygius. Matuotas operatoriaus „Tele2“ LTE ryšio signalo lygis.



2.7 pav. „Tele2“ LTE signalo lygis išmatuotas atsitiktinėmis namų sąlygomis

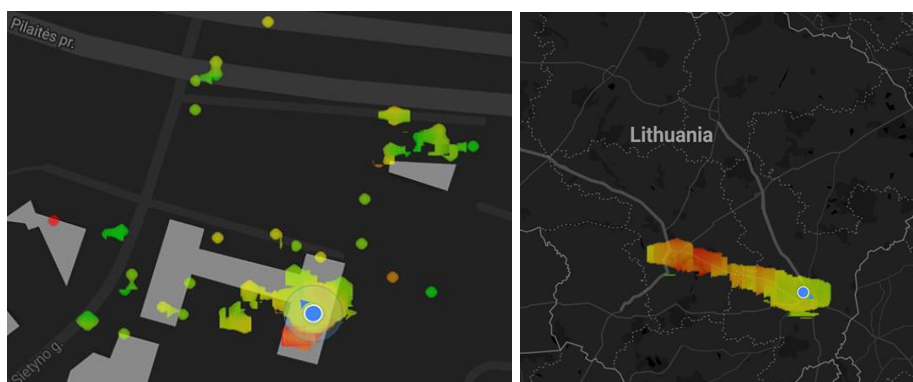
Matome, kad uždaroje patalpose LTE signalo lygis vidutiniškai yra -102dBm arba 63fW. Tokio lygio energijos kiekiai maitinimui yra praktiškai nepanaudojami, bet komunikacijai tinkami. Taip pat matuodami pastebime, kad šis lygis labai priklauso nuo aplinkos, nes išėjus į balkoną jau galima išmatuoti apie -86 dBm arba 2500 fW signalą. Panašius lygius patvirtina ir judriojo ryšio tinklų tikėtinos aprėpties žemėlapis (žr. 2.8 pav.), kurį pateikia Lietuvos ryšių reguliavimo tarnyba [32]. Pasak žemėlapio, šioje vietovėje turi būti stiprus signalo lygis (stipriu LTE signalu laikomas

signalas nuo -95 dBm). Šie signalo lygiai priklauso nuo operatoriaus ryšio bokštų atstumo iki ryšio gavėjo, todėl matome, kad miškingose ir mažiau gyvenamose teritorijose numatomi žemesni signalo lygiai.



2.8 pav. „Tele2“ LTE tikėtino signalo lygio Karolinskėse žemėlapis [32]

Mobili aplikacija taip pat leidžia patiems susidaryti realų panašaus tipo žemėlapi (žr. 2.9 pav.). Iš gautų duomenų vaikščiojant aplink gyvenamąją zoną matome, kad signalas stipresnis atvirose teritorijose. Taip yra nes (kaip matome iš aplikacijoje pateikiamų duomenų 2.7 paveikslėlyje), LTE ryšiui naudojama B3 dažnių juosta, o ji operuoja 1710–1880 Mhz dažnių ribose. Tai yra santykinai aukšti dažniai, kuriais perduodamų bangų ilgis yra apie 17 cm, todėl tokios bangos jautriau reaguoja į dideles kliūtis kaip gyvenamieji pastatai. Taip pat atlikus važiavimą tarp Vilniaus ir Kauno matome, kad patvirtinama teorija, kad mažiau apgyvendintose vietovėse signalo lygis silpnesnis.

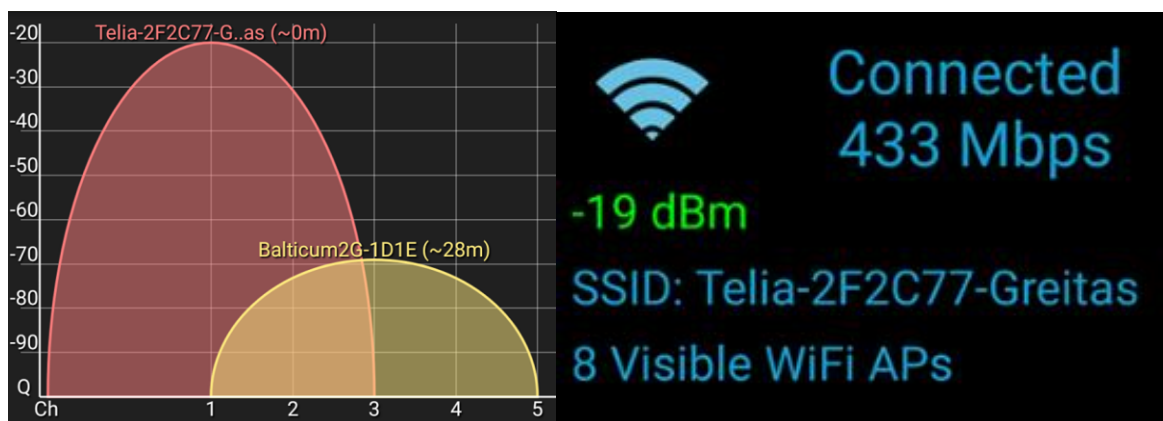


2.9 pav. „Tele2“ LTE signalo lygio praktinių matavimų rezultatai

Operatorius „Tele2“ Lietuvoje taip pat teikia LTE ryšio paslaugas B7 ir B20 dažnių juostomis, tačiau B3 juosta dažniausiai naudojama. Sprendžiant iš visų gautų rezultatų, matome, kad

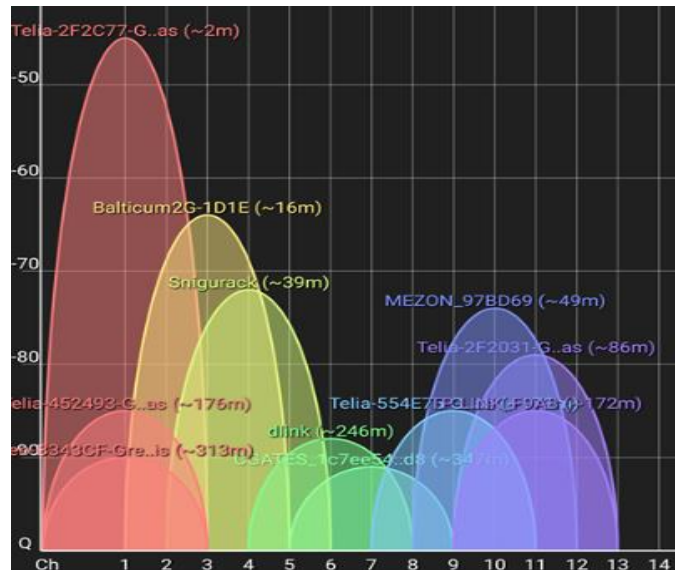
LTE ryšio šiuo atveju energijos išgavimui nepritaikysime, tačiau tai leido geriau suprasti kokiuose mažuose elektromagnetinių bangų lygiuose veikia komunikacijos sistemos [33].

Kita plačiai komunikacijai ir internetui naudojama belaidė technologija yra Wi-Fi. Panašiais metodais galime išmatuoti ir Wi-Fi elektromagnetinių bangų pernešamus energijos lygius. Reikia paminėti, kad Wi-Fi veikia 2,4 ir 5 GHz dažnio juostose, tačiau iš atliktų matavimų matyti, kad abiejų juostų pernešami energijos kiekiai labai panašūs, todėl toliau nagrinėsime tik 2,4 GHz dažnio juostą. Matavimai taip pat atlikti mobiliuoju telefonu, keičiant telefono atstumą nuo modemo. Pridėjus telefono anteną apie 20 cm nuo modemo atstumu, matome, kad Wi-Fi signalo pernešamos energijos lygis siekia apie -20 dBm arba 10 μ W (žr. 2.10 pav.). Tai jau yra potencialiai pakankami galios lygiai šiuolaikinių, BLE technologiją taikančių, mikroprocesorių maitinimui realizuoti. Tačiau reikia nepamiršti, kad erdvėje elektromagnetinių bangų energija dėl natūralios sklaidos tolstant nuo šaltinio greitai slopsta, todėl matavimus atlikome ir didesniais atstumais nuo modemo.



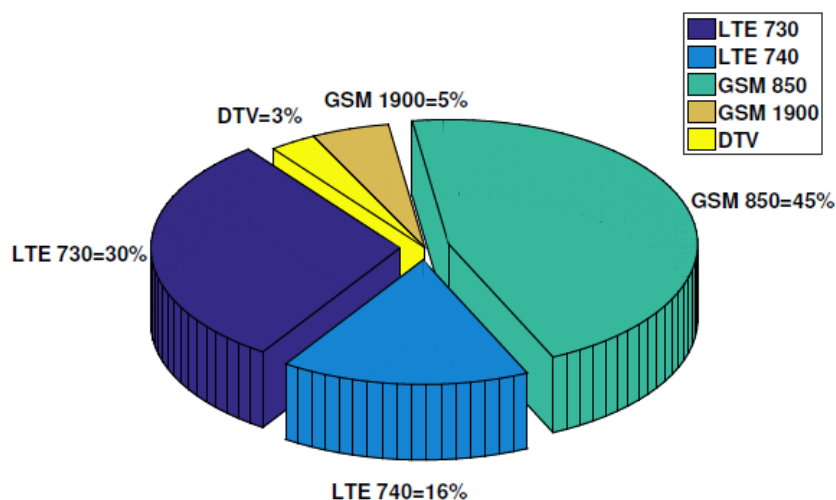
2.10 pav. Wi-Fi galios matavimų namų sąlygomis rezultatai (20 cm nuo modemo)

Atlikus matavimus vieno metro atstumu, rezultatai iš karto nukrito iki maždaug -35 dBm arba 0,3 μ W lygio. Ties dviem metrais lygis jau tesiekė -45 dBm, o 4 metrų atstumu liko tik -55 dBm. Taigi vidutinis Wi-Fi lygis patalpose su modemu yra apie -40 dBm arba 0,1 μ W. Tai jau sunkiai maitinimui pritaikomas galios lygis. Taip pat reikia nepamiršti, kad Wi-Fi modemas siunčia ir gauna duomenis paketais, todėl energijos lygiai nėra pastovūs ir nuolat pulsuoja. Be to konvertuojant tokio lygio energiją atsirastų dideli galios nuostoliai grandinėje ir būtų sukaupiama dar mažiau energijos. Nepaisant didelio kiekio matomų Wi-Fi modemų gyvenamajame pastate (žr. 2.11 pav.), dėl didelio atstumo nuo šaltinių, jų spinduliuojamos galios lygiai pasidaro nereikšmingi siekiamam pritaikymui įgyvendinti.



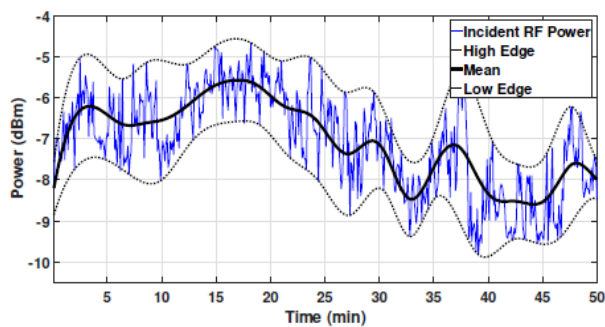
2.11 pav. Wi-Fi galios matavimų namų sąlygomis rezultatai (laipinėje)

Kadangi telefonu viso radijo dažnių spektro išmatuoti negalime, pasinaudosime [20] straipsnyje atliktų matavimų rezultatais. Straipsnyje teigiama, kad po atliktų matavimų 0,3–3 GHz radijo dažnių ruože matyti, kad nėra vienos dažnių juostos, kuri perduotų didžiausią galios tankį visame mieste, dėl to geram tokios sistemos dizainui yra būtinas operavimo dažnių plačiajuostiškumas. Taip pat autoriai teigia, kad labai svarbu identifikuoti daugiausiai energijos turinčias dažnių juostas, todėl atliko matavimus įvairiose vietose Bostono mieste (JAV). Matavimai buvo atlikti GSM850, GSM1900, LTE730, LTE740 ir DTV dažnių juostose (žr. 2.12 pav.). Gauti rezultatai parodė, kad didžiąją dalį energijos Bostono metro stotyje perneša GSM850 dažnių juosta (apie 45 % visos energijos), o kartu su LTE700 šios dažnių juostos iš viso perneša iki 92 % visos dažnių ruožo energijos.

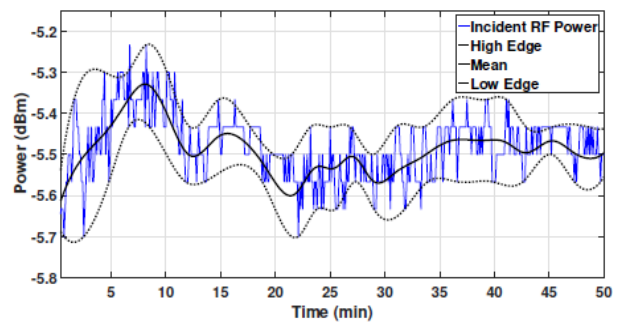


2.12 pav. Bostono metro stotyje radijo dažnių pernešamos energijos kiekio pasiskirstymas [20]

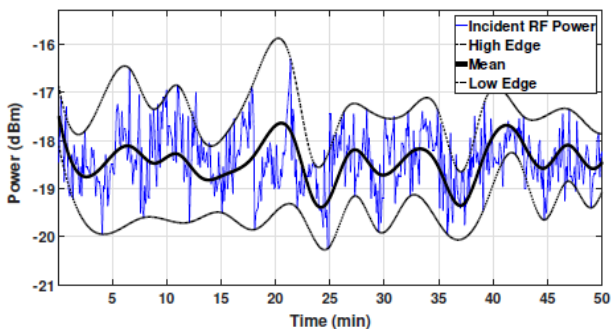
Vertinant šiuos rezultatus reikia suprasti, kad situacija labai priklausys nuo naudojamų ryšio technologijų paplitimo šalyje ir Lietuvoje analogiško matavimo rezultatai gali būti visiškai kitokie. Nepaisant to, matome, kad projektuodami radijo bangų detektoriaus grandinę turėsime ją pritaikyti darbui skirtinguose dažnių juostose ir galimai naudoti kelių tipų antenas. Po gautų rezultatų straipsnio autoriai nusprendė išbandyti dviejų galingiausių dažnio juostų (GSM850 ir LTE730) lygius skirtingose miesto vietovėse (žr. 2.13 pav.). Gauti rezultatai parodė, kad (kaip ir minėjome anksčiau) vidutinis radijo bangų galios lygis labai priklauso nuo aplinkos ir atstumo iki radijo ryšio stočių.



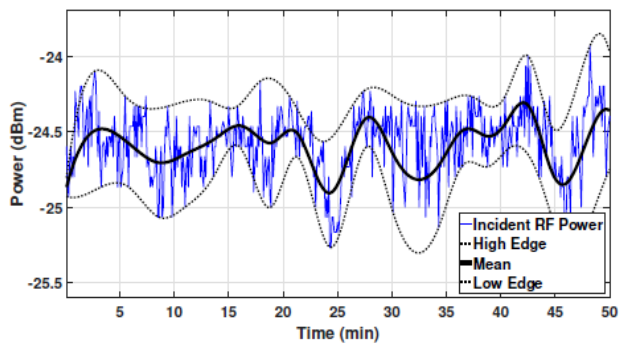
(a) MFA-2



(b) Boston Common-2



(c) Prudential-1



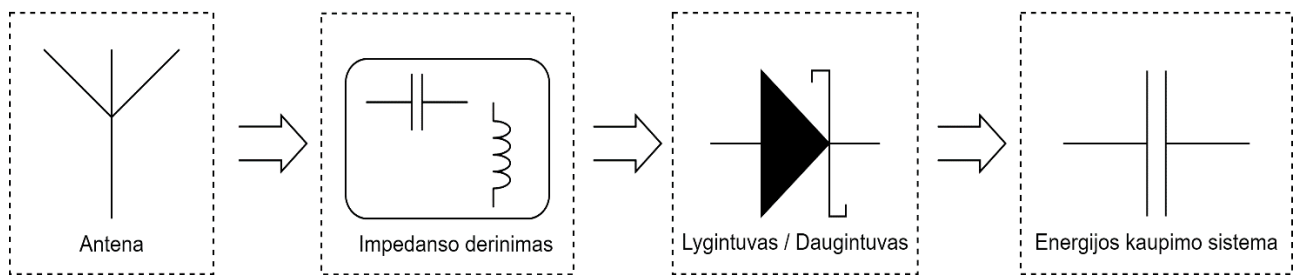
(d) Arlington-2

2.13 pav. Bostono miesto skirtingų vietovių radijo bangų galios lygiai [20]

Iš rezultatų taip pat matome, kad žemesnių dažnių radijo bangų ruožai (bent jau Bostone) turi didesnę pernešamos galios tankį, todėl projektuojant sistemą būtinai reikės apimti šiuos dažnius. Apibendrinus visus matavimus galime teigti, kad ši radijo bangų detektoriaus sistema, turės kuo efektyviau veikti galios ruože nuo -30 dBm iki 10 dBm ir turės daugiajuostį dizainą, kuris leis surinkti energiją tiek iš žemesnių (700–950 MHz), tiek iš aukštesnių (1500–2450 MHz ir 5 GHz) dažnių juostų. Norint gauti gerą antenos efektyvumą žemuose dažniuose, teks naudoti didesnių matmenų antenas. Dėl mažų galios lygių, sistema turės efektyviai veikti prie žemų įtampų ir įgyvendinti įtampos dauginimo funkciją, naudojant tokias grandines kaip Diksono įtampos daugintuvas.

2.5. Radijo bangų detektoriaus grandinė

Kaip jau minėjome, radijo bangų detektorių tipinė paskirtis yra informacijos, perduodamos elektromagnetinėmis bangomis, apdorojimas ir nuskaitymas, tačiau šiame darbe nagrinėjame energijos iš radijo bangų spektro panaudojimo galimybę. Detektoriaus sistema turės šias struktūrines dalis: anteną, impedanso derinimo grandinę, įtampos lygintuvo bei daugintuvo grandinę ir energijos kaupimo sistemą (žr. 2.14 pav.).



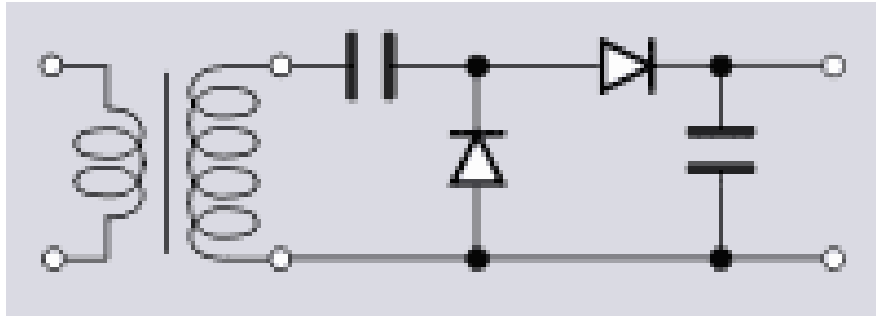
2.14 pav. Radijo bangų detektoriaus, pritaikyto energijos kaupimui, struktūra

Detaliau nagrinėsime įtampos lyginimo, dauginimo grandines ir energijos kaupimo sistemas, nes šio darbo tikslas nesusijęs su inovacijomis antenų teorijoje. RF detektorių efektyvumas labiausiai priklauso nuo fizinių elementų, tokių kaip PCB medžiagos, gamintojo naudojamos technologijos ruošiant plokštes ir paklaidų, atsirandančių šių procesų metu. Todėl impedanso derinimo grandinė bus parenkama praktinių matavimų būdu, matuojant sistemos S_{11} parametrus ir stebint Smito diagramas.

Kuriant tokio tipo detektorines sistemas dažniausiai grandinių perdavimo efektyvumas yra pagrindinis parametras, kuris lemia funkcionalumą. Pagrindinės problemos su kuriomis susiduriama yra: antenų dydžio ir signalo perdavimo koeficiento santykis (norint sukurti kuo mobilėnę sistemą, siekiama mažesnių matmenų, o nuo to dažnai kenčia antenos efektyvumas), linijos impedanso su antena derinimas (dažniausiai siekiama 50 omų linijos impedanso), daugintuvo perdavimo naudingumo koeficientas ir norimi išėjimo srovės bei įtampos dydžiai (priklauso nuo daugintuvo lygmenų skaičiaus). Visos šios problemos turės būti sprendžiamos skirtinguose sistemos projektavimo etapuose.

Grandinė, kuria paremta šio įtampos daugintuvo dalis, buvo pirmą kartą pasiūlyta 1919 metais šveicarų fiziko Henricho Greinacherio (žr. 2.15 pav.). Tai paprastas įtampos daugintuvas, sudarytas iš kondensatorių ir diodų, kuris paverčia kintamą srovę įėjime padidintos įtampos nuolatine srove grandinės išėjime. Iš šios grandinės vėliau gimė Kokrofto-Voltono (angl. *Cockcroft-Walton*) ir Diksono įtampos daugintuvai. Pasak [34], tiek Kokrofto-Voltono tiek Diksono topologijų grandinės

funkcionalumo atžvilgiu praktiškai nesiskiria. Taigi savo įtampos daugintuvo dizainui renkamės Diksono topologijos grandinę.

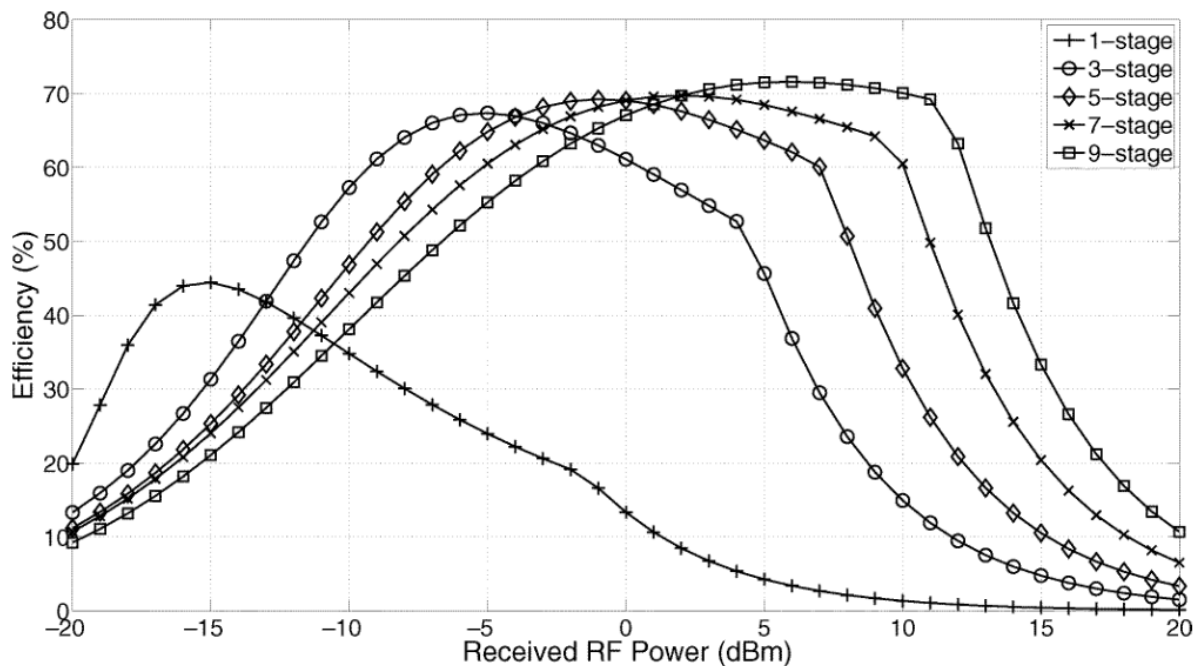


2.15 pav. Henricho Greinacherio įtampos dvigubavimo schema [35]

Optimaliam šios grandinės veikimui labai svarbu teisingai parinkti komponentus. Diodų pasirinkimą labai apriboja žemas įėjimo signalo galios lygis. Kadangi kintamos įtampos, kuri gaunama iš antenos, amplitudė paprastai daug žemesnė nei tipinio diodo slenkstinė, būtini diodai su kuo mažesne atsidarymo įtampa. Taip pat grandinė turės dirbti su aukštais radijo bangų dažniais, todėl renkantis diodą būtina atsižvelgti į jo persijungimo greitį. Šiomis savybėmis dažnai pasižymi Šotkio diodai. Jie gaminami iš metalo ir puslaidininkio sandūros, vietoj įprastinės puslaidininkio ir puslaidininkio sandūros. Tai leidžia Šotkio diodams dirbti aukštesniuose dažniuose ir sumažina įtampos kritimą sandūroje. Praktiniai tokiai aplikacijai tinkamų diodų pavydžiai būtų „Avago Technologies“ kompanijos HSMS-2822 ar HSMS-2852. Šie diodai dažnai minimi ir kituose straipsniuose apie radijo bangų energijos panaudojimą. Straipsnyje [24] pateikiama apžvalga ir lentelė su skirtingais moksliniais straipsniais šia tema. Svarbu kad parinktas diodas turėtų mažą sandūros talpą ir varžą, kitaip grandinė neveiks aukštuose dažniuose ir turės didelius nuostolius.

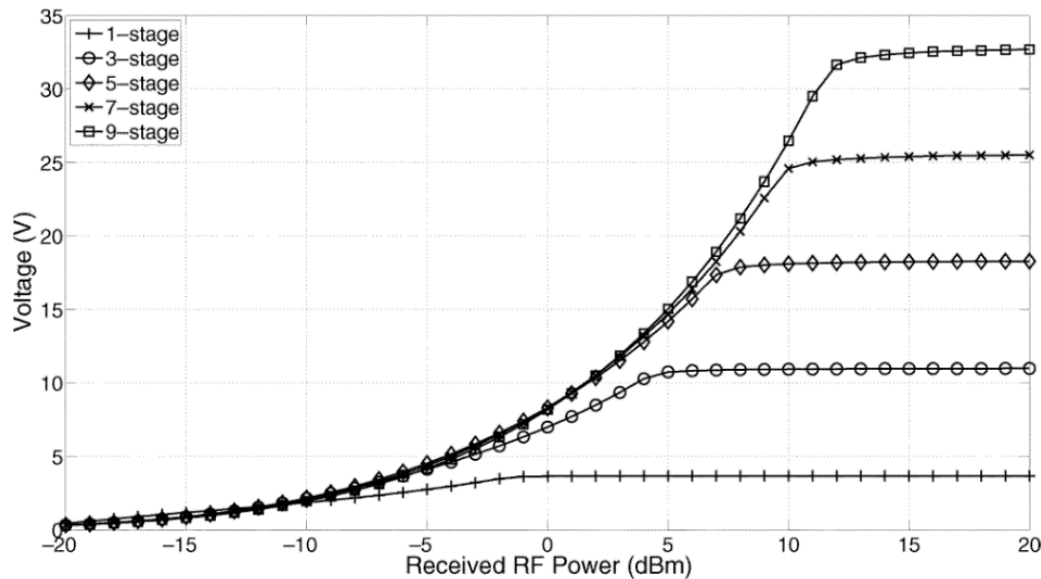
Taip pat detektoriaus veikimas labai priklauso nuo daugintuvo grandinės pakopų skaičiaus. Didesnis pakopų skaičius visada reikš didesnę išėjimo įtampą, tačiau visada reikia įvertinti konvertavimo efektyvumą, kuris taip pat labai priklauso nuo to kiek daugintuvo pakopų naudosime. Įtampos dauginimo koeficientas su kiekviena pakopa vis silpnėja dėl parazitinių reiškinių, kuriuos įneša talpos pakopose, todėl neįmanoma naudoti didelio skaičiaus pakopų ir gauti bet kokią norimą įtampos lygį. [36] straipsnyje autoriai pateikia kreivę (žr. 2.16 pav.), kurioje pavaizduota tokio tipo grandinės naudingumo koeficiento priklausomybė nuo skirtingo pakopų skaičiaus ir įėjimo signalo galios. Matome, kad mažesnis pakopų skaičius leidžia grandinei efektyviau veikti su žemesnės galios signalais, tačiau didesnis pakopų skaičius leidžia pasiekti didesnę efektyvumą esant stipresniems signalams. Taip yra dėl diodų veikimo slenkstinės įtampos, kuri prie silpnų signalų dažniausiai nėra

viršijama ir tai lemia mažėjantį konvertavimo efektyvumą su didesniais diodų skaičiais. Taigi labai svarbu parinkti diodus su kuo mažesne slenkstine įtampa.



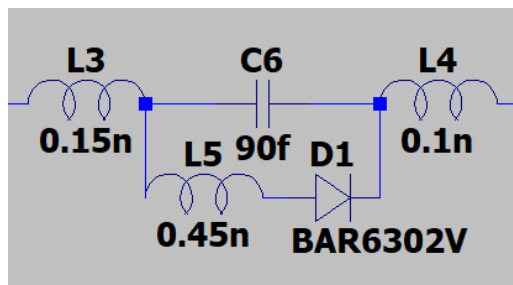
2.16 pav. Daugintuvo efektyvumo nuo pakopų skaičiaus ir signalo galios priklausomybė [36]

Straipsnyje taip pat pateikiamas daugintuvo išėjimo įtamos priklausomybės nuo pakopų skaičiaus ir įėjimo signalo galios lygio grafikas (žr. 2.17 pav.). Jame matome, kad įtamos dauginimas labai priklauso nuo įėjimo signalo galios lygio, tačiau kai šis lygis yra tarp -20 dBm ir -10 dBm, išėjimo įtampa praktiškai nepriklauso nuo pakopų skaičiaus. Tai parodo, kad nepriklausomai nuo pasirinktos Diksono įtamos daugintuvo struktūros, silpnų signalų srityje aukštesnių išėjimo įtampų nepasieksime ir jas nulems tik pačių komponentų parinkimas. Iš šių grafikų taip pat matome, kad norint surinkti žemesnių galios lygių signalų energiją, turėsime taikyti Diksono daugintuvą iš mažesnio skaičiaus pakopų, o esant aukštesniems galios lygiams prireiks daugiau pakopų. Tai reiškia kad šią grandinę turės sudaryti bent dvi lygiagrečios radijo bangų konvertavimo sistemos. Svarbu paminėti, kad įtamos grafikas taip pat parodo, kad naudojant daugiau daugintuvo pakopų, turėsime užtikrinti apsaugą energijos kaupimo sistemos įėjimui, nes prie didesnės galios radijo signalo daugintuvo išėjimo įtamos gali pakilti net iki 30 V, kas galėtų potencialiai pažeisti sistemos įėjimą. Ši apsauga taip pat įneš galios nuostolių į sistemą.



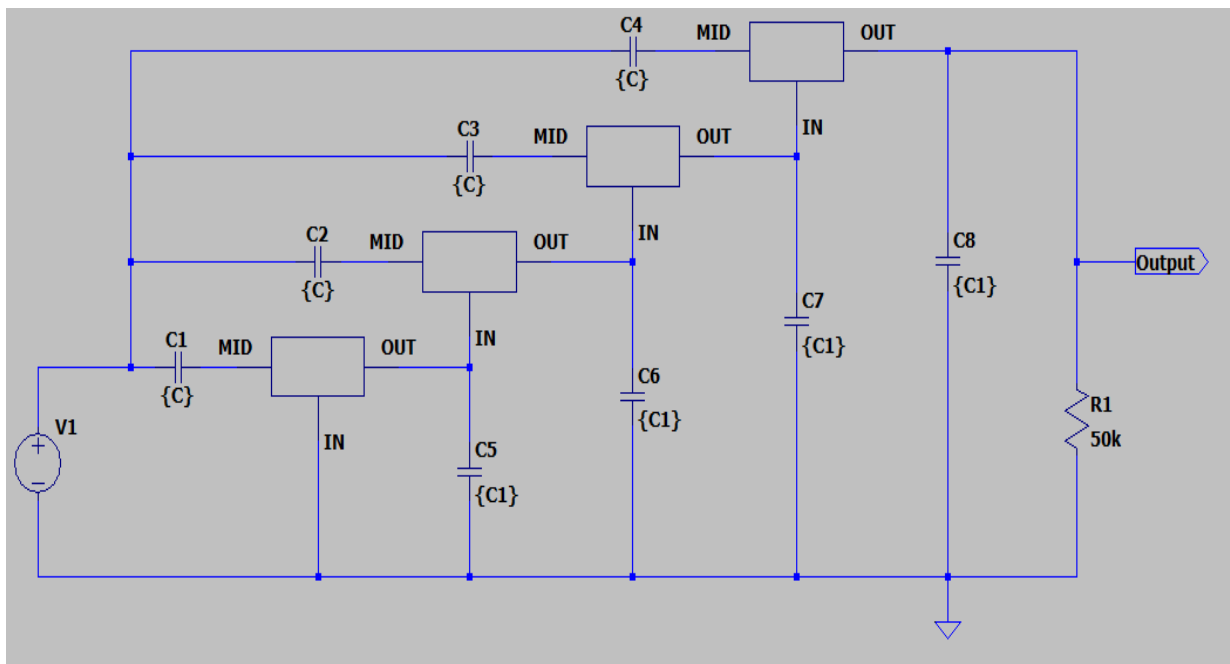
2.17 pav. Daugintuvo išėjimo įtampos priklausomybė nuo pakopų skaičiaus ir signalo galios [36]

Nepaisant straipsniuose pateiktų rezultatų, vis tiek turėsime patys įsivertinti tokio tipo grandinių efektyvumą, ir komponentų parinkimo galimybes, nes straipsniuose nėra pateikiamos pilnos grandinių schemos ar komponentų nominalai. Prieš atliekant praktinius testus grandinę sumodeliuosime „LTspice“ programiniame pakete. Tai mums leis geriau įvertinti pasirinktus komponentus ir nuspręsti kelių pakopų daugintuvus naudosime. „LTspice“ renkamės dėl šios programos paplitimo elektronikos bendruomenėje, nes daugelio komponentų modelius pateikia patys gamintojai. Tai leis mums atlikti kuo realistiškesnes simuliacijas ir gauti tikslius rezultatus. Taip pat simuliuodami turėsime naudoti ekvivalentines komponentų grandines, nes aukštuose dažniuose didelę įtaką komponento veikimui pradeda daryti kontaktų induktyvumas ir parazitinės talpos. Pavyzdžiui, „Infineon“ komponentų gamintojas, nurodo kad jų BAR6302V diodo modelis (žr. 2.18 pav.) dirbant su daugiau kaip 100 MHz dažniais turi būti papildytas nuosekliai prijungtais induktyvumais iš abiejų pusių ir lygiagrečiai prijungta talpa. Parazitinių verčių nominalai nėra dideli, tačiau aukštuose dažniuose jie gali smarkiai pakeisti simuliacijos rezultatus.



2.18 pav. Ekvivalentinis „Infineon“ BAR6302V diodo „LTspice“ modelis, skirtas aukštiems dažniams

Simuliacijoms buvo panaudoti penki skirtingi diodų modeliai. Pasirinkta buvo pagal diodų prieinamumą rinkoje, parametrus ir rekomendacijas moksliniuose straipsniuose. Bandyti diodų modeliai: SMS762, SMS7630, BAT15-03W, 1PS79SB17 ir 1PS70SB84. Kiekvieno diodo simuliacija buvo atliekama prie 850 MHz dažnio generuojamo signalo, su 1–4 Diksono daugintuvo pakopomis, naudotas 0,1 μF kondensatorių nominalas ir 50 k Ω apkrovos varža. Simuliacijos schema, pateikta 2.19 paveikslėlyje, sudaryta iš keturių Diksono daugintuvo pakopų. Vietoj dviejų diodų buvo sudarytas „LTspice“ komponentas, kad būtų galima paprasčiau keisti pakopų skaičių. Pats diodo komponentas taip pat buvo atskirai sudarytas naudojant gamintojų pateiktus modelius ir parametrus.

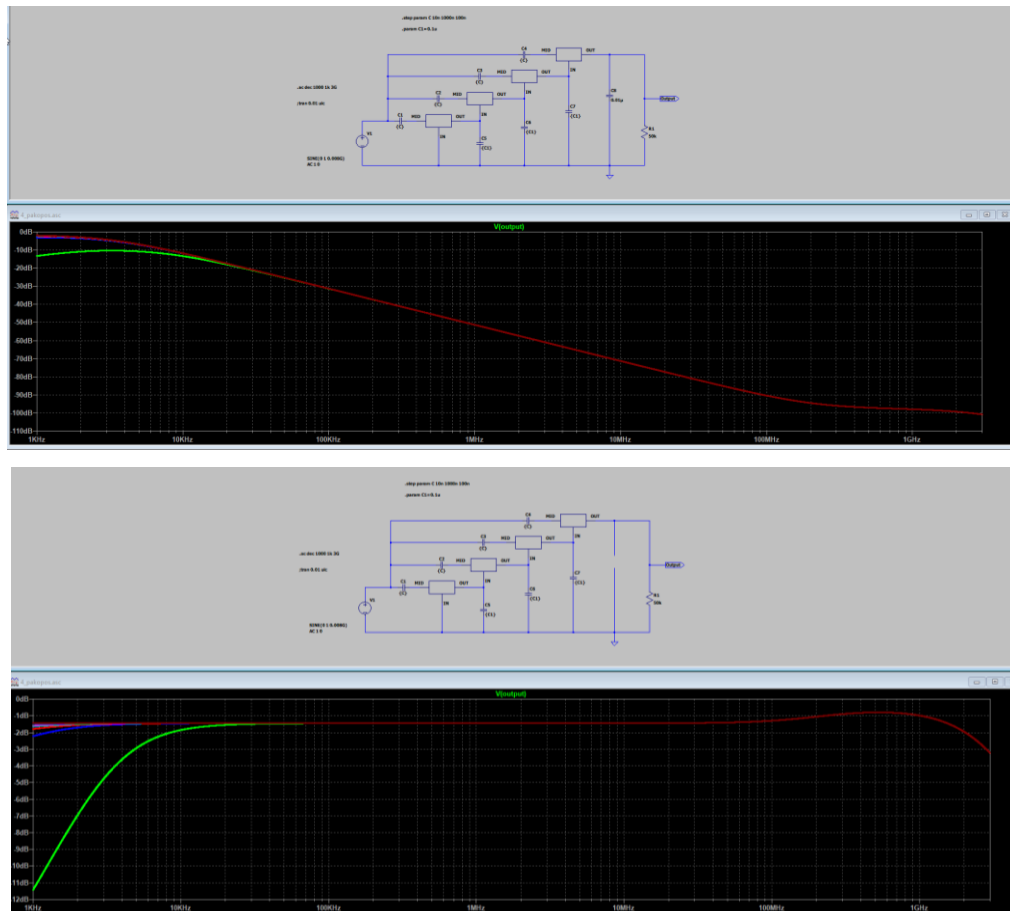


2.19 pav. Simuliacijoms naudota „LTspice“ schema

Buvo vertinami rezultatai tiek laiko tiek dažninėje skalėje, kad pasirinktume optimaliausią pakopų skaičiaus ir diodo variantą. Simuliacijos buvo atliktos nuo 1 kHz iki 3 GHz dažnių ruože. Geriausius rezultatus parodė SMS7621 diodas su dviejų pakopų Diksono daugintuvo konfigūracija. Atlikus simuliaciją išėjime nusistovėjo 2,7 V įtampa, o schemos slopinimas prie 850 MHz dažnio buvo tik 0,18 dB (96 % naudingumo koeficientas). Tai nėra realus rezultatas, nes simuliuojama grandinė su idealiais komponentais (išskyrus diodus). Nepaisant to, tai vis tiek buvo geriausias rezultatas iš visų lygintų diodų, todėl projektuojant tikrą bandomąją plokštę, pagrindiniais diodais pasirinkti būtent SMS7621.

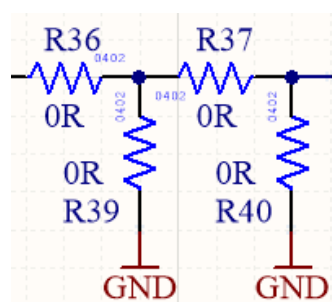
Simuliacijų metu pastebėta, kad pašalinus 0,01 μF C8 kondensatorių, pagerėja grandinės efektyvumas aukštuose dažniuose (žr. 2.20 pav.), bet gaunamas daug triukšmingesnis išėjimo

signalas, nes šis kondensatorius padeda atlikti įtampos lygintuvo funkciją. Tuo buvo įsitikinta ir praktiniuose matavimuose.



2.20 pav. Diksono daugintuvo dažninės charakteristikos pokytis panaikinus kondensatorių išėjime

Kaip minėta anksčiau, impedanso derinimo grandinė bus nustatoma praktinių matavimų būdu, todėl projektuojant schemą, jai palikta laisvų komponentų.



2.21 pav. Impedanso derinimui skirta grandinė

Paliktos dvi „L“ tipo impedanso derinimo grandinės pakopos (žr. 2.21 pav.), kurių turėtų pakakti, derinant antenos ir Diksono daugintuvo įėjimo grandinės impedansus pasirinktoje dažnių juostoje.

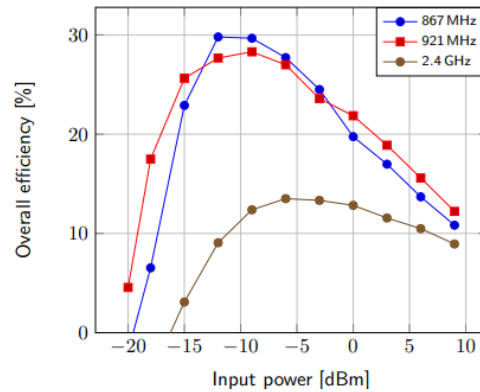
2.6. Energijos kaupimo sistema

Ankstesniuose skyriuose aptartos impedanso derinimo ir įtampos lygintuvo grandinės neturėtų prasmės be energijos kaupimo sistemos. Ši dalis svarbi, nes geras energijos kaupimas bei perdavimas leistų sistemą padaryti efektyvia ir plačiai pritaikoma įvairioms maitinimo funkcijoms atlikti. Rinkoje yra keli integriniai grandynai, kurie suprojektuoti būtent darbui su labai mažos galios šaltiniais. Šio tyrimo bandomajai plokštei nuspręsta naudoti AEM30940 mikroschemą. Ji pasirinkta dėl išsamios „E-peas“ gamintojo pateikiamos dokumentacijos, mažos reikalaujamos įtampos bei galios įėjime energijos kaupimui pradėti ir veikimo plačiame RF galios ruože (nuo -19 dB iki 10 dB). Taip pat ši sistema yra pakankamai lanksti ir leidžia išbandyti įvairias išėjimo įtampos valdymo konfigūracijas (žr. 2.3 lentelę). Tai naudinga, nes galima pasirinkti įvairius talpos elementus surinktai energijai kaupti, tokius kaip: ličio jonų baterijos, keramikiniai kondensatoriai, tantalai, elektrolitiniai kondensatoriai ar visokių tipų superkondensatoriai.

2.3 lentelė. AEM30940 išėjimo įtampų konfigūracijos lentelė [38]

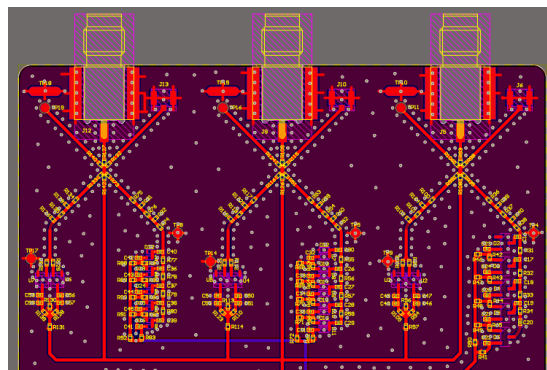
Konfigūracijos įvadai			Telpos elemento slenkstinė įtampa			LDO išėjimo įtampa		Tipinis pritaikymas
CFG[2]	CFG[1]	CFG[0]	Vovch	Vchrđy	Vovdis	Vhv	Vlv	
1	1	1	4.12 V	3.67 V	3.60 V	3.3 V	1.8 V	Ličio jonų baterija
1	1	0	4.12 V	4.04 V	3.60 V	3.3 V	1.8 V	Pastovios būsenos baterija
1	0	1	4.12 V	3.67 V	3.01 V	2.5 V	1.8 V	Li-ion/NiMH baterija
1	0	0	2.70 V	2.30 V	2.20 V	1.8 V	1.2 V	Vienos celės superkondensatorius
0	1	1	4.50 V	3.67 V	2.80 V	2.5 V	1.8 V	Dviejų celių superkondensatorius
0	1	0	4.50 V	3.92 V	3.60 V	3.3 V	1.8 V	Dviejų celių superkondensatorius
0	0	1	3.63 V	3.10 V	2.80 V	2.5 V	1.8 V	LiFePO4 baterija
0	0	0	Pasirenkamas režimas, programuojamas R1 – R6 varžomis					1.8 V

Ši kompanija taip pat gamina AEM40940 mikroschemą, kuri yra panašios paskirties, bet turi integruotą lygintuvo grandinę. Tai būtų patogiu, tačiau neleistų pritaikyti lygintuvo grandinės laisvai pasirenkamiems dažniams ir atskirai išsimatuoti jos S parametrų ar efektyvumo, todėl šiam darbui AEM40940 mikroschema nėra tinkama. Taip pat pats gamintojas nerekomenduoja šios IC naudoti naujuose projektuose, nes planuojama nutraukti jos gamybą ir techninį palaikymą. Nepaisant to, dokumentacijoje pateikiami RF grandinės efektyvumo duomenys 867 MHz, 921 MHz, 2.4 GHz dažniuose (žr. 2.22 pav.). Šie grafikai parodo grandinės efektyvumą prie skirtingų įėjimo galios lygių, matuojant tarp impedanso derinimo grandinės pradžios ir lygintuvo išėjimo. Kaip matome, didžiausias grandinės efektyvumas pasiekiamas prie maždaug -10 dBm galios įėjime ir yra apie 25–30 %. Tai leidžia suprasti kokio efektyvumo galima tikėtis projektuojamoje lygintuvo grandinėje, bet nereiškia, kad didesnis efektyvumas nėra įmanomas.



2.22 pav. AEM40940 RF grandinės efektyvumo kreivė [37]

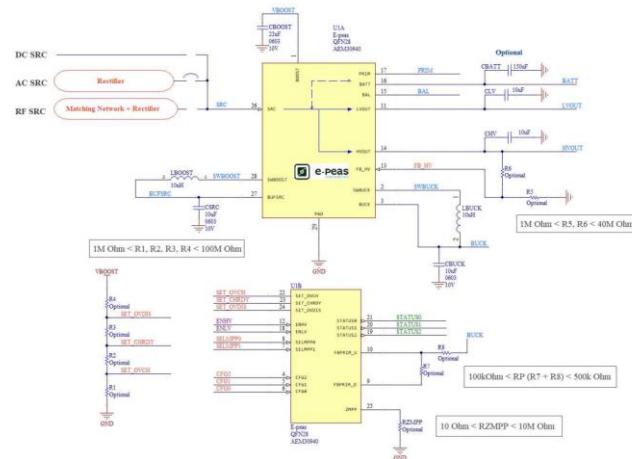
Pasirinkta AEM30940 mikroschema taip pat gali būti tinkama saulės baterijų, termoelektrinių generatorių ir kinetinių energijos šaltinių naudojimui, todėl projektuojant schemą reikia neatmesti ir šių variantų. Taip pat prie diskrečios Diksono daugintuvo grandinės, palyginimui pridėtas „Powercast“ gamintojo PCC110 integrinis grandynas, kurio paskirtis yra labai panaši, bet dokumentacijoje teigiama, kad pasiekiamas iki 75 % konvertavimo efektyvumas. Taip pat schemoje išskirta vietos kitų dydžių diodų lygintuvams sudaryti. Pasirinkta sudaryti trijų lygiagrečių RF grandinių sistemą (žr. 2.23 pav.), kurių kiekviena turėtų po tris RF įėjimo jungimo būdus: SMA jungtį, „I-pex“ jungtį ir atviras litavimo aikšteles. Jungtis pasirenkama naudojant $0 \, \Omega$ trumpiklį. Toliau RF grandinė per trumpiklius išskaidoma į tris linijas: diskreta Diksono daugintuvą, PCC110 lygintuvą ir tuščią laidininką. Tokia RF linijų sudėtis leidžia greitai įvertinti skirtingus virpesių lyginimo metodus ir prisijungti įvairius signalų šaltinius.



2.23 pav. Projektuojamos bandomosios plokštės RF linijos

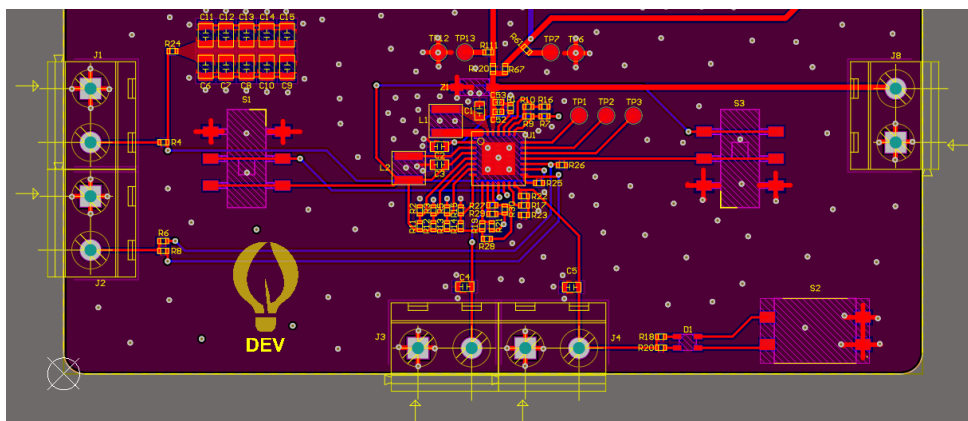
PPM sistema projektuota remiantis AEM30940 dokumentacija [38]. Dokumentacijoje detalai aprašoma kokie yra leistini konfigūravimo variantai ir pateikiama pavyzdinė schema (žr. 2.24 pav.) su konkrečiais komponentais, kuriuos rekomenduojama pasirinkti. Nepaisant to, projektuojant bandomąją plokštę yra reikalingos kuo platesnės sistemos konfigūravimo galimybės įvairiems bandymams atlikti, todėl kuriama schema turės daug trumpiklių, kurie leistų atlikti paprastus

pakeitimus. Taip pat bus reikalingi jungikliai, kurie leistų valdyti mikroschemos aukštos ir žemos įtampos išėjimo kanalus. Sistemos veikimo nustatymui ir sukaupiamos energijos kiekio įvertinimui naudosime šviesos diodus su apribota srove.



2.24 pav. AEM30940 mikroschemos pavyzdinė pritaikymo schema [38]

Talpos elementui panaudota lygiagrečiai sujungtų keramikinių kondensatorių matrica, kurios bendra talpa 470 uF. Keramikiniai kondensatoriai pasirinkti dėl mažo krūvininkų praradimo greičio. Taip pat keramikiniai kondensatoriai pasižymi nedidele ekvivalentine varža, todėl juos kraunant ir iškraunant prarandama mažiau galios. Pasirinkta talpa pakankamai maža, kad būtų galima stebėti sistemos cikliškumą esant žemai galiai įėjime. Taip pat sukurta galimybė prijungti didesnę talpos elementą ar net išorinę bateriją. PPM mikroschema taip pat leidžia prijungti atsarginę talpą, kuri būtų naudojama, kai sistemai pritrūktų energijos iš RF linijos. - Bandomojoje plokštėje (žr. 2.25 pav.) taip pat suprojektuoti išvadai išoriniams prietaisams prijungti ir maitinti, numatyta jungtis saulės ar TEG elementams, kuri leidžia tiesiogiai prisijungti prie AEM30940 įėjimo be papildomos lygintuvo grandinės, nes šiems keitikliams ji nereikalinga.



2.25 pav. AEM30940 mikroschemos pavyzdinė pritaikymo schema [38]

Pasigaminus šią sistemą bus atliekami testavimo darbai, tokie kaip: RF linijos ir PPM sistemos jėgimo impedansų derinimas, antenų impedanso su RF linija derinimas, Diksono daugintuvo bandymai su skirtingais diodais, PCC100 RF lygintuvo efektyvumo matavimai, visos sistemos efektyvumo matavimai. Testų rezultatai turėtų padėti suprojektuoti efektyviau veikiančią sistemą, kuri būtų pritaikoma realiam prietaisui maitinti.

2.7. Aparatinės įrangos projektavimas

Ankstesniuose skyriuose analizavome kinetinės ir radijo bangų energijos panaudojimo būdus, jų veikimo principus ir pagrindinius parametrus. Atsižvelgdami į nustatytus reikalavimus tikslams energijos keitimo metodų charakteristikų matavimams, suprojektuosime trūkstantį įrangą praktiniams testams atlikti.

2.7.1. Pjezoelektrinio keitiklio kūrimas

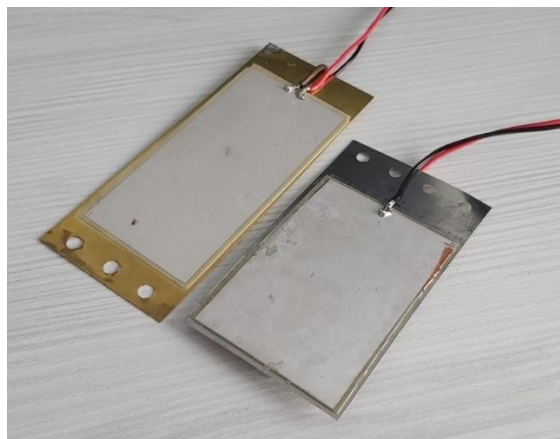
Atlikus literatūros, susijusios su pjezoelektriniais keitikliais, analizę, pastebėta, jog prieinamų į galios generavimą orientuotų keitiklių rinkoje beveik nėra. Vienintelė įmonė – „Mide Technology Corporation“ – siūlo svirties konstrukcijos PEG, kurie skirti naudoti kaip energijos šaltiniai, o ne kaip vibracijų jutikliai. Likusią pasiūlą rinkoje galima skaidyti į dvi dalis: neapdirbtą pjezoelektrinę medžiagą (pavyzdžiui, „American Piezo“ arba „Omega Piezo“) ir į elektroniką integruoti keitikliai (pavyzdžiui, „Viezo“). Dėl neadekvačios kainos už reikalingą kiekį arba netinkamos pasiūlos, išgryninti du būdai paruošti keitiklį eksperimentiniams tyrimams.

Pirmiausia nuspręsta išbandyti vibracijų jutiklių perdarymą. Pastarieji dažniausiai neturi laidininko po pjezoelektriku arba tarp dviejų jo sluoksnių. Nors keitikliui veikiant įtampa yra voltų eilės, išėjime tekanti srovė yra nykstamai maža – jos nefiksuoja mikroampermetras. Dėl šios priežasties bandyta išardyti turėtus vibracijų jutiklius ir jų konstrukciją perdaryti į tokia, kaip pavaizduota ...pav. Atskyrus pirmojo jutiklio sluoksnius nustatyta, kad toks keitiklių gamybos metodas nėra tinkamas. Kadangi tokie jutikliai turi reaguoti į pačias menkiausias vibracijas, jie projektuojami ploni ir lankstūs. Dėl šios priežasties beveik neįmanoma nedidelių vibracijų jutiklių perdaryti, nes jie proceso metu yra tiesiog sugadinami.

Antrasis galimas keitiklių gavimo būdas – tiekėjai iš Kinijos. Naudojant tokias platformas kaip „Aliexpress“ ir „Alibaba“, buvo rasta įvairių išmatavimų PZT plokštelių ir jau naudojimui paruoštų PEG, kurie atitinka 2.1 pav. pavaizduotą optimalią sandarą. Pjezoelektrinių plokštelių ir keitiklių gaminimo rankomis buvo atsisakyta, nes bandant rankomis pasigaminti keitiklius iškyla

daug problemų susijusių su nestabiliu ir prastu veikimu. Dėl to, eksperimentiniams tyrimams buvo pasirinkta naudoti jau pagamintus, Kinijos tiekėjų keitiklius. Nepaisant abejotinos tokių generatorių medžiagų kokybės ir patvarumo, įvertinta, kad tai yra geriausias variantas.

Bandymams pasirinkti du PEG (žr. 2.26 pav.). Pirmasis keitiklis (su sidabrine plokštele) turi pjezoelektriko sluoksnį tik vienoje pusėje ir bus naudojamas tyrimams be papildomos masės ant galiuko. Antrasis keitiklis (su auksine plokštele) turi pjezoelektriko sluoksnius iš abiejų pusių.



2.26 pav. Tyrime naudoti vienpusis (dešinėje) ir dvipusis (kairėje) PEG

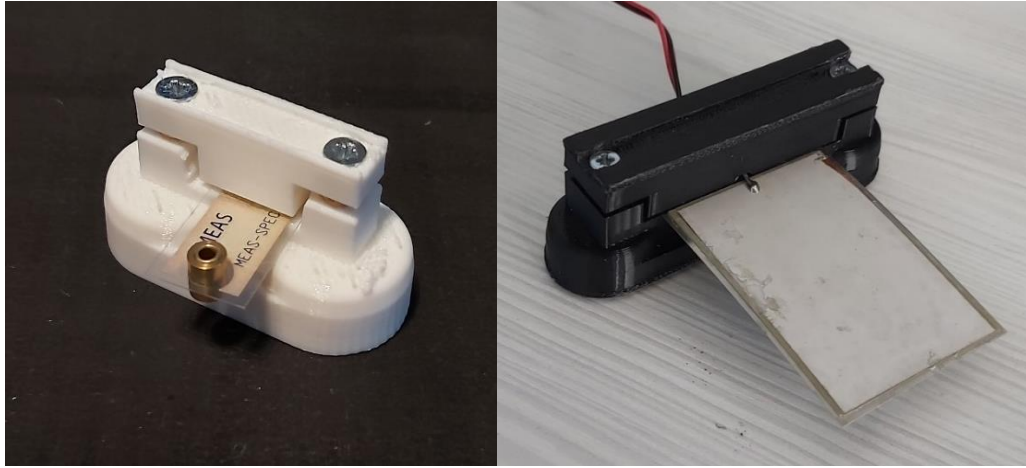
Kadangi šis keitiklis turėjo vietos ant metalinės plokštelės, buvo išgręžtos trys skylės masės tvirtinimui. Prie abiejų keitiklių buvo prilituoti išvadai, o dvipusio generatoriaus pjezoelektriniai sluoksniai sujungti lygiagrečiai.

2.7.2. Generatoriaus laikiklio projektavimas

Vienas iš esminių svirties konstrukcijos PEG efektyvumą lemiančių veiksnių yra tinkamas įtvirtinimas. Keitiklio prispaudimas turi didelę įtaką ne tik rezonansiniam dažniui, bet ir generuojamai įtampai. Silpnai ar netolygiai prispaudus svirties galą, svyruoja ir ore esanti keitiklio dalis, ir tarp prispaudimo plokštumų esanti dalis. Tai reiškia, kad PEG rezonansinis dažnis yra nepastovus, nes keitiklis laikui bėgant keičia savo vietą prispaudėjo atžvilgiu. Taip pat, kelis kartus sumažėja įtampa išėjime. Šis naudingumo kritimas pasireiškia dėl to, kad aplinkos vibracijų mechaninė energija pasiskirsto per visą generatorių ir nėra nukreipiama tik į suderintą ir energiją kuriančią keitiklio dalį.

Siekiant užtikrinti eksperimentinių tyrimų stabilumą ir rezultatų tikslumą, suprojektuoti du skirtingų dydžių nešiojami keitiklių laikikliai. Mažasis laikiklis (žr. pav. 2.27 a)) skirtas PVDF vibracijų jutikliams, o didysis laikiklis (žr. pav. 2.27 b)) bus naudojamas pritvirtinti pagrindinius efektyvumo tyrime naudojamus keitiklius. Laikikliai sudaryti iš dvejų, tarpusavyje varžtais

sujungiamų dalių, tarp kurių įsistato PEG. Esminis šių prispaudėjų bruožas yra tvirtinimui skirti magnetai., kurie leis greitai įtvirtinti generatorius įvairiose aplinkose ir jose atlikti bandymus. Neigiama magnetų įtaka tyrimo metu naudotų keitiklių charakteristikoms nenustatyta.

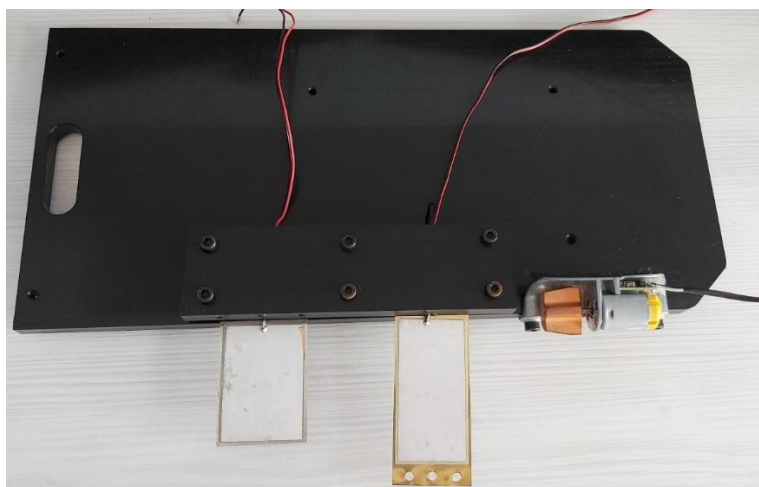


a)

b)

2.27 pav. Mažasis PEG laikiklis (a) ir didysis PEG laikiklis (b)

Atliekant bandomuosius keičiamos galios matavimus pastebėta, kad pastarieji prispaudėjai nuo vibracijų gali pajudėti ir pakeisti savo buvimo vietą svyravimų generatoriaus atžvilgiu. Toks pokytis reikštų parodymų nepastovumą ir būtų iškreipti eksperimento rezultatai. Su tokia pačia problema galima susidurti ir dėl žmogiškosios klaidos keičiant keitiklį ar komponentus energijos lyginimo grandinėje. Ši problema yra ir kintant vibracijų šaltinio vietai keitiklio atžvilgiu. Kadangi didelėje dalyje eksperimentų naudojamas mažai nuosavos masės turintis variklis, svarbu užtikrinti, kad jis dėl savo veikimo negalėtų pajudėti. Dėl išvardintų priežasčių buvo pasigamintas trečias, daug didesnis ir sunkesnis laikiklis, kuris matavimų metu papildomai prispaustas prie stalo (žr. 2.28 pav.).

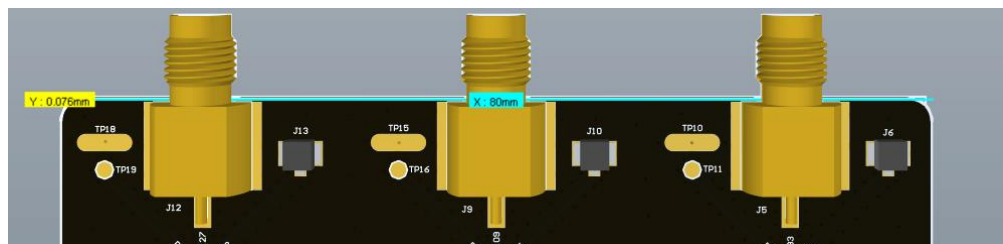


2.28 pav. Stabilioms matavimų sąlygoms užtikrinti skirtas PEG laikiklis su vibraciniu varikliu

Toks tvirtinimo metodas leis išlaikyti nekintamas sąlygas tarp skirtingų matavimų ir parodymuose matomus pokyčius susieti tik su sistemos komponentų pakeitimu ir derinimu, o ne bandymų sąlygomis. Ant šio laikiklio taip pat M4 varžtais prisuktas ir vibracijų generatorius, siekiant išspręsti su jo judėjimu atsirandančias paklaidas.

2.7.3. Sistemos prievadų parinkimas

Projektuojant tokio tipo sistemas reikia pasirašyti kokius įėjimo ar išėjimo prievadus reikės turėti. Šiuo atveju sistema yra kuriama bandymo tikslais, todėl ji turės nemažai prievadų, skirtų matavimams atlikti. Taigi pirmiausia apžvelgsime visas jungtis, kurios yra skirtos sistemos funkcionalumui įgyvendinti. Sistemą pagal panaudojimą galima suskirstyti į tris pagrindines dalis: galios įėjimo, kaupimo ir perdavimo. Įėjimo dalis turės daugiausiai prievadų ir nurodys, kokios dydžio bus ši PCB. Įėjime yra trys SMA tipo RF jungtys, trys „I-Pex“ RF jungtys, trys RF laidų litavimui skirti varios atidengimo taškai ir dviejų kontaktų terminalas išoriniam galios šaltiniui prijungti. Visos RF jungtys turi būti išdėstytos lygiagrečiai, vienoje PCB pusėje, kad atliekant skirtingus testus su trimis RF linijomis, turėtumėme kuo panašesnes sąlygas. Šis reikalavimas nulėmė, kad optimaliausias PCB plotis šiai sistemai yra 80 mm (žr. 2.29 pav.). Kontaktų terminalą išoriniam galios šaltiniui geriausia statyti toliau nuo RF linijų ir kuo arčiau energijos kaupimo IC, kad nebūtų gadinamos RF linijos charakteristikos, o galios perdavimo linijos efektyvumas būtų maksimalus. Taip pat, SMA jungtys parinktos SMT tipo, kad galėtų būti pastatomos ir sulituojamos automatinio būdu.



2.29 pav. RF linijos įėjimo jungčių išdėstymas plokštėje

Galios kaupimo sistemos dalis turi du jungčių terminalus, skirtus didesniam talpos elementui arba atsarginei baterijai prijungti. Anksčiau minėta, kad talpos elementui naudojama keramikinių kondensatorių matrica, tačiau sistemos paskirtis yra ištestuoti kuo daugiau jos veikimo scenarijų, todėl sukurta galimybė prijungti išorinį talpos elementą. Šalia esanti atsarginės baterijos jungtis taip pat leidžia prisijungti talpą, tačiau jos paskirtis yra kita. Prijungus prie plokštės atsarginę bateriją ir pakeitus tam tikrų trumpiklių pozicijas, galima sukonfigūruoti sistemą taip, kad pritrūkus galios

mikroschemos įėjime ir talpos elementui išsikrovus iki dokumentacijoje nurodytos ribos, sistema atidarytų rakto režimu veikiančią vidinį lauko tranzistorių, kuris sujungtų atsarginę bateriją su IC įėjimu. Tokiu būdu net ir esant per mažai galiai įėjime, sistema gali palaikyti stabilų energijos kaupimą talpos elemente.

Plokštėje taip pat yra du galios perdavimo terminalai – vienas skirtas žemos, kitas aukštos įtampos perdavimui. Išėjimo įtampos priklauso nuo sistemos konfigūracijos, kurią minėjome ankstesniuose skyriuose (žr. 2.3 lentelę). Šių išėjimo linijų paskirtis yra tiekti pastovią maitinimo energiją išoriniam prietaisui. Taip pat, aukštos įtampos perdavimo linijos išėjimas yra lygiagrečiai sujungtas su dvigubu šviesos diodu. Šio diodo paskirtis yra atvaizduoti sistemos veikimo ciklus ir indikuoti galios atsiradimą išėjime. Šie diodai gali būti atjungiami, kad nemažintų aukštos įtampos išėjimo galios, nes realiomis sąlygomis nuolat laikyti įjungtą šviesos diodą yra neefektyvu.

2.7.4. RF linijų projektavimas

Kaip jau buvo minėta, bandomojoje plokštėje yra trys atskiros, lygiagrečiai suprojektuotos, RF linijos. Kiekviena jų gali naudoti tiek „PowerCast“ gamintojo PCC110 RF lygintuvą, tiek mūsų projektuotą Diksono daugintuvą ar būti visiškai atvira. Šie pasirinkimai galimi keičiant 0402 korpuso trumpiklių vietas ant PCB. Linijos su lygintuvais taip pat turi po minėtą impedanso derinimo grandinę, nes impedanso suderinamumas RF linijoje lemia galios perdavimo efektyvumą joje. Tačiau impedansą galima derinti ne tik diskretiniais komponentais, bet ir parenkant atitinkamus linijos matmenis. Šiuo atveju panaudota koplanarinė RF linija, todėl siekiant kuo tiksliau nustatyti jos impedansą, reikia tinkamai parinkti šiuos parametrus:

- Linijos plotį (W);
- PCB medžiagos dielektrinę skvarbą (ϵ_r);
- PCB dielektriko storį (H);
- Įžeminto vario sluoksnio atstumą nuo RF linijos (G);
- Vario sluoksnio storį (T);
- Signalų dažnį, kuriame siekiame suderinti linijos impedansą (F).

Šiuo atveju liniją derinsime 50 Omų impedansui, nes taip rekomenduoja galios kaupimo IC gamintojas. Taip pat daugelio matavimo prietaisų prievadai yra kalibruojami būtent 50 omų impedansui, nes tai yra labiausiai radijo technikoje paplitusi vertė. Anksčiau minėtų parametrų parinkimui inžinieriai dažnai naudoja įvairias impedansui skaičiuoti skirtas aplikacijas. Šiuos atveju buvo pasirinkta pagalbinė projektavimo aplikacija „AppCAD“. Prieš naudojantis šia aplikacija

pirmiausia turime sužinoti kokie bus projektuojamos PCB parametrai, kurie priklauso nuo jos gamintojo. Šiai sistemai pasirinktas populiarus PCB gamintojas iš Honkongo „JLCPCB“. Įmonės puslapyje galima surasti standartinės PCB dielektriko storį, vario sluoksnių storį, dielektriko medžiagą ir jos dielektrinę konstantą [55]. Žinant šiuos parametrus, galima parinkti reikiamą linijos plotį ir įžeminto vario sluoksnio atstumą nuo jos (žr. 2.30 pav.). Renkant šiuos dydžius ir projektuojant visą PCB, reiktų atsižvelgti į gamintojo nurodomus gamyklinius limitus, tokius kaip takelių storis, minimalus atstumas tarp takelių, mažiausias galimas skylių diametras ar tarpas tarp jų [56].

Coplanar Waveguide ☒ With Groundplane ☐ No Groundplane

Calculate Z0 [F4]

Diagram labels: L=1000, H=1.51, T=0.035, W=0.6, G=0.13, ϵ_r

Dielectric: $\epsilon_r = 4.6$
FR-4

Frequency: 1 GHz

Length Units: mm

Calculated values:

- $Z_0 = 50.4 \Omega$
- Elect Length = 5.255 λ
- Elect Length = 1891.9 degrees
- Elect Length = 1575.534 mm (Air Line equiv.)
- Delay = 5.255 ns
- 1.0 Wavelength = 190.280 mm
- $V_p = 0.635$ fraction of c
- $\epsilon_{eff} = 2.48$
- Shape factor = 0.698

2.30 pav. RF linijos parametrų skaičiavimas „AppCAD“ aplinkoje

Projektuojant tokio tipo RF linijas taip pat svarbu, užtikrinti gerą „žemės“ (angl. *Ground*) kontaktą aplink visą liniją. Geras kontaktas užtikrina linijos atsparumą trukdžiams ir radiotechnikos srityje yra vadinamas „ekranavimu“. Dažniausiai daugiasluoksnėse plokštėse šis efektas pasiekiamas panaudojant didelį skaičių PCB „via“ (lotyn. *kelias*) ties RF linijos kraštais, nes tokiu būdu užtikrinama apsauga nuo triukšmų visomis kryptimis.

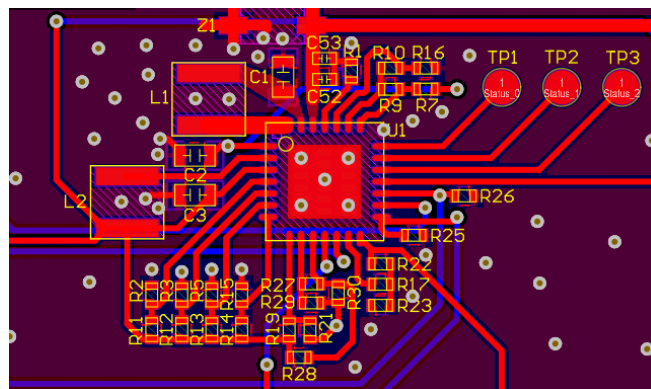
2.7.5. PPM schemos projektavimas

Viena svarbiausių kuriamos sistemos dalių yra galios kaupimo ir valdymo grandinė. Ji atsako už efektyvų įėjime gaunamos energijos konvertavimą į panaudojamo lygio įtampas išėjime ir talpos elemento užpildymą. Kaip jau minėta, šiai grandinei panaudota AEM30940 mikroschema. Viduje ji turi integruotą, ypač žemoms galioms pritaikytą įtampą aukštinantį keitiklį, kuris naudojamas talpos elemento krovimui iš išorinio galios šaltinio. Šis keitiklis ypatingas, nes gali veikti įėjime esant žemai įtampai tokiai kaip 50 mV.

Taip pat šio keitiklio išėjimo įtampa yra panaudojama ir dar vienai konvertavimo operacijai atlikti – įtampos žeminimui. Tam naudojami integruoti LDO įtampos keitikliai. Jie leidžia

mikroschemos išėjime stabilizuoti aukštos ir žemos įtampos vertes, kurios gali būti naudojamos įvairiems mažos galios mikroprocesoriams ar radijo retransliatoriams maitinti. Tačiau šiems keitikliams reikalingi išoriniai komponentai, kurie dažniausiai negali būti integruojami į mikroschemos lustą – galios induktoriai ir didesnės talpos keramikiniai kondensatoriai. Taip pat kondensatoriai reikalingi ir LDO išėjimuose, kad išėjimo įtampa būtų kuo stabilesnė. Integrinio grandyno gamintojas dokumentacijoje pateikia rekomenduojamų naudoti komponentų nominalus ir konkrečius detalių kodus [38]. Nepaisant to, praktiškai panaudoti komponentai dažniausiai skirsis nuo gamintojo rekomendacijos, nes projektuojant reikia atsižvelgti į jų prieinamumą ir kainą.

Taip pat gamintojas pateikia ir rekomendacijas PCB trasavimui, komponentų išdėstymui. Tai naudinga vertinant kaip optimaliai panaudoti vietą plokštėje, bet tuo pačiu gauti gerą schemos veikimą. Šiomis rekomendacijomis dažnai atvejais realybėje sunku pasinaudoti, nes projektuotojas būna apribojamas vietos trūkumu plokštėje, arba PCB sluoksnių skaičiumi. Tačiau šiuo atveju schema nėra tokia sudėtinga ir galima nesunkiai ją įgyvendinti dviejų vario sluoksnių plokštėje (žr. 2.31 pav.). Projektuojant ypač svarbu nepamiršti, kad sistemai reikalingas efektyvumas, todėl būtina optimizuoti dizainą ir siekti kuo mažesnės linijos ir kontaktų varžos.



2.31 pav. AEM30940 integrinio grandyno PCB išdėstymas

Taip pat siekiant, kad bandomoji plokštė būtų kuo lengviau konfigūruojama, projektuojant buvo panaudoti 72 trumpikliai. Jie naudoti nustatant pastovų mikroschemos įėjimo impedansą, konfigūruojant IC veikimo ciklus, nustatant LDO išėjimo įtampų vertes, pasirenkant talpos elemento tipą, nurodant ar bus naudojama atsarginė baterija ir daugeliui kitų parinkčių, kurios leidžia turėti ganėtinai lanksčią sistemą. Mikroschema taip pat turi galimybę indikuoti savo veikimo būsenas, naudojant tris statusą nurodančius prievadus, todėl jiems plokštėje buvo išvestos atskiros kontaktinės aikštelės, kad būtų galima prisilituoti laidus ir stebėti veikimo ciklą kaitą. Taigi, matome, kad pasirinkta PPM sistema yra pakankamai plačiai pritaikoma ir lengvai konfigūruojama, todėl ją bus nesunku panaudoti daugelio rinkoje esančių mažos galios mikroprocesorių maitinimui.

3. EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI IR DUOMENŲ ATRANKA

Šiame skyriuje aptarsime ir praktiškai ištirsime energijos kaupimo sistemos atskirų komponentų veikimą, charakteristikas, nustatysime optimaliausias sąlygas jų efektyviam panaudojimui. Taip pat atliksim sistemos optimizavimą pagal gautus praktinius rezultatus ir įvertinsime bendrą veikimo efektyvumą.

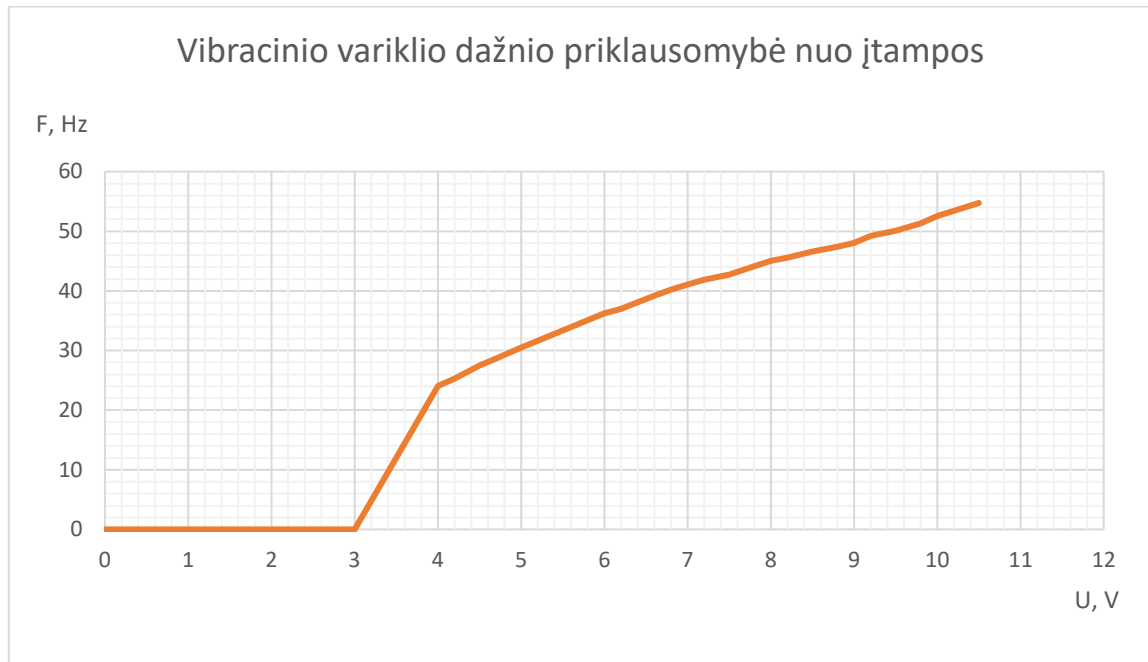
3.1. Mechaninės energijos konversijos efektyvumo ir patvarumo tyrimas

Keitiklių charakteristikų nustatyti nepavyks, neturint kontroliuojamo vibracijų šaltinio. Šiai problemai spręsti bus panaudotas vibracinis variklis, išimtas iš automobilio vairo (žr. 3.1 pav.), kuriame jis buvo skirtas informuoti vairuotoją apie galimai pavojingus manevrus persirikiuojant.



3.1 pav. Didysis vibracinis variklis

Pasirinktas variklis yra valdomas įtampa, o dokumentacijoje nenurodyta jokia informacija, susijusi su apsisukimais per minutę ar dažniu. Dėl to, prieš atliekant tolesnius matavimus, nustatyta, kaip kinta kuriamų vibracijų dažnis didėjant įtampai (žr. 3.2 pav.). Matavimai atlikti naudojant vibracijų jutiklį ir variklį tvirtai prisukus prie nejudančio pagrindo. Kiekvienas taškas grafike yra geometrinis vidurkis iš penkių matavimų prie tos pačios įtampos. Grafikas sudarytas iš 24 taškų, pradedant prie 4 voltų, o įtampa didinta po 0,2–0,4 V. Iš grafiko matome, kad variklis pradeda veikti prie 4 voltų ir geba generuoti dažnius iki 55 Hz. Variklis sukasi ir prie žemesnių įtampų, tačiau veikimas iki 4 V yra nepastovus ir bandymams netinkamas.

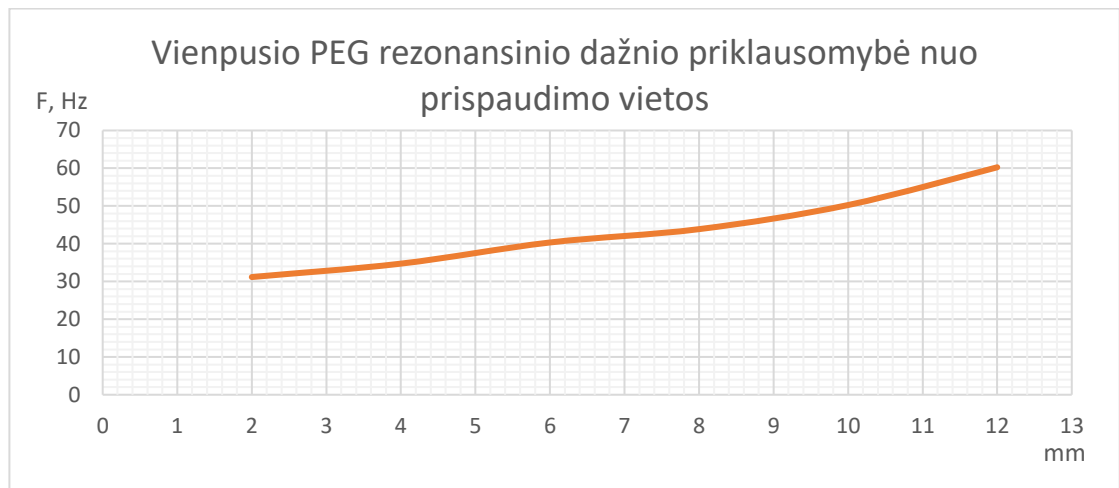


3.2 pav. Vibracinio variklio dažnio priklausomybė nuo įtampos

Reikia paminėti, kad galimas veikimas ir prie didesnių įtampų nei nurodyta grafike, tačiau siekiant užtikrinti keitiklių ir paties variklio ilgą amžius, pasirinkta į vibracijų generatorių paduodamą įtampą apriboti ties 10,5 V. Palyginus vidutinę įtampą ir dažnį santykį su kiekvienu tašku, apskaičiuota, kad vidutinis nukrypimas visame veikimo ruože yra 1,67 procentai. Dėl to šią priklausomybę laikysime tiesine.

3.1.1. Keitiklių parametrų nustatymas

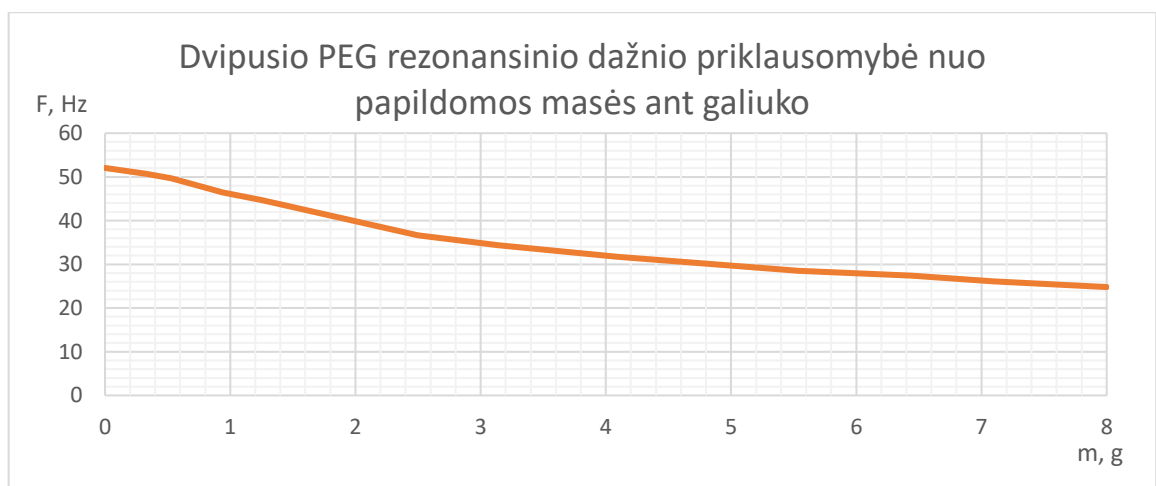
Kadangi tyrimo tikslas ir pagrindinis eksperimentas yra energijos keitimo efektyvumo matavimas, kad reikia nustatyti naudosimų PEG rezonansinius dažnius ir jų derinimo ribas. Pirmiausia išmatuota, kaip kinta keitiklio rezonansinis dažnis keičiant prispaudimo vietą. Ši rezonansinio dažnio priklausomybė pavaizduota 3.3 pav. Žemiausiu šiuo derinimo būdu išgaunamu dažniu laikysime 31 Hz. Tai nustatyta esant 2 mm atstumui nuo keitiklio krašto. Šio atstumo trumpinti negalima, nes nepavyktų užtikrinti kokybiško tvirtinimo ir matavimai tampa nestabilūs. Viršutinė dažnių juostos riba yra 60 Hz, kai keitiklis pristumtas arčiausiai laikiklio kiek galima, kol dar nedaroma žala pačiai pjezoelektrinei medžiagai.



3.3 pav. Vienpusio PEG rezonansinio dažnio priklausomybė nuo prispaudimo vietos

Šio eksperimento metu kiekvienas taškas buvo gautas imant aritmetinį vidurkį iš penkių matavimų, o keitiklis tvirtai priveržtas nejudančiame laikiklyje. Šis grafikas nubraižytas iš 6 taškų, nuo 2 mm iki 12 mm, tarp matavimų keitiklį paslenkant po 2 milimetrus. Mažesnio žingsnio pasirinkta nematuoti, nes dėl tokių mažų atstumų atsiranda žmogiškųjų klaidų keičiant keitiklio poziciją. Taip pat, žingsnis nemažintas, nes priklausomybė, gauta iš 6 taškų, turi mažus nukrypimus nuo centro, t. y., yra beveik tiesinė.

Su dviejų sluoksnių PEG buvo atliktas toks pats bandymas, tačiau derinimas atliktas masės pridėjimu. Svoris didintas per keitiklio galiuke pragręžtas tris skylės prakišant nedidelius varžtus ir juos įtvirtinant veržlėmis ir poveržlėmis. Šio bandymo rezultatų sudarymo taisyklė išliko nepakitusi – taškas grafike yra penkių matavimų vidurkis, o ir keitiklis, ir laikiklis tvirtai pritaisyti prie nejudančio paviršiaus. Papildomas svoris buvo matuotas svarstyklėmis, 0,01 gramo tikslumu. Ši priklausomybė pateikta žemiau (žr. 3.4 pav.):



3.4 pav. Dvipusio PEG rezonansinio dažnio priklausomybė nuo papildomos masės ant galiuko

Šį keitiklį be papildomo svorio įtvirtinus didžiausio saugaus rezonansinio dažnio pozicijoje pasiekiamas tik 52 Hz dažnis. Mažesnę maksimalų dažnį, lyginant su vienpusiu keitikliu, galima sieti su jo storiu. Dvipusis keitiklis turi dvigubai storesnį pjezoelektrinės medžiagos sluoksnį, kuris priešinasi lenkimui ir žemina rezonansinį dažnį. Šio keitiklio dažnių rėžių matavimus nuspręsta pabaigti prie 8 gramų svarmens, nes taip suderinto PEG rezonansinis dažnis sutampa su minimaliu patikimu vibracijų generatoriaus dažniu.

Atlikus vienpusio ir dvipusio generatorių rezonansinio dažnio rėžių matavimus, galima daryti išvadą, kad didžiausias mūsų sistemos efektyvus dažnis yra apie 60 Hz. Pastaraisiais dvejais grafikais bus remiamasi analizuojant konkrečias aplinkas ar vibracijas skleidžiančius prietaisus, kai reikės suderinti generatorius maksimalios galios darbo režimui.



3.5 pav. Vienpusio PEG išgaunamos galios priklausomybė nuo apkrovos

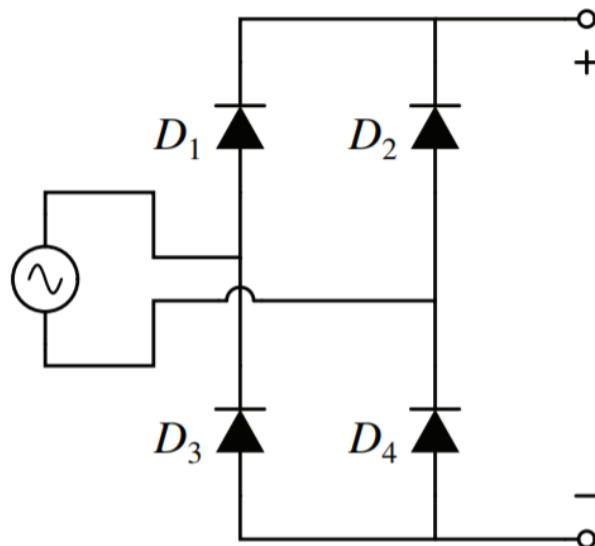
Atliekant eksperimentus pastebėta, jog sistemos išgaunamai galiai daug įtakos turi apkrovos ir šaltinio suderinimas. Siekiant patvirtinti šį sąryšį, atliktas eksperimentas (žr. 3.5 pav.). Šis bandymas įgyvendintas naudojant vienpusį keitiklį be papildomo svarmens, suderintą 51 Hz rezonansiniam dažniui. PEG prispaudimas ir pozicija vibracijų šaltinio atžvilgiu buvo pastovi, o kintamasis buvo aktyvi sistemos apkrova nuo 22 Ω iki 1 MΩ. Grafike matomi trys ryškiausi pikai prie 50 kΩ, 100 kΩ ir 300 kΩ. Pirmasis pikas pasiekiamas, kai šaltinis ir apkrova suderinti. Kitų dvejų pikų kilmės nustatyti nepavyko.

3.2. Įtampos lygintuvo kinetinės energijos keitimui tyrimas

Bendrą pjezoelektrinio mechaninės energijos keitiklio efektyvumą lemia trys kriterijai – medžiagos parinkimas, tinkama konstrukcija ir įtampos lyginimas su nedideliais nuostoliais. Pirmieji du kriterijai jau išsamiai išanalizuoti ir abejais atvejais pateikti efektyviausi sprendimai.

Trečiojoje PEG analizės dalies, galima įvardinti kelias problemines vietas. Visų pirma, įtampos keitiklio išėjime yra maža, dėl to renkantis geriausią įtampos lygintuvo schemą svarbu atkreipti dėmesį į tai, kad dėl įtampos kritimo lygintuvo komponentuose bus prarandama didelė dalis kuriamos energijos. Be to, skirtingų nominalų ir gamintojų komponentai, turi skirtingą įtaką lygintuvo efektyvumui. Dėl to, pasirinkus lygintuvo konstrukciją, bus atlikti matavimai su įvairiais komponentais, siekiant maksimaliai pakelti sistemos naudingumą. Paskutinis svarbus dalykas, apibrėžiantis lygintuvo tinkamumą, yra minimali įtampa, reikalinga gamintojo numatytam komponentų veikimui. Pavyzdžiui, jei pasirinkta kintamos įtampos keitimo į nuolatinę schema pradeda veikti nuo 1 V, visa keitiklio kuriama energija, esanti žemiau šios ribos, yra nepanaudojama.

Atliekant literatūros apžvalgą, pastebėta, jog visi trys PEG efektyvumo kriterijai turi vieną paprasčiausią, plačiausiai taikomą etaloninį sprendimą, kuris yra dažnai naudojamas kaip atskaitos taškas tiriant sudėtingesnes idėjas. Pjezoelektrinės medžiagos ir keitiklio konstrukcijos atžvilgiu, tai yra PZT ir svirtis, o standartinis įtampos lygintuvas yra diodų tiltelis (žr. 3.6 pav.). Pagrindinis tokios konstrukcijos trūkumas yra santykinai žemas elektrinis naudingumas. Kiekvienu kintamo signalo pusperiodžiu, srovė teka per du diodus. Turint omenyje, kad įprasti, silicio pagrindu pagaminti diodai, turi įtampos kritimą lygų apie 0,7 V, lyginant diodų tilteliu bus bent 1,4 V įtampos kritimas. Be to, reikia paminėti, jog galios lygintuvo išėjime nuostoliai padidės ir dėl tiesioginės diodų įtampos, kuri nulems lygintuvo įsijungimo tašką. Kitą vertus, tai yra lengvai įdiegiama, aiški ir pigi grandinė.



3.6 pav. Diodų tiltelio schema

Tiltelio konstrukciją galima įgyvendinti ir kitu būdu – diodus pakeičiant lauko tranzistoriais, kurių „gate“ ir „drain“ išvadai tarpusavyje sujungti. Tokios grandinės pagrindinis privalumas yra

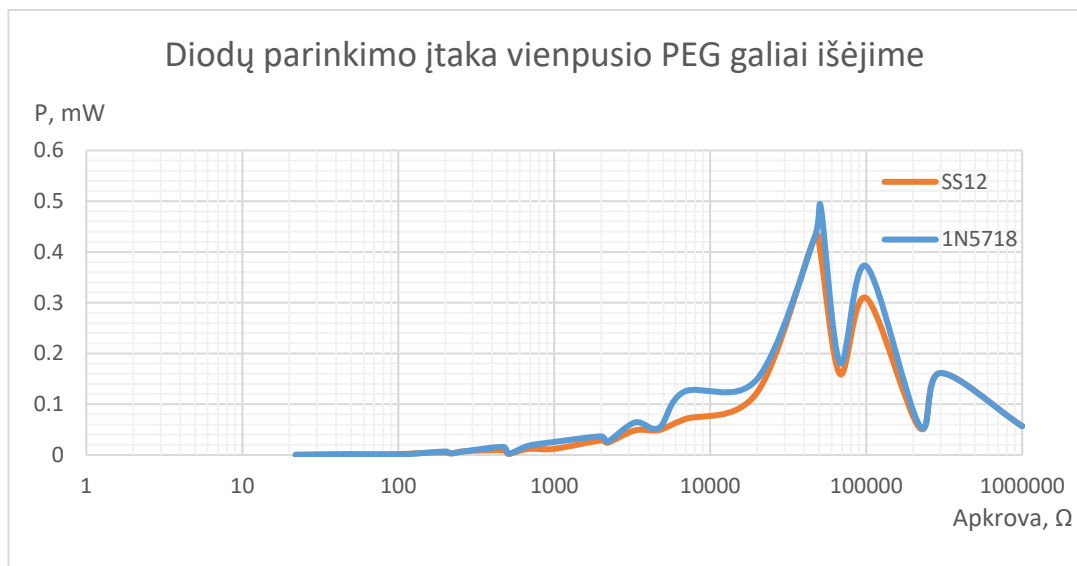
daug didesnis veikimo dažnis, tačiau lyginant signalus iki 100 Hz dažnio, to nereikia. Taip pat, lauko tranzistorių tiltelio naudingumas yra panašus į diodų tiltelio, nes tranzistoriai tik soties režime. Kitaip tariant, dėl potencialų skirtumo tarp tranzistorių išvadų, jie niekada nėra pilnai užsidarę ar atsidarę. Tai reiškia, kad lygintuvas vis tiek negali išlyginti viso į jį patenkančio signalo. Šios grandinės efektyvumą pakelti galima pridėdant tranzistorius valdantį komparatorių, tačiau tokiu atveju susiduriama su galios suvartojimo problema, nes pats komparatorius tampa ne lygintuvo komponentu, o papildoma apkrova. Silpnų vibracijų energijos keitime, taip lyginti įtampą būtų neefektyvu.

Kadangi atlikus įtampos lygintuvų analizę aiškaus geriausio pasirinkimo nenustatyta, buvo eksperimentiškai išmatuota kintama įtampa keitiklio išėjime. Priklausomai nuo vibracijų ir apkrovos ji gali siekti iki 20 V. Dėl to nuspręsta, jog šio tyrimo tikslams pasiekti tinkamiausias yra tradicinis diodų tiltelis. Tokios schemos naudingumas nėra pats didžiausias, tačiau ji yra lengvai analizuojama, pati pigiausia, o turint omenyje, kad naudojami PEG išėjime kuria santykinai aukštą įtampą, įtampos kritimas dioduose labai didelės įtakos sistemos veikimui neturės. Taip pat, svarbu pabrėžti, kad bendras aplinkos energijos panaudojimo sistemos efektyvumas turi būti suvokiamas ne tik kaip maksimalus elektrinių komponentų naudingumas. Didelę įtaką turi ir komponentų kaina, prieinamumas, galimybė juos lengvai surinkti. Visas anksčiau aprašytas sistemos efektyvumo sudedamąsias dalis įvertinus nuspręsta, jog PEG keičiamą energiją lyginti yra geriausia su optimizuotu diodų tilteliu.

Tolimesnį lygintuvo tyrimą galima išskaidyti į du etapus, kurie susiję su grandinės optimizavimu, t. y., naudingumo didinimu. Pirmiausia, išsamiau paanalizuosime pačius diodus. Standartinio PN sandūros tipo diodo tiesioginė įtampa (riba, nuo kurios atsидaro sandūra ir per ją pradeda tekėti elektros srovė) yra 0,6–0,9 V. Tai reiškia įtampos kritimą apytiksliai lygų dvejoms tiesioginėms įtampoms, nes bet kuriuo momentu diodų tiltelyje srovė laisvai teka bent per du diodus. Pats paprasčiausias būdas šį įtampos kritimą sumažinti yra pakeisti diodus į germanio arba Šotkio – juose pralaidumas pasiekiamas prie 0,3–0,5 V, priklausomai nuo gamintojo ir modelio.

Siekiant ištirti skirtingų Šotkio diodų įtaką sistemos efektyvumui, atliktas bandymas ir palyginti du panašūs „Vishay“ gamintojo diodai – 1N5718 ir SS14 (žr. 3.7 pav.). Pirmojo tiesioginė įtampa prie 1 A srovės – 0,45 V, antrojo – 0,5 V. Prie mažesnių srovių šis įtampų skirtumas išlieka panašus, tačiau jo tiksliai nustatyti dokumentacijoje neįmanoma. Šis eksperimentas atliktas tokiais pačiomis sąlygomis kaip paskutinis keitiklio parametrų nustatymo bandymas (žr. 3.5 pav.), bet diodus

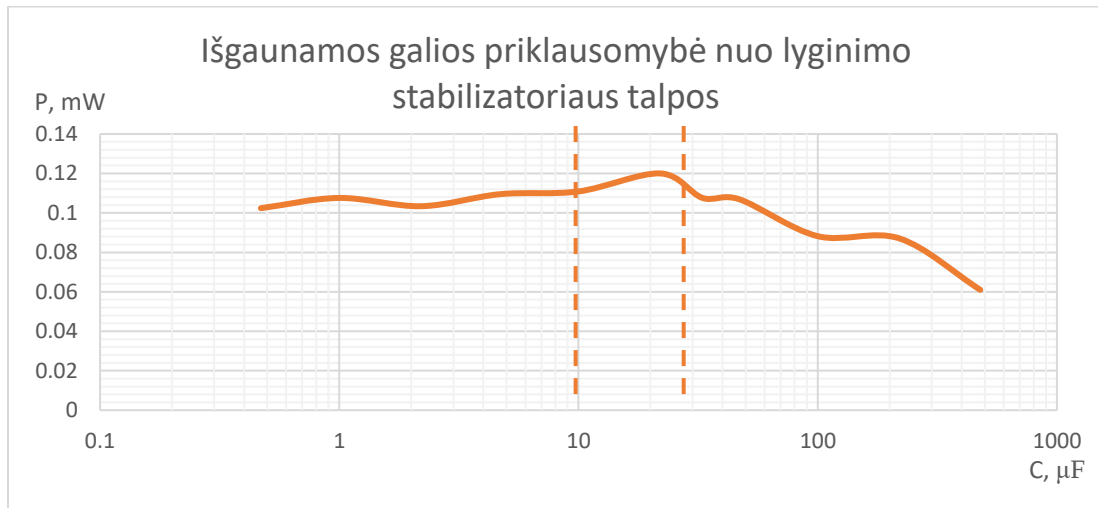
pakeitus į 1N5718. Grafike matoma žemesnės diodo tiesioginės įtampos įtaka kuriamai galiai. Penkių šimtųjų volto įtampos kritimo skirtumas nėra didelis, tačiau rezultatų pagerėjimas išlieka.



3.7 pav. Diodų parinkimo įtaka vieno pusio PEG galiai išėjime

Antrasis schemos optimizavimo etapas – išlygintos įtampos stabilizavimas. Tai yra reikalinga, nes diodų tiltelio išėjime įtampa nėra visiškai pastovi – atsiranda nedideli netolygumai (angl. *ripple*). Kitaip tariant signalas turi ne tik DC, bet ir nedidelę AC komponentę, reiškiančią neefektyvų įtampos lyginimą. Tai buvo išspręsta prijungiant kondensatorių grandinės išėjime lygiagrečiai. Kondensatorius vieno pusperiodžio metu yra įkraunamas, o priešingo pusperiodžio metu įkrovą atiduoda į apkrovą, taip kompensuodamas netolygumus.

Šio lyginimo grandinės kondensatoriaus įtaka generuojamai galiai eksperimentiškai ištirta ir pateikta 3.8 pav. Matavimuose naudoti 16 V kondensatoriai, kurių talpa nuo 0,47 μF iki 478 μF . Šią priklausomybę galima išskaidyti į tris dalis, grafike atskirtas punktyrinėmis linijomis. Kairėje dalyje, kai kondensatoriaus talpa mažesnė nei 10 μF , sistemos išėjime yra matomi netolygumai ir lyginimas nėra stabilus. Taip yra, nes mažos talpos kondensatoriai vieno pusperiodžio metu nesukaupia pakankamai krūvio, kad kompensuotų netolygumus. Vidurinėje grafiko dalyje, atvaizduota optimali kondensatoriaus talpa analizuojamai sistemai ir netolygumai beveik visiškai išlyginami. Dešinėje 3.8 pav. dalyje, nuo maždaug 50 μF , kondensatoriaus talpa tampa per didelė ir sistema nespėja reaguoti į įtampos kitimą. Nepaisant to, kad skirtumas tarp geriausio ir blogiausio matuoto kondensatorių yra tik 0,06 mW, procentine išraiška tai reiškia 50 % bendros galios sumažėjimą.



3.8 pav. Išgaunamos galios priklausomybė nuo lyginimo stabilizatoriaus talpos

Išanalizavus PEG išgaunamos elektros energijos pavertimo į DC galimybes nuspręsta, kad geriausia kainos, elektrinio naudingumo ir paprastumo kombinacija yra diodų tiltelis su tinkamai parinktu kondensatoriumi išėjime. Diodai turi būti parenkami su kuo mažesne tiesiogine įtampa, t. y., Šotkio arba germanio diodai. Renkantis kondensatorių svarbiausia atkreipti dėmesį į jo talpą ir netolygumų lygintuvo išėjime amplitudę.

3.3. Radijo spektro tyrimas

Prieš pradėdant vertinti pasirinktos RF grandinės veikimo efektyvumą ir kitus parametrus, reikia nustatyti, kokie yra aplinkoje esančių radijo bangų galios lygiai, su kuriais veiktų suprojektuota energijos kaupimo sistema. Tam bus išmatuotas gyvenamosios vietos apylinkių radijo dažnių spektras ir nustatyta, kokių dažnių bangos perduoda didžiausią dalį energijos.

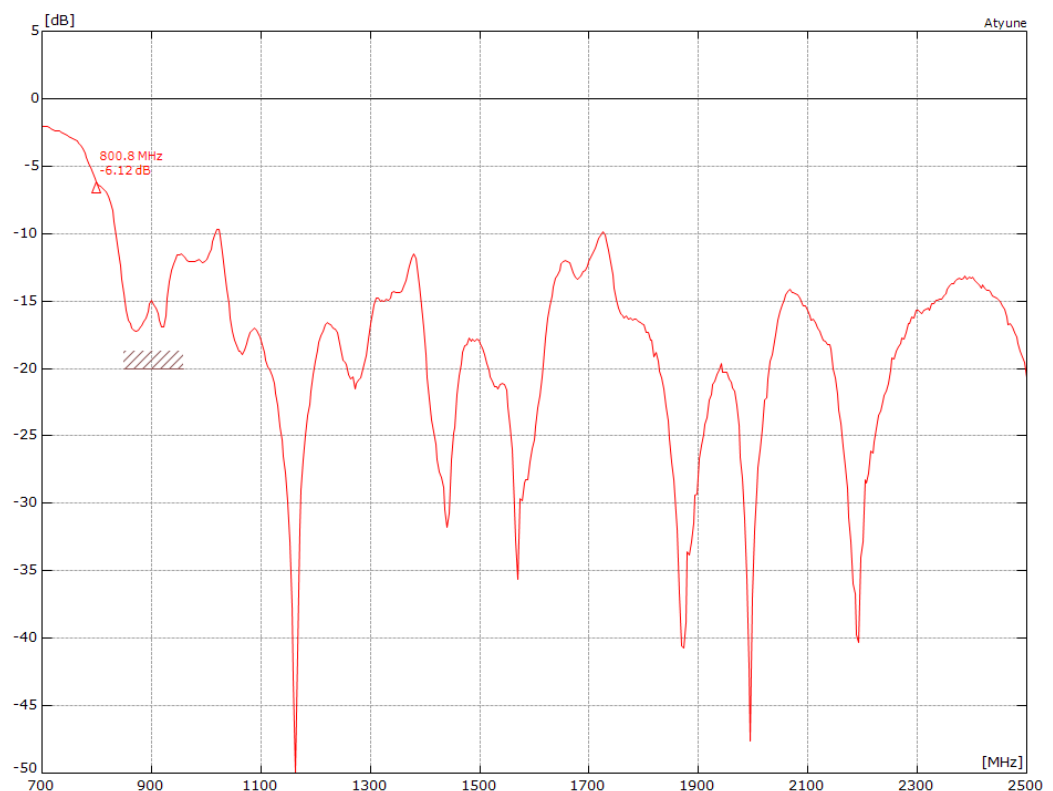
Šiems matavimams bus reikalingas spektro analizatorius ir plačiajuostė antena, kuri gerai veiktų visame dažnių ruože ir neiškraipytų matavimų rezultatų. Šiam tikslui buvo pasirinkta 3.9 a) paveikslėlyje pavaizduota UWB antena.



3.9 pav. a) UWB antena;

b) spektro analizatorius

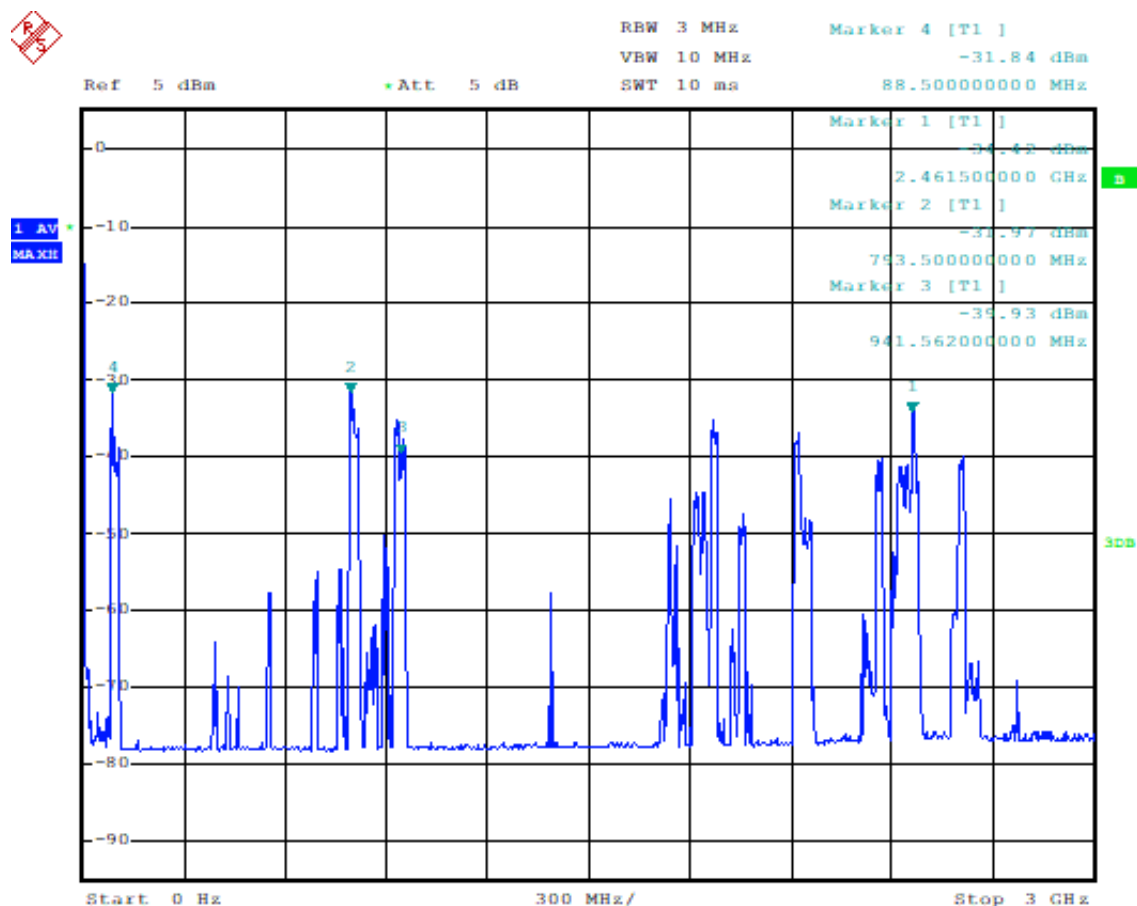
Dažnių spektrui matuoti buvo naudojamas profesionalus „R&S FSU“ spektro analizatorius (žr. 3.9 b) pav.). Pirmiausia reikia patikrinti antenos tinkamumą šioms matavimams. Įvertinti antenos stiprinimo parametrų nepavyks, nes tam reikalinga aukštos klasės laboratorinė įranga ir beaidis kambarys (angl. *Anechoic chamber*), tačiau galime nustatyti jos tinkamumą radijo dažniams, matuodami S11 parametą. Šie matavimai parodys, kokia dalis galios, siunčiamos į anteną, bus atspindėta linijos gale ir grįš į šaltinį. Ši atspindėta galia gali būti laikoma nuostoliais ir parodo antenos galimybę išspinduliuoti tam tikro dažnio bangas. S11 parametro matavimams naudotas profesionalus „R&S ZVL“ vektorinis tinklo analizatorius. Matavimų rezultatai pateikti 3.10 paveikslėlyje. Priimtinu rezultatu laikysime visus dažnius, kuriuose S11 parametras yra žemiau -6 dB ribos, nes tai reiškia, kad antenos išspindėta galia šiuose dažniuose viršija maždaug 75 procentus šaltinio atiduotos galios. Pagal gautus rezultatus matome, kad antena tinka matavimams nuo 800 MHz iki 2500 MHz.



3.10 pav. UWB antenos S11 dažninė charakteristika

Pirmiausia dažnių spektro matavimai buvo atliekami daugiabučio namo balkone, siekiant suprasti prieinamus galios lygius namų sąlygomis ir nustatyti daugiausia galios perduodančius dažnio ruožus. Iš rezultatų matyti, kad aukščiausi galios lygiai 0–3000 MHz dažnių ruože siekia tik apie -30 dBm, t. y. apie 1 μ W galią (žr. 3.11 pav.). Tokio lygio galia yra praktiškai nepanaudojama net

siekiant ją tik kaupti, nes anksčiau minėtas AEM30940 integrinis grandynas pradeda funkcionuoti tik nuo $3 \mu\text{W}$ galios įėjime. Reikia nepamiršti, kad naudojama antena slopina žemesnio nei 800 MHz dažnio signalus, todėl realūs signalo lygiai šiuose dažniuose gali būti kiek didesni. Nepaisant to, matome, kad namų sąlygomis komunikacijai naudojamų radijo bangų energija yra per maža, kad galėtume ją efektyviai kaupti ir panaudoti prietaisams maitinti. Vienintelis būdas namie kaupti energiją iš radijo bangų būtų panaudojant galią iš vietinių šaltinių, pavyzdžiui Wi-Fi modemas, tačiau ši technologija veikia siunčiant duomenų paketus, todėl esant mažam vartotojų skaičiui, išspinduliuojami labai nepastovūs galios lygiai palyginus su mobiliojo ryšio GSM, UMTS ar LTE technologijomis. Taigi tokio tipo galios kaupimas būtų nepatikimas namų sąlygomis ir taip būtų prarandama visa technologijos prasmė – turėti nepertraukiamą energijos šaltinį, kuris galėtų maitinti mažos galios sistemas. Tačiau Wi-Fi modemo energija galėtų būti naudojama labiau apkrautuose tinkluose, pavyzdžiui, kavinėse ar prekybos centruose.

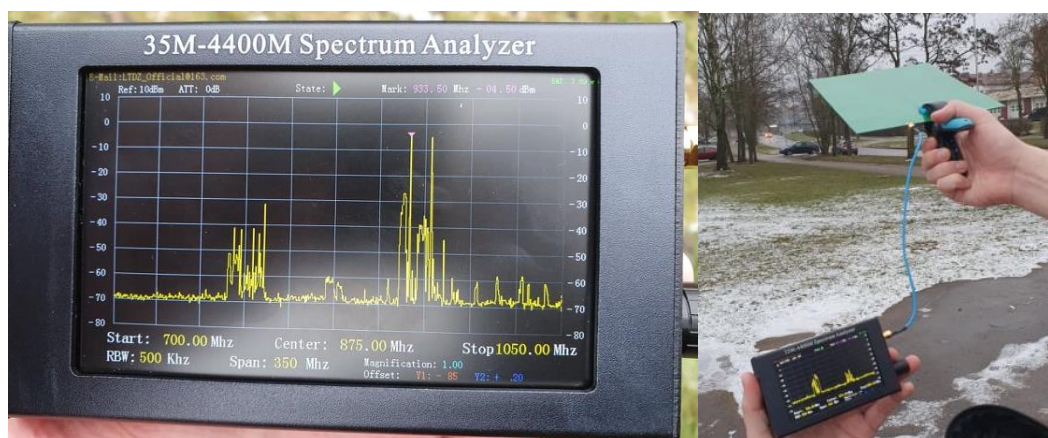


3.11 pav. RF dažnių spektro matavimai daugiabučio balkone

Spektro matavimo rezultatai daugiabučio namo balkone parodė, kad didžiausią galią erdvėje perduoda šių dažnių radijo bangos: apie 89 MHz, 750 MHz, 940 MHz, 1850 MHz ir 2460 MHz.

Kiekvienas iš šių dažnių gali būti paaiškinamas taip: 89 MHz patenka į FM radijo dažnių ruožą, 750 MHz yra netoli LTE B20 dažnių juostos, 940 MHz patenka į GSM 900 ir UMTS B8 dažnius, 1850 MHz priklauso GSM 1800 dažnių juostai, o 2460 MHz yra Wi-Fi dažnių srityje. Iš rezultatų matyti, kad šio darbo apžvalgos dalyje padaryta išvada dėl žemo dažnio GSM ir LTE bangų perduodamų aukštesnių galios lygių yra teisinga. Įvertinę tai, kad naudota antena šiuose dažniuose papildomai slopina signalą, galime teigti, kad būtent LTE B20, UMTS B8 ir GSM 900 dažnių juostos perduoda didžiausius galios kiekius radijo bangų spektre.

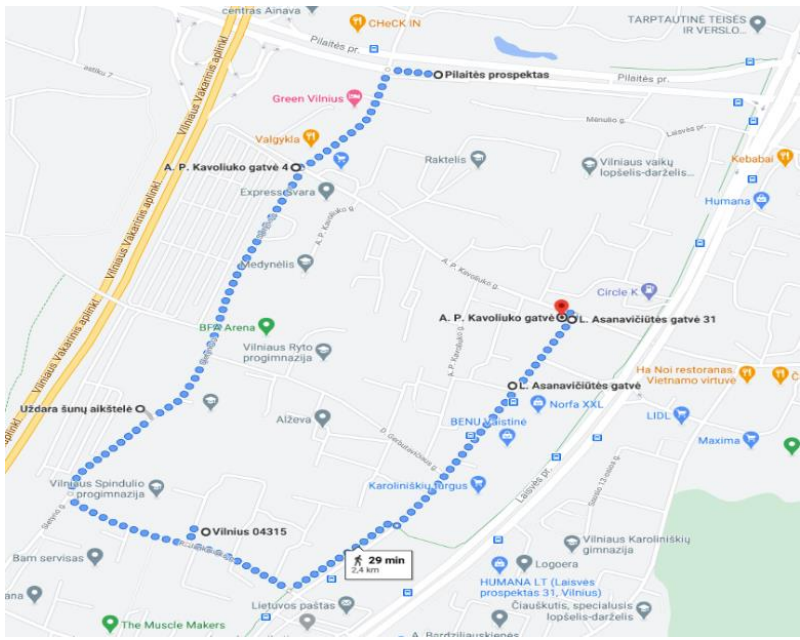
Aptarti rezultatai gali labai skirtis priklausomai nuo geografinės padėties ar trukdžių aplinkoje. Tikėtina, kad atviroje vietoje, netoli mobiliojo ryšio retransliavimo stoties, rezultatai būtų visiškai kitokie. Todėl reikia atlikti daugiau testų įvairesnėmis aplinkos sąlygomis. Kadangi naudota profesionali įranga nėra skirta mobiliems testams atlikti, tokio tipo bandymams naudotas „LTDZ 35M-4400M“ rankinis spektro analizatorius (žr. 3.12 pav.). Taip pat šiems matavimams panaudota kita antena, kuri yra suderinta su žemų dažnių juostomis ir esant 750 MHz jos S11 parametras siekia -25 dB.



3.12 pav. RF dažnių spektro matavimai Karoliniškių mikrorajone, Vilniuje

Kaip ir tikėtasi, matavimai parodė, kad aplinkos sąlygos turi daug įtakos signalo galiai. A. P. Kavoliuko gatvėje buvo išmatuota -4,5 dBm t. y. apie 0,35 mW galios signalą esant 934 MHz dažniu (žr. 3.1 lentelę).

3.1 lentelė Radijo bangų spektro matavimų Karoliniškėse rezultatai

Vieta žemėlapyje	Žemėlapis	Didžiausia išmatuota galia
Pilaitės prospektas		820 MHz -24.50 dBm
A. P. Kavoliuko g. 4		934 MHz -4.50 dBm
Uždara šunų aikštelė		802 MHz -30.25 dBm
Vilnius 04315		802 MHz -27.00 dBm
L. Asanavičiūtės g. 31		956 MHz -19.25 dBm 814 MHz -19.00 dBm
A. P. Kavoliuko g.		816 MHz -34.50 dBm

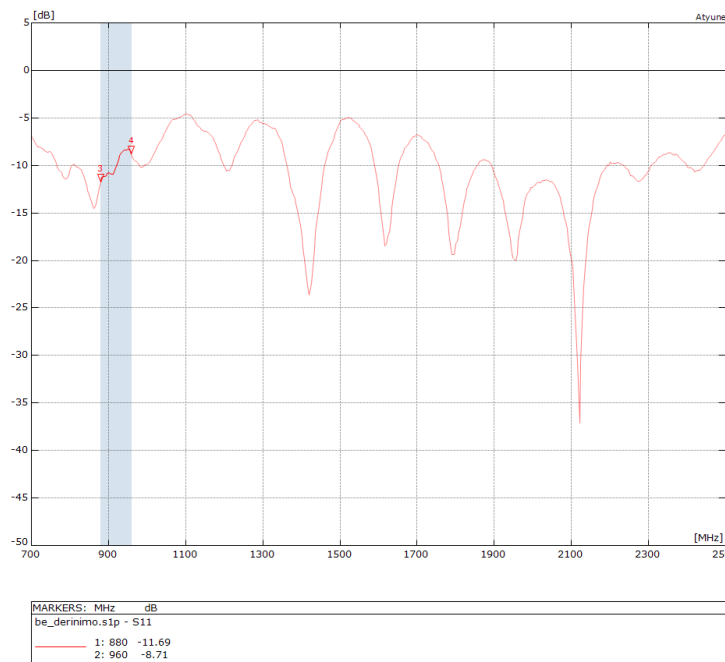
Tokius rezultatus galima paaiškinti tuo, kad vieta, kurioje buvo išmatuotas signalas yra pakankamai atvira (šalia nėra aukštų pastatų ar medžių) ir yra tiesioginis matomumas iki ant viešbučio „Green Vilnius“ stogo įrengtos mobiliojo ryšio retransliavimo stoties. Šis rezultatas gautas nukreipus anteną stoties linkme. Toks galios lygis yra pakankamas suprojektuotos energijos kaupimo sistemos pastoviam veikimui.

3.4. RF linijos impedanso derinimas

Ankstesniame skyriuje praktiniais matavimais nustatėme, kad daugiausiai galios radijo dažnių spektre perneša GSM 900 ir UMTS B8 dažnių juostos (jų dažniai persidengia), todėl turime priderinti RF grandinę būtent šiems dažniams. Tai atliksime matuodami RF linijos su prijungta antena S11 parametrus. Derinimui naudosime „Π“ tipo impedanso derinimo grandinę sudarytą iš pasyviųjų talpos ir induktyvumo komponentų. S11 parametrus matuosime naudodamiesi jau minėtu „R&S ZVL“ vektoriniu tinklo analizatoriumi.

Matavimus pradėdame nuo prietaiso kalibravimo. Tai reikalinga, nes ilgi ekranuoti kabeliai, naudojami RF linijos matavimams gali iškraipyti rodmenis, todėl būtinas šių iškraipymų kompensavimas. Šiam kalibravimo procesui naudojami trys priedai: trumpo jungimo antgalis, atviros linijos antgalis ir 50 Omų etaloninė apkrova. Kalibravimas atliekamas pasirinkus norimą matuoti dažnių ruožą. Šiuo atveju pasirinkome 700–2500 MHz dažnius. Atlikus kalibravimą, jį galima patikrinti naudojantis Smito diagrama ir jau minėtais priedais.

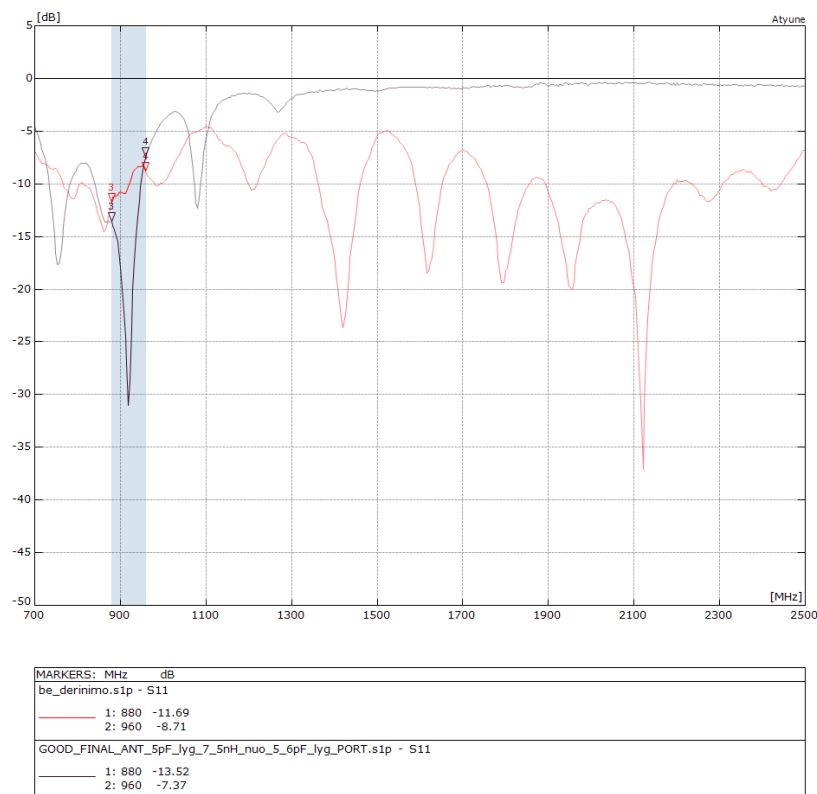
Atlikus kalibravimą, prisilituojame RF kabelį prie tuščios linijos, kurioje nėra jokių impedanso derinimo komponentų, o gale linijos prijungta antena. Gauname 3.13 paveikslėlyje pavaizduotą S11 charakteristiką. Pagal pirminius matavimus matome, kad linijos suderinimas minėtai dažnių juostai nėra blogas ir atitinka anksčiau apibrėžtą -6 dB S11 parametro kriterijų.



3.13 pav. RF linijos be impedanso derinimo S11 charakteristika

Kad būtų patogiau, programinės įrangos „Atyune“ aplinkoje pasižymėjome dažnių ruožą, kuriam norime priderinti mūsų liniją. Ši programa taip pat turi galimybę pasiūlyti komponentų nominalus, pagal vartotojo pasirinktą impedanso derinimo topologiją, tačiau iš praktikos žinome, kad šie pasiūlymai dažniausiai būna klaidingi. Todėl liniją derinsime naudodamiesi Smito diagrama.

Linijos derinimo naudojantis Smito diagrama detalai nenagrinėsime, nes ši metodika yra plačiai aprašyta mokslinėje literatūroje, tačiau galima paminėti, kad toks metodas geriausiai pritaikomas esant poreikiui suderinti liniją santykinai siaurai dažnių juostai, todėl šiuo atveju yra tinkamas. Derinant liniją buvo panaudoti du 0402 korpuso lygiagrečiai prijungti keramikiniai kondensatoriai ir vienas nuosekliai prijungtas induktyvumo elementas, tokiu būdu sudarant minėtą II tipo impedanso derinimo grandinę. Naudoti komponentų nominalai vadinant nuo antenos iki matavimo taško: 5 pF, 7,5 nH ir 5,6 pF. Po derinimo gauti rezultatai palyginti su linijos be impedanso derinimo S11 charakteristika (žr. 3.14 pav.). Matome, kad 880-960 MHz dažnių ruože suderintos linijos S11 charakteristika ženkliai pagerėjo ir rezultatai siekia net -30 dB.



3.14 pav. Suderintos RF linijos S11 charakteristika (juoda kreivė)

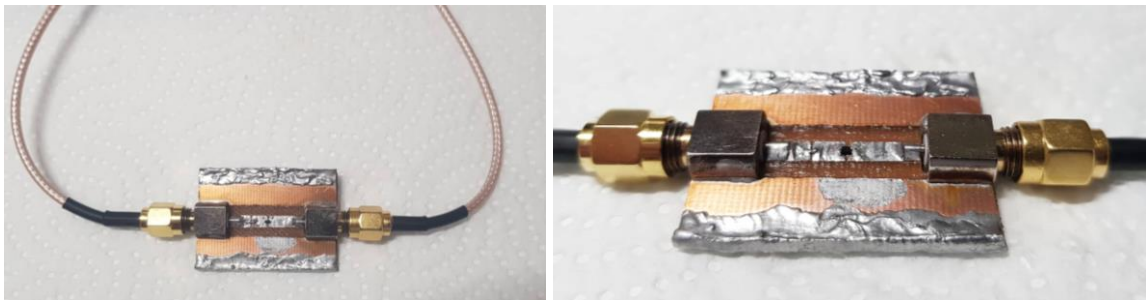
Toks linijos suderinimas šioje dažnių juostoje leidžia sumažinti sistemos galios nuostolius, tačiau slopina aukštesnio dažnio bangas. Tai nėra blogai, kai norima naudoti kelias, siaurai dažnių

juostai pritaikytas, RF linijas ir net rekomenduojama, norint išgauti didžiausią energijos surinkimo efektyvumą [20]. Taigi, galima teigti, kad linijos impedansas yra suderintas.

3.5. Radijo bangų lygintuvo S parametrų tyrimas

Šio darbo analizės dalyje minėjome, kad projektuojant radijo bangų lygintuvą, svarbiausia pasirinkti tinkamus diodus, kurie turėtų mažą sandūros talpą ir įtampos kritimą, esant tiesioginei srovei. To reikia, kad diodai galėtų efektyviai veikti su santykinai maža galia ir aukštais dažniais įėjime. Taigi šiame skyriuje aptarsime eksperimentinius diodų testus ir iš jų sudaryto lygintuvo matavimus.

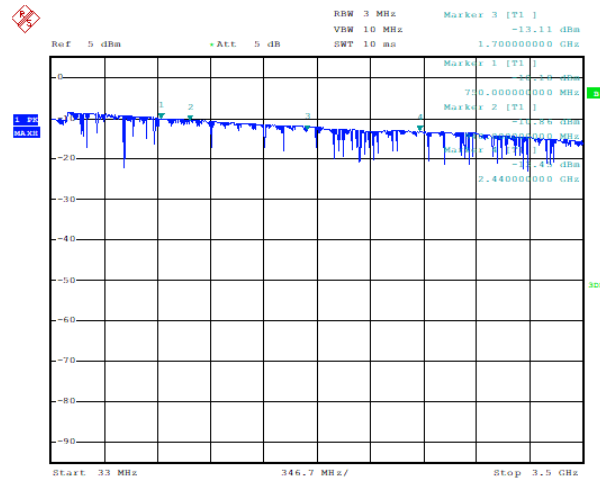
Pirmiausia reikia patikrinti diodų tinkamumą dažnių juostai. Tam reikės išmatuoti visų turimų diodų S21 parametro dažnines charakteristikas. Norėdami sudaryti kuo geresnes sąlygas šiam tyrimui, turime pasiruošti atskirą matavimui skirtą plokštę (žr. 3.15 pav.), kurios RF linijos impedansas būtų lygus $50\ \Omega$ kaip ir naudojamos matavimo įrangos prievadų. Taip pat reikia, kad linija būtų kuo trumpesnė ir tiesesnė, kad neatsirastų papildomų nuostolių ir matavimai būtų tikslūs.



3.15 pav. Diodų S21 parametrų matavimo plokštė

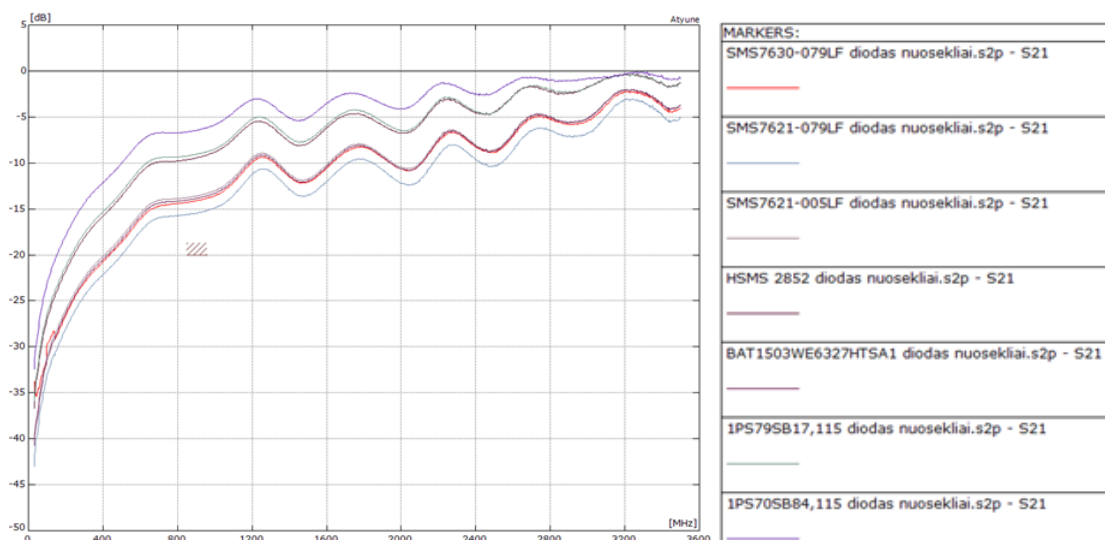
Pirmiausia išmatavome tuščios plokštės S21 charakteristiką ir įsitikinome, kad ji neįneša galios nuostolių, kurie galėtų daryti įtaką matavimų rezultatams. Tada nukirtome RF liniją išpjaudami siaurą vario juostelę. Pakartojome matavimus su nupjauta linija, siekdami įsitikinti, kad tarpas tarp vario takelių yra pakankamai didelis ir neveikia kaip talpos elementas. Toliau paeiliui litavome ir matavome šių diodų S21 charakteristikas: SMS7630-079LF, SMS7621-079LF, SMS7621-005LF, HSMS2852, BAT1503WE627HTSA1, 1PS79SB17, 1PS70SB84. Visi matavimai atlikti su -10 dBm galios lygiu linijos įėjime, nes pagal ankstesnius radijo dažnių spektro matavimus nustatėme, kad tokios ar mažesnės galios virpesiai gali būti sutinkami aplinkoje. Pakeitus galios lygį, S21 matavimų rezultatai skirtųsi, tačiau šiam diodų palyginimo testui pakanka ir vieno galios nustatymo. Dėl šios priežasties, prieš vertinant matavimų rezultatus, atlikome papildomą testą, kurio metu analizavome linijos įėjime gaunamos galios spektrą. Pagal gautus rezultatus, matome, kad galia linijos įėjime nuo

33 MHz iki 3500 MHz dažniuose kinta tarp -9 dBm ir -15 dBm (žr. 3.16 pav.). Šis galios kitimas dažnių spektre matavimų tikslumui tiesioginės įtakos neturi ir yra panaikinamas atliekant įrangos kalibravimą, tačiau pačių diodų S21 charakteristika priklauso nuo galios lygio, todėl vertinant tolimesnius rezultatus reikės į tai atsižvelgti.



3.16 pav. S21 matavimų linijos jėgimo galios dažnių spektras

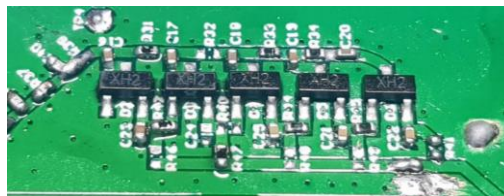
Minėtų diodų S21 charakteristikų matavimai patvirtino ankstesnius teiginius dėl diodų parinkimo svarbos projektuojant lygintuvo grandinę. Matome, kad „Nexperia“ gamintojo 1PS70SB84 diodai, palyginus su kitais, visame dažnių ruože pasižymi mažiausiu slopinimu (žr. 3.17 pav.). Taigi atliekant kitus tyrimus naudosime būtent šiuos diodus, nes pagal S21 charakteristiką matome, kad su jais galima pasiekti didžiausią lygintuvo grandinės efektyvumą.



3.17 pav. Diodų S21 charakteristika

Šio darbo analizės dalyje išrinkome SMS7621 diodus kaip tinkamiausius, todėl reikia palyginti Diksono lygintuvo efektyvumą su SMS7621 ir 1PS70SB84, kad įsitikintumėme ar

praktiniai matavimai su 1PS70SB84 diodais yra teisingi. Šiuos testus atlikome prisilutodami minėtus diodus prie suprojektuotos spausdintinės plokštės (žr. 3.18 pav.). Matavimams atlikti naudojome dvi Diksono lygintuvo pakopas, nes šio darbo analizės dalyje nustatėme, kad dvi pakopos leidžia gauti pakankamą įtampos lygį lygintuvo išėjime ir nepraranda didelio kiekio galios dėl papildomų pakopų įnešamų nuostolių linijoje.



3.18 pav. S21 matavimams naudotas Diksono lygintuvas

Lygintuvo efektyvumo matavimų rezultatai patvirtino, kad 1PS70SB84 diodai yra tinkamesni už SMS7621 (žr. 3.2 lentelę).

3.2 lentelė Diksono lygintuvų su skirtingais diodais tyrimo rezultatai

SMS7621							
Dažnis	Įėjimo galia, dBm	Galia įėjime, mW	Diksono pakopų skaičius	Apkrova, kΩ	Įtampa išėjime, mV	Galia išėjime, mW	Efektyvumas, %
941	-9,29	0,12	2	1,02	0,9	7,94E-07	0,001
	-6,43	0,23		1,02	5,2	2,65E-05	0,012
	-3,52	0,44		1,02	50,1	2,46E-03	0,553
	-0,37	0,92		1,02	201,1	3,96E-02	4,317
941	4,71	2,96	2	1,02	473,0	2,19E-01	7,415
	7,57	5,71		1,02	851,0	7,10E-01	12,424
	10,48	11,17		1,02	1440,0	2,03E+00	18,202
	13,63	23,07		1,02	2360,0	5,46E+00	23,671

1PS70SB84							
941	-9,29	0,12	2	1,02	1,3	1,66E-06	0,001
	-6,43	0,23		1,02	9,3	8,48E-05	0,037
	-3,52	0,44		1,02	58,0	3,30E-03	0,742
	-0,37	0,92		1,02	216,0	4,57E-02	4,981
941	4,71	2,96	2	1,02	555,0	3,02E-01	10,209
	7,57	5,71		1,02	942,0	8,70E-01	15,223
	10,48	11,17		1,02	1517,0	2,26E+00	20,201
	13,63	23,07		1,02	2370,0	5,51E+00	23,872

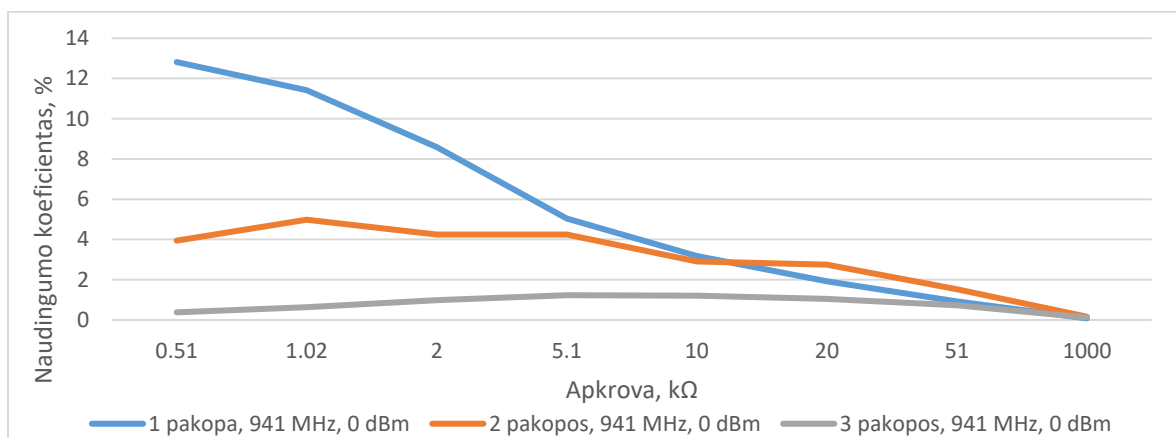
Tačiau galutiniai efektyvumo rezultatai skiriasi nedaug, todėl abu diodai yra tinkami. Taip pat matome, kad lygintuvo efektyvumas labai priklauso nuo įėjimo galios, todėl turėsime detaliau panagrinėti šią priklausomybę kituose testuose.

3.6. Sistemos su radijo bangų lygintuvu efektyvumo tyrimas

Bendras sistemos efektyvumo rodiklis susideda iš atskirų dedamųjų, kurios apibūdina atskiras sistemos dalis. Todėl prieš matuojant bendrą sistemos efektyvumą, turime įsitikinti, kad kiekviena dalis veikia optimaliai. Ankstesniuose skyriuose aptarėme antenos tinkamumą dažnių juostoms, linijos impedanso derinimą, lygintuvo grandinės diodų parinkimą ir optimaliausią radijo spektro dažnių juostą, kurią būtų galima naudoti energijos surinkimui. Šiame skyriuje nagrinėsime energijos kaupimo sistemos efektyvų panaudojimą ir įvertinsime bendrą sistemos naudingumo koeficientą.

Siekdami gauti geriausią energijos perdavimo efektyvumą tarp RF linijos ir energijos kaupimo sistemos, turime tinkamai parinkti mikroschemos įėjimo impedansą. Gamintojai šią problemą išsprendė integruodami automatinį įtampą didinančio keitiklio įėjimo impedanso valdymą. Šiuo atveju reikia nustatyti RF linijos apkrovą, su kuria energijos perdavimo efektyvumas būtų didžiausias ir šią apkrovą atitinkančio nominalo varžą sujungti su vienu iš mikroschemos išvadų. Tokiu būdu nurodomas reikiamas mikroschemos įėjimo impedansas ir integruota sistemos schema jį palaiko su nedideliu svyravimu nustatytos histerezės ribose. Taigi turime bandymų būdu nustatyti, kokia RF linijos apkrova leidžia pasiekti didžiausią energijos perdavimo efektyvumą.

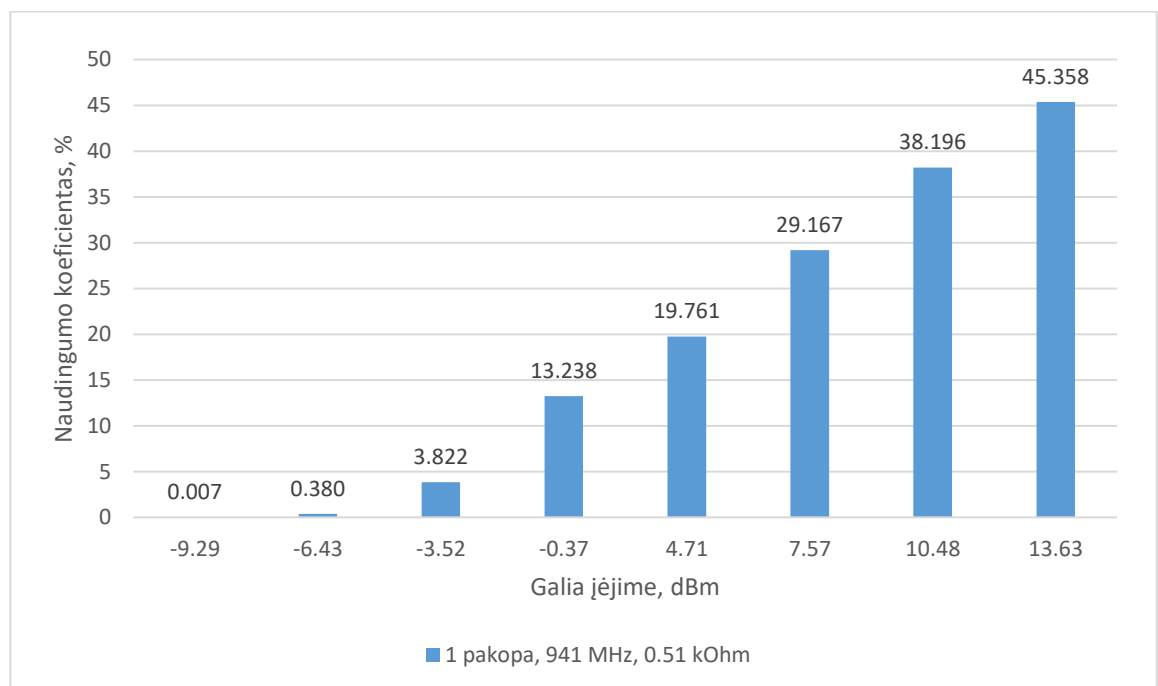
Matavimai buvo atliekami RF linijos įėjime generuojant pastovios 0 dBm galios, 941 MHz dažnio signalus ir matuojant įtampos kritimą ties pasirinkto dydžio apkrovos varža. tokiais būdu apskaičiavome linijos įėjimo ir išėjimo galių santykį ir gavome bendrą naudingumo koeficientą. Šiuos matavimus atlikome su skirtingo nominalo apkrovos varžomis, kol nustatėme ties kuria gaunamas didžiausias energijos perdavimo efektyvumas (žr. 3.19 pav.). Rezultatai parodė, kad 510 Ω apkrova sudaro sąlygas efektyviausiam energijos perdavimui.



3.19 pav. RF linijos naudingumo koeficiento priklausomybė nuo apkrovos

Taip pat analogiškus matavimus atlikome su skirtingais Diksono lygintuvo pakopų skaičiais, norėdami pamatyti, kokią įtaką tai turi bandymų rezultatams. Matome, kad vienos pakopos Diksono lygintuvas leidžia pasiekti didžiausią naudingumo koeficientą. Taip yra dėl jau minėtų nuostolių, kuriuos prideda kiekviena papildoma pakopa. Taigi kitus testus atliksime su vienos pakopos Diksono lygintu.

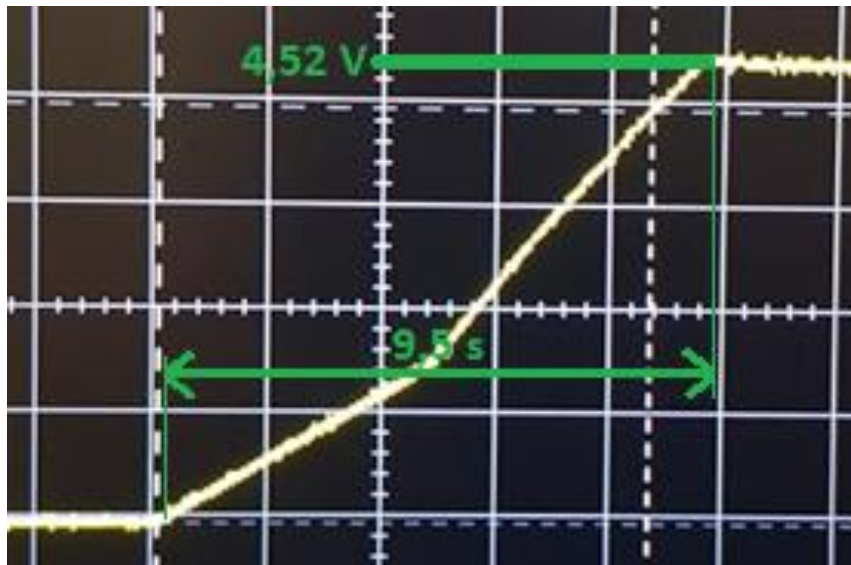
Nustatę tinkamą apkrovą, galime patikrinti kaip RF linijos naudingumo koeficientas priklauso nuo galios įėjime. Šiuos matavimus atlikome naudodami RF signalų generatorių, skirtingo dydžio atenuatorius ir RF signalų stiprintuvą. Visi galios lygiai buvo papildomai išmatuoti profesionaliu „R&S“ spektro analizatoriumi. Rezultatai parodė, kad didėjant galios lygiui beveik tiesiškai didėja ir išmatuojamas naudingumo koeficientas (žr. 3.20 pav). Taip yra, nes diodo ekvivalentinė varža mažėja didėjant srovei sandūroje [58]. Padidinus galią iki daugiau nei 10 dBm gaunamas jau apie 40 % naudingumo koeficientas. Toliau didinant galią galima būtų gauti ir didesnę naudingumo koeficientą, bet šie galios lygiai nėra prieinami aplinkoje, todėl tokie bandymai nėra aktualūs šiam darbui.



3.20 pav. RF linijos naudingumo koeficiento priklausomybė nuo įėjimo galios

RF linijos efektyvumas jau išmatuotas, todėl turime išsiaiškinti energijos kaupimo naudingumo koeficientą. Matavimus atliksime integrinio grandyno įėjime sužadindami 1 V įtampą ir apribodami srovę iki 1 mA. Išėjime matuosime įtampos kilimo greitį talpos elemente ir taip apskaičiuosime bendrą kaupimo sistemos naudingumą. 1 V įtampą pasirinkom, nes tik tokie įtampos

lygiai yra pasiekiami vienos Diksono pakopos lygintuvo išėjime, jei įėjimo signalas neviršija 10 dBm galios. Pagal mikroschemos gamintojo pateiktą dokumentaciją ties 1 V ir 1 mA srove įėjime ir 4,1 V įtampa išėjime, įtampą didinančio keitiklio naudingumo koeficientas turėtų būti apie 85 % [38], todėl bandymų rezultatai turėtų būti panašūs. Reikia įvertinti, kad matavimus atliksim kraudami talpą nuo 0 V iki 4,51 V (o ne ties 4,1 V kaip nurodo gamintojas), todėl naudingumo koeficientas nesieks maksimalios gamintojo nurodytos vertės, tačiau šie matavimai mums aktualesni, nes sužinosime bendrą talpos krovimo ciklo naudingumo koeficientą. Taigi, atlikę matavimus, gavome, kad 470 uF talpos elementą sistema įkrauna iki 4,52 V per 9,5 s (žr. 3.21 pav.).



3.21 pav. Energijos kaupimo sistemos naudingumo koeficiento matavimas

Panaudojus pateiktą formulę, apskaičiavome, kad talpos pakrovimo ciklo naudingumo koeficientas yra 50,94 %:

$$N = \frac{C_L V_{cap}^2}{2P_{in} T_{Vcap}} * 100;$$

Formulėje: C_L – talpos elemento talpa, V_{cap} – įtampa talpos elemente, N – naudingumo koeficientas, P_{in} – galia sistemos įėjime, T_{Vcap} – laikas, per kurį įtampa talpoje pasiekė V_{cap} vertę. Rezultatas parodo, kad vykdant pilną talpos elemento krovimo ciklą, efektyvumas mažėja, todėl optimaliausias sistemos veikimas yra, kai talpa visada palaikoma pakrauta.

Paskutinis etapas yra sukauptos energijos perdavimas apkrovai. Pasak integrinio grandyno dokumentacijos, įtampą žeminančio keitiklio naudingumo koeficientas yra 85 % prie visų talpos elemento įtampų, su kuriomis yra leidžiamas energijos perdavimas apkrovai [38].



3.22 pav. Energijos kaupimo sistemos naudingumo koeficiento matavimas ir formulė

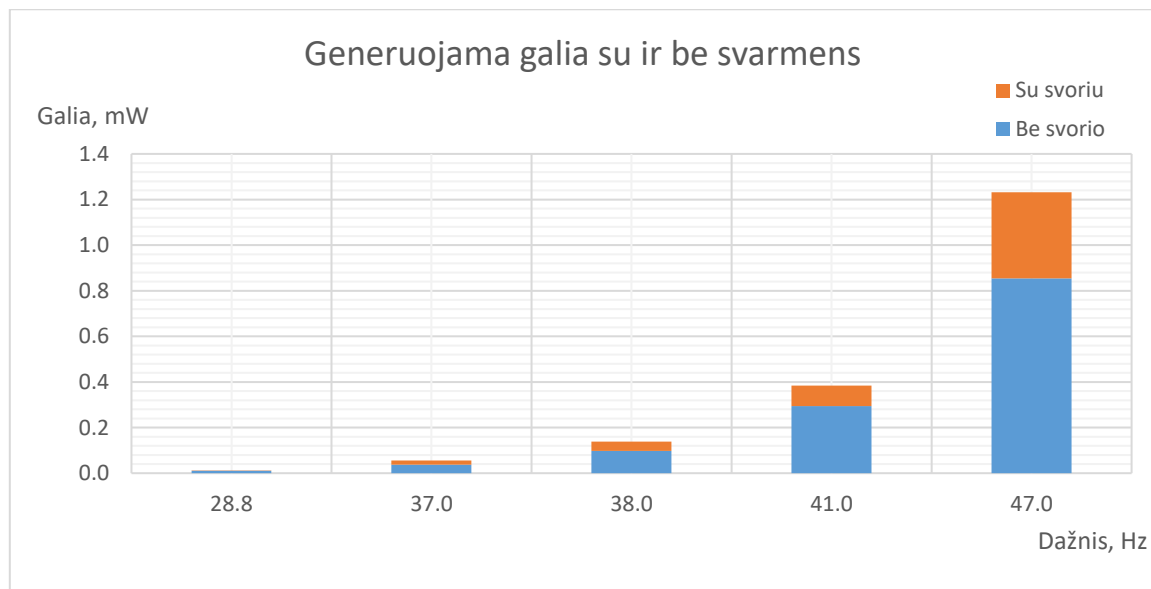
Tai galima patikrinti iškraunant talpos elementą pastovia apkrova per vieną iš integrinio grandyno stabilizuotos įtampos išvadų. Atlikus šį bandymą, gavome, kad prie 3 V įtampos talpos elemente, galios perdavimo naudingumo koeficientas yra 86,81 % (žr. 3.22 pav.). Šis rezultatas atitinka gamintojo nurodytą įtampą žeminančio keitiklio naudingumo koeficientą.

4. ENERGIJOS SURINKIMO BŪDŲ TYRIMO REZULTATAI

Ankstesniuose skyriuose atlikome kinetinės ir radijo bangų energijos surinkimo metodų tyrimus. Šiame skyriuje aptarsime gautus rezultatus, palyginsime su hipotezėmis, iškeltomis analizės dalyje, ir padarysime išvadas pagal eksperimentiniu būdu atliktus matavimus.

4.1. Kinetinės energijos gavybos tyrimo rezultatai

Tyrimo eigoje analizuojant literatūros šaltinius pastebėta, jog didžioji dalis tyrimų su svirties konstrukcijos PEG naudoja papildomą svorį ant generatoriaus galo. Nuspręsta šią tendenciją patikrinti eksperimentiškai, lyginant galią apkrovoje, kai naudojamas tas pats keitiklis su ir be svarmens. Bandymo metu pirmiausia išmatuoti vienpusio keitiklio rezonansiniai dažniai ir galia lygintuvo išėjime, didinant masę ant galiuko iki X gramų. Visais matavimais PEG buvo aukščiausio rezonansinio dažnio pozicijoje laikiklyje, o svoris pridodamas įsukant varžtą į ant keitiklio tvirtai priklijuotą veržlę. Toliau, PEG buvo suderintas tiems patiems dažniams, bet be papildomos masės ant galiuko ir vėl buvo išmatuota galia lygintuvo išėjime. Generuojama galia palyginta 4.1 pav.:



4.1 pav. Svorio ant PEG galiuko įtaka generuojamai galiai

Bandymas buvo atliktas gerai pritvirtinus vienpusį keitiklį prie nejudančio paviršiaus, nekeičiant atstumo tarp keitiklio ir vibratoriaus. Įtampos lyginimui naudotas diodų tiltelis su 1N5718 diodais. Matome, kad visais atvejais tame pačiame dažnyje keitiklis su papildomu svoriu ant galiuko generuoja daugiau galios. Vidutiniškai keitiklio derinimas su svoriu leido pasiekti 36 % didesnę galią išėjime.

4.2. Radijo bangų energijos gavybos tyrimo rezultatai

Eksperimentinių tyrimų skyriuje atlikome bandymus su atskiromis radijo bangų energijos kaupimo sistemos dalimis. Aiškinomės kiekvienos sistemos komponentės naudingumo koeficientus ir nuo ko jie priklauso. Šiame skyriuje apibendrinsime visus rezultatus, apskaičiuosime visos radijo bangų energijos kaupimo sistemos naudingumo koeficientą ir pateiksime išvadas dėl veiksnių, kurie daro didžiausią įtaką šiam rodikliui.

Tyrimų rezultatai parodė, kad radijo bangų energijos kaupimo efektyvumas priklauso nuo virpesių dažnio, jų galios sistemos įėjime, Diksono lygintuvo pakopų skaičiaus, linijos impedanso suderinimo, lygintuvo diodų parametrų, apkrovos varžos dydžio, talpos elemento panaudojimo pobūdžio ir net nuo stebėtojo geografinės padėties. Todėl skaičiuodami sistemos bendrą naudingumo koeficientą turėsime apsibrėžti tam tikras nekintamas sąlygas, kurias tyrimų metu nustatėme kaip palankiausias didžiausiam energijos perdavimo efektyvumui. Minėtos sąlygos yra: 941 MHz dažnis sistemos įėjime, suderinto impedanso RF linija, vienos pakopos Diksono daugintuvas su 1PS70SB84 dvigubu diodu, skirtingų nominalų kondensatoriai lygiagrečiai IC įėjimui, IC įėjimo impedansas $510\ \Omega$, talpos elementas pakrautas iki 4,5 V ir apkrova sistemos išėjime nėra didesnė už talpos elemento krovimo greitį.

Nustačius minėtas sąlygas ir pasinaudojus eksperimentinių tyrimų rezultatais, galime apskaičiuoti bendrą sistemos naudingumo koeficientą (žr. 4.1 lentelę). Skaičiavimų rezultatai parodė, kad sistemos naudingumo koeficientas labai priklauso nuo radijo bangų galios įėjime.

4.1 lentelė. Bendro sistemos naudingumo koeficiento skaičiavimų rezultatai

RF dažnis. MHz	RF galia sistemos įėjime, dBm	RF galia sistemos įėjime, mW	Galia IC įėjime, mW	Galia talpos elemente, mW	Galia IC išėjime, mW	Bendras naudingumo koeficientas, %
941	-9,29	0,12	7,84 E-06	0	0	0,00
941	-6,43	0,23	8,65 E-04	0	0	0,00
941	-3,52	0,44	1,70 E-02	1,45 E-02	1,25 E-02	2,82
941	-0,37	0,92	0,12	0,10	8,97 E-02	9,77
941	4,71	2,96	0,59	0,50	0,43	14,58
941	7,57	5,72	1,67	1,42	1,23	21,52
941	10,48	11,17	4,27	3,63	3,15	28,18
941	13,63	23,07	10,46	8,89	7,72	33,47

Taip pat lentelėje matome, kad didžiausias galios nuostolis atsiranda radijo signalų lyginimo etape. Prie žemesnės galios lygių sistemos įėjime matome, kad nustoja veikti energijos kaupimo grandinė. Taip yra, nes integrinis grandynas AEM30940 pradeda veikti nuo $3\ \mu\text{W}$ galios įėjime, o Diksono lygintuvo slopinimas šiomis sąlygomis toks didelis, kad šis galios lygis nėra pasiekiamas. Didžiausias gautas sistemos naudingumo koeficientas yra 33,47 %, tačiau šis rezultatas pasiekiamas su galios lygiais įėjime, kurie nėra dažnai sutinkami kasdienėje aplinkoje. Taigi tolesniuose bandymuose turėsime gerinti Diksono lygintuvo grandinės naudingumo koeficientą arba rinktis kito tipo grandinę. Nepaisant to, gauti energijos lygiai sistemos išėjime yra pakankami WSN įrenginių maitinimui, nes tokio tipo jutikliai didžiąją dalį laiko praleidžia miego režimuose, o tipinis BLE jutiklis gali veikti nuo $10\ \mu\text{W}$ galios.

APIBENDRINIMAS. IŠVADOS

Šio darbo metu atlikome aplinkos energijos naudojimo metodų analizę ir pasirinkome tirti detaliau du – kinetinės ir radijo bangų energijos panaudojimą. Tyrimai parodė, kad abi šios technologijos yra tinkamos mažos galios sistemoms maitinti. Šių metodų struktūriniai panašumai leido suprojektuoti įrangą, galinčią vienu metu pritaikyti abiejų tipų energijos gavybą ir sumažinti galios šaltinio nepastovumo riziką. Atlikdami tyrimą padarėme šias išvadas:

1. Efektyviausią kinetinės energijos keitimo sistemą įgyvendinti lengviausia naudojant pjezoelektrinį metodą. Tokių keitiklių projektavimas yra paprasčiausias, jie yra pakankamai patvarūs ir generuoja santykinai aukštas įtampas.
2. Geriausią išgaunamos galios ir patvarumo santykį turi svirties konstrukcijos PEG. Dėl savo sandaros paprastumo, nesunku pasidaryti svirties prototipus ir juos gaminti masiškai. Taip pat eksperimentiškai įrodyta, kad tokios konstrukcijos generuojama galia nėra mažesnė nei kitų PEG struktūrų.
3. Dažniausiai tinkamiausia medžiaga keitikliui yra PZT. Tai pasaulyje plačiausiai naudojama pjezoelektrinė medžiaga, reiškianti stabilią tiekimo grandinę gaminant masiškai. PZT elektriniai parametrai yra pakankamai geri, o apsisaugoti nuo problemų, susijusių su jos trapumu, galima atsargiai projektuojant ir ribojant svyravimų amplitudę.
4. Pjezoelektrinių keitiklių kuriamai įtampai lyginti labai tinka paprastas diodų tiltelis. Kadangi PEG įtampos amplitudė yra voltų eilės, įtampos kritimas dioduose nėra toks reikšmingas galutiniam rezultatui.
5. Norint išgauti maksimalų diodų tiltelio naudingumą reikia parinkti diodus su kuo mažesne tiesiogine įtampa ir stabilizavimo kondensatoriaus talpą nustatyti pagal aplinkos vibracijų dažnį ir amplitudę. Diegiant svirties konstrukcijos PEG, siekiant didžiausios galios, jį reikia derinti ne tvirtinimo pozicija, o mase ant svyruojančio galiuko.
6. Eksperimentų metu nustatyta, kad didžiausią galią Lietuvos radijo dažnių spektre perneša GSM 900 ir UMTS B8 dažnių juostos.
7. Radijo bangų lygintuvo grandinės naudingumo koeficientas yra tiesiogiai proporcingas virpesių galiai lygintuvo įėjime. Taip yra, nes diodų ekvivalentinė sandūros varža mažėja didėjant per ją tekančiai elektros srovei. Taip pat diodų slenkstinė įtampa yra per didelė labai mažos galios virpesiams.

8. Didžiausias radijo bangų lyginimo naudingumo koeficientas pasiektas su vienos pakopos Diksono lygintuvu. Tyrimų metu nustatyta, kad tinkamiausi šiam lygintuvui yra „Nexperia“ gamintojo 1PS70SB84 diodai.
9. Bandymų metu nustatyta, kad didžiausias energijos perdavimo naudingumo koeficientas gaunamas, kai RF linijos apkrova yra 510Ω .
10. Energijos kaupimo ir perdavimo sistema veikia efektyviausiai, kai talpos elementas yra įkrautas, todėl geriausios veikimo sąlygos pasiekiamos, kai galia sistemos įėjime viršija galią, atiduodamą apkrovai.
11. Abu tirti aplinkos energijos naudojimo metodai leidžia pasiekti pakankamus galios lygius WSN sistemoms maitinti, tačiau jų efektyvumas labai priklauso nuo aplinkos sąlygų. Suprojektuota energijos kaupimo sistema leidžia sumažinti šią riziką ir pritaikyti abu metodus vienu metu.

LITERATŪRA

1. Raj, A. ir Steingart, D. (2018). Review – Power Sources for the Internet of Things. *Journal of The Electrochemical society*, 165(8), 3130–3136.
2. Nordrum, A. (2016). Popular Internet of Things Forecast of 50 Billion Devices by 2020 Is Outdated. Prieiga per internetą: <https://spectrum.ieee.org/tech-talk/telecom/internet/popular-internet-of-things-forecast-of-50-billion-devices-by-2020-is-outdated>
3. Anton, S. R. ir Sodano, H. (2007). A Review of Power Harvesting Using Piezoelectric Materials (2003–2006). *Smart Materials and Structures*, 16(3), 1–21 .
4. Twiefel, J. ir Werstermann, H. (2013). Survey on broadband techniques for vibration energy harvesting. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 24(11), 1291–1302.
5. Aljadiri, R. T., Taha, L. Y. ir Ivey, P. (2017). Electrostatic Energy Harvesting Systems: A Better Understanding of Their Sustainability. *Journal of Clean Energy Technologies*, 5(5), 409–416.
6. Toprak, A. ir Tigli, O. (2017). Piezoelectric Energy Harvesting: State-Of-The-Art and Challenges. *Applied Physics Reviews*, 1(3), 103–115.
7. Selvan, K. ir Ali, S. (2016). Micro-scale energy harvesting devices: Review of methodological performances in the last decade. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1035–1047.
8. Liu, H., Lee, C. ir Kobayashi, T. (2012). Piezoelectric MEMS-based wideband energy harvesting systems using a frequency-up-conversion cantilever stopper. *Sensors and Actuators A: Physical*, 186, 242–248.
9. Yuan, Q., Sun, X. ir Fang, D. (2011). Design and microfabrication of integrated magnetic MEMS energy harvester for low frequency application. *Solid State Sensors and Actuators (transducers)*, 23(1), 204–211.
10. Tao, K., Ding, G. ir Wang, P. (2012). Fully integrated micro electromagnetic vibration energy harvesters with micro-patterning of bonded magnets. Iš *IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)* (65–91). Paryžius: IEEE.
11. Altena, G., Hohfeld, D. ir Elfrink, R. (2011). Design, modeling, fabrication and characterization of an electret-based MEMS electrostatic energy harvester. *Solid State Sensors and Actuators (transducers)*, 23(1), 113–129.
12. Selvan, K., Hazan, N. ir Ali, M. (2018). Methodological reviews and analyses on the emerging research trends and progresses of thermoelectric generators. *International Journal of Energy Research*, 46(1), 113–140.

13. Zeng, G. ir Bakh, J. (2007). ErAs: (InGaAs) $_{1-x}$ (InAlAs) $_x$ alloy power generator modules. *Appl. Phys. Lett*, 91(26), 510–513.
14. Kishi, M. ir Nemoto, H. (1999). Micro thermoelectric modules and their application to wristwatches as an energy source. Iš *Eighteenth International Conference on Thermoelectrics Proceedings* (27–37). Baltimorė: IEEE.
15. Espinosa, N. ir Lazard, M. (2010). Modeling a Thermoelectric Generator Applied to Diesel Automotive Heat Recovery. *Journal of Electronic Materials*, 39(9), 1446–1455.
16. Iezzi, B. ir Ankireddy, M. (2017). Printed, metallic thermoelectric generators integrated with pipe insulation for powering wireless sensors. *Applied energy*, 208, 758–765.
17. Fang J., N., Frederich, H. ir Pilon, L. (2010). Harvesting Nanoscale Thermal Radiation Using Pyroelectric Materials. *Journal of Heat Transfer*, 132(9), 1–15.
18. Kim, S., Vyas, R., Bito, J., Niotaki, K., Collado, A., Georgiadis, A., & Tentzeris, M. M. (2014). Ambient RF energy-harvesting technologies for self-sustainable standalone wireless sensor platforms. *Proceedings of the IEEE*, 102(11), 1649-1666.
19. Seybold, J. S. (2005). *Introduction to RF propagation*. John Wiley & Sons.
20. Muncuk, U., Alemdar, K., Sarode, J. D., & Chowdhury, K. R. (2018). Multiband ambient RF energy harvesting circuit design for enabling batteryless sensors and IoT. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(4), 2700-2714.
21. Parks, A. N., & Smith, J. R. (2015, May). Active power summation for efficient multiband RF energy harvesting. In *2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium* (pp. 1-4). IEEE.
22. Abdulhasan, R. A., Mumin, A. O., Jawhar, Y. A., Ahmed, M. S., Alias, R., Ramli, K. N., ... & Audah, L. H. M. (2017). Antenna Performance Improvement Techniques for Energy Harvesting: A Review Study. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 8(1).
23. Divakaran, S. K., & Krishna, D. D. (2017, December). An Overview of Compact Antennas for RF Energy Harvesting. In *2017 IEEE International WIE Conference on Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE)* (pp. 47-50). IEEE.
24. Cansiz, M., Altinel, D., & Kurt, G. K. (2019). Efficiency in RF energy harvesting systems: A comprehensive review. *Energy*, 174, 292-309.
25. Dai, H., Lu, Y., Law, M. K., Sin, S. W., Seng-Pan, U., & Martins, R. P. (2015, March). A review and design of the on-chip rectifiers for RF energy harvesting. In *2015 IEEE International Wireless Symposium (IWS 2015)* (pp. 1-4). IEEE.

26. Vyas, R. J., Cook, B. B., Kawahara, Y., & Tentzeris, M. M. (2013). E-WEHP: A batteryless embedded sensor-platform wirelessly powered from ambient digital-TV signals. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, 61(6), 2491-2505.
27. Energy-Harvesting Charger and Protector. Maxim Integrated [žiūrėta 2019 m. lapkričio 11 d.] Prieiga per internetą: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX17710.pdf>
28. P2110 – 915 MHz RF Powerharvester™ Receiver. PowerCast [žiūrėta 2019 m. lapkričio 11 d.] Prieiga per internetą: https://eu.mouser.com/datasheet/2/329/powercast_p2110-datasheet-1198788.pdf
29. Kuhn, V., Lahuec, C., Seguin, F., & Person, C. (2015). A multi-band stacked RF energy harvester with RF-to-DC efficiency up to 84 %. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 63(5), 1768-1778.
30. Collado, A. ir Georgiadis A. (2013). Conformal hybrid solar and electromagnetic(EM) energy harvesting rectenna. *IEEE Transactions on Circuits and System I: Regular Papers*, 60(8), 2225–2234.
31. Song, C., Huang, Y., Zhou, J., & Carter, P. (2017, March). Recent advances in broadband rectennas for wireless power transfer and ambient RF energy harvesting. *In 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)* (pp. 341-345). IEEE.
32. Judriojo ryšio tinklų tikėtinos aprėpties zonos. Lietuvos ryšių reguliavimo tarnyba. [žiūrėta 2020 m. gegužės 9 d.]. Prieiga per internetą: <http://epaslaugos.rtt.lt/apreptis/>
33. Tele2 operatoriaus naudojamų dažnių juostos Lietuvoje. . [žiūrėta 2020 m. gegužės 9 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.frequencycheck.com/carriers/tele2-lithuania>
34. Yan, H., Montero, J. M., Akhnoukh, A., De Vreede, L. C., & Burghartz, J. (2005, November). An integration scheme for RF power harvesting. *In Proc. STW Annual Workshop on Semiconductor Advances for Future Electronics and Sensors* (Vol. 2005, pp. 64-66).
35. Voltage multiplier circuits explained. Swagatam. [žiūrėta 2020 m. gegužės 10d.]. Prieiga per internetą: <https://www.homemade-circuits.com/voltage-doubler-circuits-explored/>
36. Nintanavongsa, P., Muncuk, U., Lewis, D. R., & Chowdhury, K. R. (2012). Design optimization and implementation for RF energy harvesting circuits. *IEEE Journal on emerging and selected topics in circuits and systems*, 2(1), 24-33.
37. AEM40940 datasheet [žiūrėta 2020 m. lapkričio 10 d.]. Prieiga per internetą: https://e-peas.com/wp-content/uploads/2020/04/E-peas_RF_Energy_Harvesting_Datasheet_AEM40940.pdf

38. AEM30940 datasheet [žiūrėta 2020 m. lapkričio 28 d.]. Prieiga per internetą: https://e-peas.com/wp-content/uploads/2020/04/E-peas_RF_Energy_Harvesting_Datasheet_AEM30940.pdf
39. *WHAT IS “PZT”?* (n. d.). Prieiga per internetą: <https://www.americanpiezo.com/piezo-theory/pzt.html>
40. Lee C. S., Joo J., Han S., Lee J. H. ir Koh S. K. (2005). Poly (vinylidene fluoride) transducers with highly conducting poly (3,4-ethylenedioxythiophene) electrodes. *Synthetic Metals*, 152(3), 49–52.
41. Ericka, M., Vasic, D. ir Costa, F. (2005). Energy harvesting from vibration using a piezoelectric membrane. *Journal de Physique IV (Proceedings)*, 128, 187–193.
42. Twiefel, J. ir Westermann, H. (2013). Survey on broadband techniques for vibration energy harvesting. *Journal of Intelligent Materials and Structures*, 24(11), 1291–1302.
43. Soliman M., Abdel-Rahman E. ir El-Saadany E. (2008). A wideband vibration-based energy harvester. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 18, 115–121.
44. Blystad L. ir Halvorsen E. (2011). An energy harvester driven by colored noise. *Smart Materials and Structures*, 20(2), 25–36.
45. Challa V., Prasad M. ir Shi Y. (2008). A vibration energy harvesting device with bidirectional resonance frequency tunability. *Smart Materials and Structures*, 17, 1–10.
46. Roundy S., Wright P. K. ir Rabaey J. (2003). A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes. *Computer Communications*, 26(11), 1131–1144.
47. Shen, D. (2009). *Piezoelectric energy harvesting devices for low frequency vibration applications*. Oburnas: Oburno universitetas.
48. Rashmi S., Saleh A., Aftab A. ir Mohammad M. (2020). A Design of Vibration-Sourced Piezoelectric Harvester for Battery-Powered Smart Road Sensor Systems. *IEEE Sensors Journal*, 20(23), 13940–13949.
49. Yang, B., Tofel, P., Zdenek, H. ir Smilek, J. (2018). Investigation of a cantilever structured piezoelectric energy harvester used for wearable devices with random vibration input. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 106, 303–318.
50. Roundy, S. ir Wright, P. K. (2004). A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics. *Smart Materials and Structures*, 13(5), 1131–1142.
51. Huidong, L., Chuan, T. ir Zhiqun, D. D. (2014). Energy harvesting from low frequency applications using piezoelectric materials. *Applied Physics Reviews*, 1(4), 1–21.
52. Mateu, L. ir Moll, F. (2005). Optimum Piezoelectric Bending Beam Structures for Energy Harvesting using Shoe Inserts. *Journal of Intelligent Material Structures*, 16(10), 835–845.

53. Sodano, H. A., Granstrom, J., Feenstra, J. ir Farinholt K. (2008). Powering MEMS portable devices—a review of non-regenerative and regenerative power supply systems with special emphasis on piezoelectric energy harvesting systems. *Smart Materials and Structures*, 17, 52–65.
54. Siang, J., Lim, M. H., Salman Leong, M. (2018). Review of vibration-based energy harvesting technology: Mechanism and architectural approach. *International Journal of Energy Research*, 42(16), 1866–1893.
55. JLCPCB impedance control [žiūrėta 2020 m. lapkričio 30 d.]. Prieiga per internetą: https://jlcpcb.com//quote/pcbOrderFaq/PCB%20Stackup?_ga=2.231860311.930627373.1611610379.2141699237.1564589916&_gac=1.93413871.1611610379.CjwKCAiA9bmABhBbEiwASb35V7NqQMlp20BcNEi6SsX3WSrXBZWq_m6LlGo-SNnj5FrqkUM4kCZ7SRoC6dAQAvD_BwE
56. JLCPCB manufacturing capabilities [žiūrėta 2020 m. lapkričio 30 d.]. Prieiga per internetą: <https://jlcpcb.com/capabilities/Capabilities>

PRIEDAI

A priedas. 24-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos medžiaga bei geriausio pranešimo apdovanojimai



VILNIAUS GEDIMINO
TECHNIKOS UNIVERSITETAS

EFEKTYVUS APLINKOS ENERGIJOS PANAUDOJIMAS MAŽOS GALIOS SISTEMOSE

Vytenis Akstinas, EKSfm-19
Darius Mališauskas, EKSfm-19

Darbo vadovas: doc. dr. Andrius Katkevičius

1

VILNIAUS GEDIMINO
TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Pagrindiniai gavybos būdai

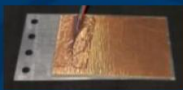
- Iš mechaninių virpesių.
- Iš temperatūros svyravimų.
- Iš šviesos
- Iš radijo bangų

2

VILNIAUS GEDIMINO
TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Pjezoelektriniai keitikliai

- Tyrimuose naudoti keitikliai:

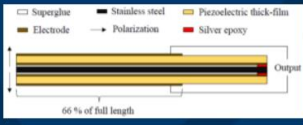


Vienpusis keitiklis



Dvipusis keitiklis

- Sandara:



3

VILNIAUS GEDIMINO
TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Testavimo struktūra

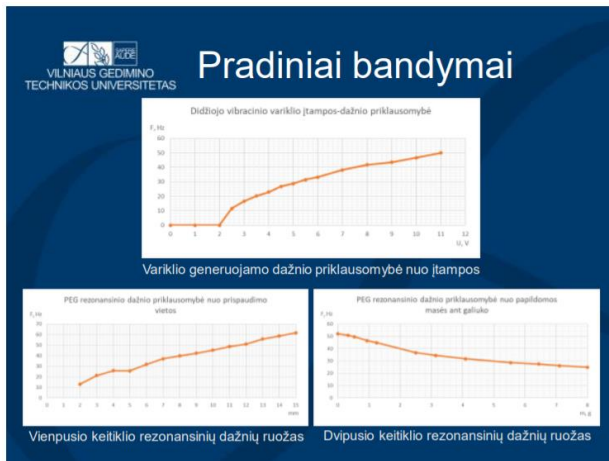
1. Stacionarus stendas



2. Nešiojamas laikiklis



4



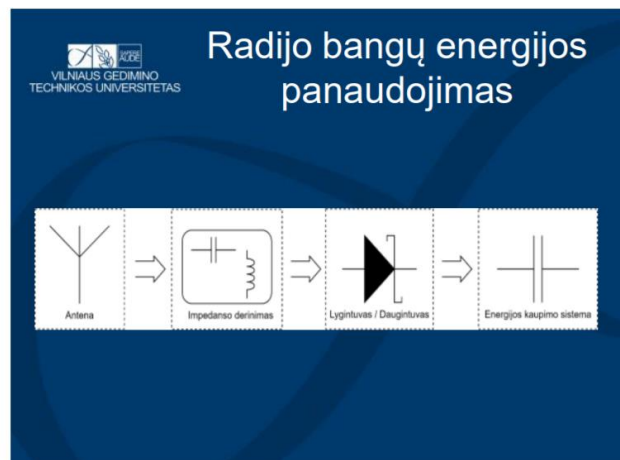
5



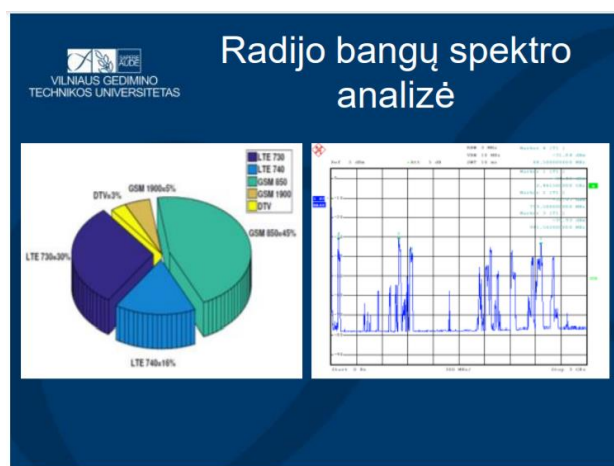
6



7



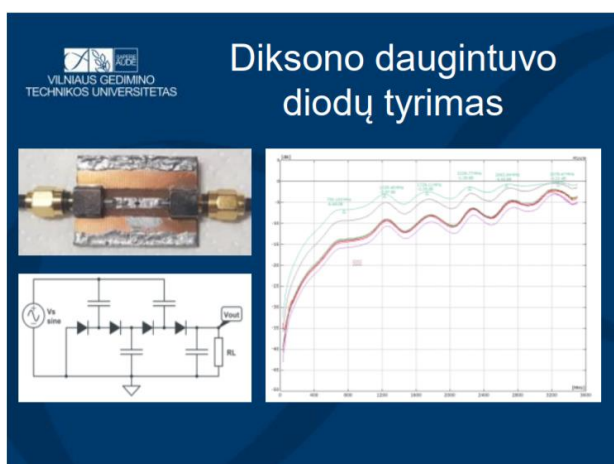
8



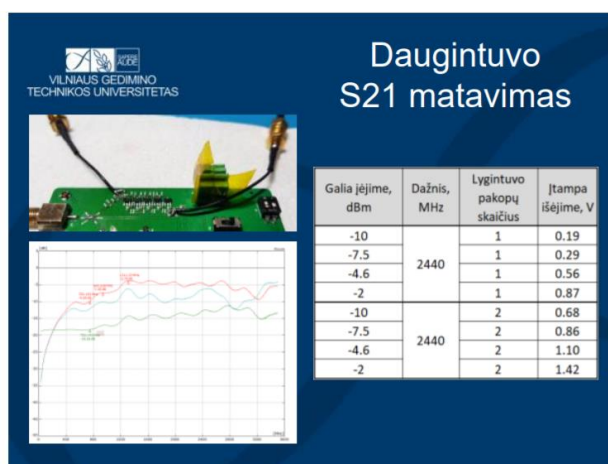
9



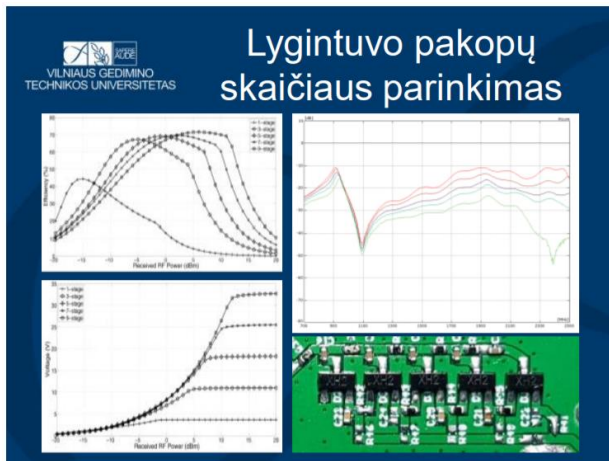
10



11



12



13

VILNIAUS GEDIMINO
TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Išvados

- Virpesių galios lygiai aplinkoje labai žemi, todėl būtina efektyvi ir suderinta sistema.
- Daugiausiai radijo bangų galios perneša žemų dažnių GSM ir LTE bangos.
- Efektyvumui didelę įtaką daro sistemos priderinimas darbiniais dažniais bei virpesių lyginimo grandinės naudingumo koeficientas.
- Įmanoma išgauti reikiamą energijos kiekį žemo suvartojimo sistemoms maitinti, tačiau tam stiprią įtaką daro aplinkos sąlygų pokyčiai.

14

VILNIAUS GEDIMINO
TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Literatūra

- Bai Y., Tofel P., Hadas Z. 2018. Investigation of a cantilever structured piezoelectric energy harvester used for wearable devices with random vibration input, *Mechanical Systems and Signal Processing* 106:303-318
- Judriojo ryšio tinklų tikėtinos aprėpties zonos. Lietuvos ryšių reguliavimo tarnyba. [žiūrėta 2021 m. vasario 9 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.rtt.lt/lt/naudojimas/2018-02-09>
- Tele2 operatoriaus naudojamos dažnių juostos Lietuvoje. [žiūrėta 2021 m. vasario 9 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.tele2.lt/lt/naudojimas/2018-02-09>
- Multi-band Ambient RF Energy Harvesting Circuit Design for Enabling Battery-less Sensors and IoTs, IEEE, 2018 m.
- H. Yan, J. G. M. Montero, A. Akhouch, L. C. N. de Vreede, and J. N. Burghart. An integration scheme for RF power harvesting. Workshop Semiconductor Advances Future Electron. Sensors, Veldhoven, The Netherlands, 2005
- M. Cansiz et al. „Efficiency in RF energy harvesting systems: A comprehensive review“, Elsevier Ltd., 2019
- Nintanavongsa, P., Muncuk, U., Lewis, D.R., Chowdhury, K.R., 2012. Design Optimization and Implementation for RF Energy Harvesting Circuits. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems. doi:10.1109/jetcas.2012.2187106

15

VILNIAUS GEDIMINO
TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Klausimai

16