



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

Gediminas Žukaitis

**BELAIDŽIAI ULTRAGARSINIAI SENSORIAI MONITORINGO
SISTEMOMS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Prof. dr. Liudas Mažeika

KAUNAS, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROINIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

**BELAUDŽIAI ULTRAGARSINIAI SENSORIAI MONITORINGO
SISTEMOMS**

Baigiamasis magistro projektas
Elektronikos inžinerija (kodas 621H61002)

Vadovas

(parašas) Prof. dr. Liudas Mažeika
(data)

Recenzentas

(parašas) Doc. Dr. Andrius Chaziachmetovas
(data)

Projektą atliko

(parašas) Gediminas Žukaitis
(data)

KAUNAS, 2016



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Gediminas Žukaitis

(Studento vardas, pavardė)

Elektronikos inžinerija (kodas 621H61002)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Belaidžiai ultragarsiniai sensoriai monitoringo sistemoms“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 ____ m. _____ d.

Kaunas

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

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Žukaitis, G. Belaidžiai ultragarsiniai sensoriai monitoringo sistemoms. Elektronikos inžinerijos magistro baigiamasis projektas / vadovas Prof. dr. Liudas Mažeika; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektronikos inžinerijos katedra.

Kaunas, 2016. 56 psl.

SANTRAUKA

Tiriamąo darbo tikslas – ištirti belaidžių ultragarsinių sensorių sukūrimo galimybes. Paprastai terminas "sensorius" net nenaudojamas, kadangi norint atlikti matavimus reikia sugeneruoti, priimti ir apdoroti ultragarsinius signalus. Elektroninė dalis šių funkcijų atlikimui yra pakankamai sudėtinga ir brangi, tačiau rinkoje yra nemenkas poreikis sąlyginai paprastų, autonominių ultragarsinių sistemų, kurias būtų galima įvardinti kaip sensorius. Todėl šio darbo tikslas yra ištirti mažų, belaidžių, sąlyginai pigių mikro-ultragarsinių sistemų, kurias būtų galima įvardinti kaip ultragarsinis sensorius, sukūrimo galimybes, ištirti tokių sistemų konfigūracijas bei parametrus, priklausomai nuo naudojamų ultragarsinių bangų dažnio, matavimų pasikartojamumo periodo, kaupiamų/perduodamų signalų trukmių, įvertinti galimas pasiekti šių prietaisų parametrų ribas. Tiriamajame darbe tokių sistemų architektūroje išskirtos trys dalys – mikrovaldiklis, analoginė ir komunikacinė dalys. Kiekviena iš jų tirta įvertinant galimus ultragarsinės sistemos darbinis dažnius, energijos poreikius, matavimų periodiškumą, galima suspaudimo lygį pagal minimalius matmenis ir kainą. Tyrimų rezultatai parodė, kad pagrindinis faktorius ribojatis tokių sistemų mažinimo galimybes ir jų autonominio darbo laiką yra energetinių resursų poreikis.

Reikšminiai žodžiai: ultragarsas, sensoriai, neinvaziniai tyrimai

Žukaitis, Gediminas. Wireless ultrasonic sensors for monitoring systems. Final project of masters degree in Electronics engineering / supervisor Prof. dr. Liudas Mažeika; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Department of Electronics Engineering

Kaunas, 2016. 56 p.

SUMMARY

The aim of this research is to study the abilities of creating wireless ultrasonic sensors. Usually, the term “sensor” isn’t even used to describe such devices, because, in order to perform measurements, ultrasonic signal has to be generated, acquired and processed. The electronic part, used to complete such tasks is quite complex and expensive; however, market demands considerable need for simple autonomic ultrasonic systems, which could be described as sensors. In this case, aim of this research is to study abilities to create relatively small ultrasonic micro-systems, which could be referred to as a sensor, study possible configurations and parameters, of the system, as well as dependencies and limits of system’s parameters such as generated signal frequency, frequency of measurement and length of the stored signal. During the research, system of interest was divided into three parts – microcontroller, analog part, and communication module. Every single of these parts was studied individually, determining possible working frequencies, energy consumption, frequency of measurements, possible size and price figures of the system. Results of the research have shown, that the main factor, which limits possibilities to make these systems smaller in size and increase time of operation, is system’s demand of energetical resources.

Keywords:ultrasound, sensors, non-destructive testing

TURINYS

Įvadas	6
1. Egzistuojančių ultragarsinių sistemų sprendimų Apžvalga	8
1.1. Tipinės ultragarsinės sistemos sandara	11
1.2. Egzistuojantys autonominių ultragarsinių prietaisų sprendimai	12
1.3. Egzistuojančių ultragarsinių sistemų parametrų apžvalga	13
2. Ultragarsinių sistemų architektūrų tyrimas, jų parametrų nustatymas ir analizė	15
2.1.1. Sprendimas su mikrovaldikliu	16
2.1.2. Sprendimas su mikrovaldikliu ir išoriniu keitikliu analogas-kodas	19
2.1.3. Sprendimas su mikrovaldikliu ir greitaėige duomenų surinkimo sistema	20
2.1.4. Bendras signalo priėmimo / valdymo sisteminio bloko variantų palyginimas .	21
2.2. Komunikacijos dalies variantų palyginimas	22
3. Ultragarsinės sistemos analoginės dalies architektūrų sudarymas	25
3.1. Aukštos įtampos impulsų generatorius	25
3.2. Aukštos įtampos maitinimo šaltinis	34
3.2.1. Pico Electronics maitinimo šaltinis	36
3.2.2. „Charge pump“ topologijos aukštos įtampos maitinimo šaltinis	36
3.2.3. „Flyback“ topologijos aukštos įtampos maitinimo šaltinis	41
3.2.4. Aukštos įtampos maitinimo šaltinių variantų palyginimas	43
3.3. Analoginio signalo stiprintuvas	45
4. Galimų mikro ultragarsinės sistemos sprendimų apibendrinimas	47
5. Išvados	54
6. Literatūros šaltinių sąrašas	55

IVADAS

Medžiagų tyrimas ultragarsu – viena labiausiai paplitusių neardomųjų bandymų rūšių. Ultragarsu lengviausia tirti metalus ir kitas geromis akustinėmis savybėmis pasižyminčias medžiagas, bet naudojant ultragarsą taip pat tiriamos betono konstrukcijos [1], įvairūs kompozitai, žmogaus kūno audiniai [2], medis [3], skysčiai bei kitos medžiagos [4]. Ultragarsinių bangų taikymo sritys yra labai įvairios ir apima pramonės objektus, technologinius procesus, mediciną ir kitas sritis. Galima išskirti tris ultragarso taikymo sritis. Pagal taikymo uždavinių specifiką galima išskirti tris grupes: neardomieji bandymai, tai yra defektų paieška įvairiuose objektuose ar gaminiuose; technologiniai matavimai, kai siekiama sekti (matuoti) tokius parametrus, kaip srautų greitis, debitas, užpildymo lygis talpose ir kita; monitoringas, kai siekiama aptikti pasikeitimus objektuose - defektų atsiradimas, medžiagų senėjimas. Priklausomai nuo to, kuriai iš šių taikymo sričių yra orientuoti ultragarsiniai prietaisai, jų techniniai parametrai ir galimybės labai skiriasi.

Ultragarsinės sistemos skirtos neardomiesiems bandymams turbūt yra pačios sudėtingiausios. Jos faktiškai skirtos „pažvelgti“ į neskaidrių medžiagų vidų. Jos daugeliu atvejų naudoja fazuotas ultragarsines gardeles ir yra daugiakanalės. Be to, šios sistemos gali turėti mechaninius skenerius, objektus tirti iš įvairių vietų. Prie šios grupės ultragarsinių prietaisų priskirtini ir ultragarsinės vizualizacijos įrenginiai, naudojami medicinoje, nors daugeliu parametrų labai skiriasi. Šios grupės ultragarsinės sistemos daugeliu atvejų nėra autonominės, be to yra brangios.

Antros grupės ultragarsiniai prietaisai yra ženkliai paprastesni ir jų funkcionalumas ženkliai siauresnis. Paprastai jie skirti atlikti vieno fizikinio dydžio matavimus (srauto greičio, lygio) juos registruoti ir perduoti į centralizuotą surinkimo mazgą. Svarbi šių prietaisų savybė yra tai, kad matuojamo dydžio reikšmė gaunama prietaise ir tik ji (o ne visas signalas) yra perduodama kaupimui. Šiuolaikinės tokių prietaisų versijos yra autonominės ir gali veikti keletą metų, priklausomai nuo matavimo intensyvumo.

Trečia grupė ultragarsinių prietaisų skirta monitoringui, tai yra objekto būklės stebėjimui. Tokios sistemos taikymo sritys gali būti vėjo jėgainės mentės stebėjimas, aviacinių konstrukcijų (lėktuvo sparno) stebėjimas, didelių kuro talpų stebėjimas, tiltų būklės stebėjimas ar net akustinės emisijos sistemos. Monitoringo sistemos atsiranda dalinai kaip alternatyva neardomiesiems bandymams. Bendru atveju pavojingų objektų saugi eksploatacija užtikrinama reguliariai atliekant objekto neardomuosius bandymus. Tačiau tai sąlyginai brangu, geriau būtų nuolatos stebėti objektą, instaliavus nebrangią įrangą, ir neardomuosius bandymus atlikti tik nustačius įtartinus pokyčius objekte. Tačiau šiuolaikinės monitoringo sistemos yra sudėtingos ir faktiškai dubliuoja

ultragarsinių neardomųjų bandymų įrangą. Tai yra, panaudojama daugiakanalė sistema, prie jos kabeliais jungiami ultragarsiniai keitikliai, kurie išdėstomi ant objekto, arba tiesiog instaliuojami, inkorporuojami į objekto konstrukciją. Įvertinant kad monitoringo sistemos nedirba nuolatos, bet retais intervalais, toks sprendimas visiškai neracionalus ir daugiau tinka monitoringo sistemos galimybių demonstravimui. Iš kitos pusės, įvertinant šiuolaikinės elektronikos technologines galimybes kyla klausimas, ar negalima pagaminti nedidelės, mikro-ultragarsinės sistemos, kurią būtų galima inkorporuoti į objektą, ir kuri bent jau tam tikrą laiko tarpą galėtų dirbti autonomiškai ir būti įvardinta kaip ultragarsinis sensorius. Reikia įvertinti ir tai, kad monitoringo sistemose signalai surenkami ir apdorojami centralizuotai, tai yra, surenkami yra signalai, o ne matavimo rezultatai. Tokių prietaisų šiuo metu nėra, o tyrimų, siekiant juos sukurti, irgi labai mažai.

Todėl šio darbo tikslas yra ištirti mažų, belaidžių, sąlyginai pigių mikro-ultragarsinių sistemų, kurias būtų galima įvardinti kaip ultragarsinius sensorius, sukūrimo galimybes, ištirti tokių sistemų konfigūracijas bei parametrus, priklausomai nuo naudojamų ultragarsinių bangų dažnio, matavimų pasikartojamumo periodo, kaupiamų/perduodamų signalų trukmių, įvertinti galimas pasiekti šių prietaisų parametrų ribas.

Tikslui pasiekti reikia atlikti šiuos uždavinius:

- Apžvelgti egzistuojančius ultragarsinių sistemų sprendimus jų miniatiūrizacijos galimybių požiūriu;
- Atlikti galimų ultragarsinės sistemos architektūrinių sprendimų analizę ir nustatyti parametrus, labiausiai ribojančius jos miniatiūrizaciją (ultragarsinės mikro-sistemos);
- Ištirti, kaip ultragarsinės sistemos dydį, kainą ir veikimo trukmę įtakoja darbinių dažnių diapazonas, žadinimo įtampos ir stiprinimo parametrai;
- Ištirti sistemos darbo režimų įtaką energetinių resursų poreikiui;
- Pasiūlyti apibendrintus sprendimus ultragarsinės mikro-sistemos realizacijai.

1. EGZISTUOJANČIŲ ULTRAGARSINIŲ SISTEMŲ SPRENDIMŲ APŽVALGA

Ultragarsine sistema vadinamas prietaisas, kuris spinduliuoja ir priima ultragarsinius signalus, gali juos kaupti bei apdoroti. Pagrindinis ultragarsinių bangų taikymo privalumas yra tai, kad jos gali sklirti faktiškai visose medžiagose, tarp jų neskaidriose, taip leisdamos pažvelgti į jų vidų [5]. Pasikeitus medžiagos savybėms kinta ir sklindančių bangų parametrai. Matuojant ultragarsinių bangų sklidimo parametrus galima nustatyti objektų vidinę struktūrą ar jos pokyčius. Tokie prietaisai taikomi įvairiose pramonės, medicinos ir mokslo srityse. Kaip pagrindines jų taikymo sritis galima įvardinti mediciną [6], technologinių parametrų matavimą pramonėje ir energetikoje [5], ultragarsinius neardomuosius bandymus (defektų paieška pramonės objektuose ar jų komponentuose siekiant nustatyti jų struktūrinį vientisumą) ir stebėsenos ar monitoringo sistemas (objektų struktūrinio vientisumo stebėjimas siekiant užtikrinti saugią jų eksploataciją) [7].

Ultragarsinę sistemą sudaro signalo generavimo, signalo priėmimo, bei duomenų surinkimo ir perdavimo / atvaizdavimo struktūriniai blokai. Ultragarsinės sistemos būna įvairių dydžių; priklausomai nuo paskirties ar parametrų, gali būti stacionarios, arba mobilios; taip pat - skirtos pastoviai objekto stebėsenai, arba prie objekto prijungiamos retesnių apžiūrų metu. Priklausomai nuo naudojamų keitiklių, tiriamo objekto, bei ultragarsinės sistemos naudojimo sąlygų, kinta įvairūs ultragarsinės sistemos parametrai. Ultragarsines sistemas, turinčias signalo generavimo ir priėmimo dalis apibūdina šie parametrai:

- Kanalų (įėjimo ir išėjimo) skaičius – kai kurios ultragarsinės sistemos turi ne vieną, o kelis, kartais net dešimtis ultragarsinių sensorių, priimančių, ar generuojančių ultragarsines bangas. Daugiakanalės sistemos leidžia objektą vienu metu tirti keliose pozicijose, arba iš skirtingų pusių, taip pat įgalina fazuotų gardelių taikymą. Kadangi fazuotos gardelės leidžia elektroninį ultragarsinio spindulio valdymą jos plačiai taikomos medicinoje ir neardomuosiuose bandymuose vidinių struktūrų vizualizavimui [6, 8].
- Generuojamo signalo dažnis, amplitudė ir laikinė forma. Bendru atveju išskiriamas impulsinis žadinimas ir nuolatinis. Kaip impulsinis žadinimas šiuo atveju suprantamas žadinimas, bet koku baigtinės trukmės signalu – nebūtinai vienetiniu stačiakampiu impulsu. Nuolatinio žadinimo atveju keitiklis paprastai žadinamas tam tikro dažnio harmoniniu signalu, tačiau toks režimas ultragarsinėse sistemose taikomas sąlyginai retai, galima sakyti, net išimtiniais atvejais. Impulsinio žadinimo atveju ultragarsiniai keitikliai paprastai žadinami tam tikru skaičiumi sinusinės formos ar stačiakampių impulsų seka, daugeliu atvejų apsiribojant vienu, ar keletu periodų. Dažniausiai, dėl sunkumų, su kuriais susiduriama, norint sugeneruoti aukštos įtampos sinusoidės formos signalą,

pasirenkami stačiakampiai impulsai, kurie taip pat gali būti vieno, arba dviejų poliarumų. Žadinimo impulsų kiekis, priklausomai nuo apdorojimo naudojamo priimant signalą, gali skirtis – matuojant tik laiką tarp išsiųsto ir priimto ultragarsinio impulso kartais pakanka vieno impulso [9], kitais atvejais vieno signalo siuntimo metu gali būti generuojama 10 ar daugiau impulsų. Žadinimo impulsų dažnis ultragarsinėse sistemose, priklausomai nuo tiriamos medžiagos akustinių savybių, gali varijuoti nuo kelių dešimčių kilohercų iki dešimčių megahercų, daugumoje ultragarsinių sistemų žadinimo signalo dažnį galima reguliuoti. Taip pat svarbus generuojamo ultragarsinio signalo parametras – žadinimo įtampa. Žadinimo įtampa sąlygoja, kokios amplitudės ultragarsinės bangos bus sugeneruotos tiriamame objekte. Ultragarsiniuose matavimuose svarbu ne bangų amplitudė, bet kokios amplitudės bus priimamas signalas bei priimto signalo signalas/triukšmas santykis. Dažniausiai ultragarsinių keitiklių žadinimui yra naudojami impulsų generatoriai, su žadinimo įtampa nuo 100 V iki 500 V. Atskirais atvejais, kai signalo nuostoliai maži, naudojami ir mažesnės amplitudės žadinimo signalai. Matavimams dideliais atstumais ar smarkiai ultragarsą slopinančiose aplinkose naudojamas ir iki 1000V žadinimas. Dėl keitikliams žadinti reikalingos aukštos įtampos daugumoje universalios paskirties ultragarsinių sistemų yra reikalingas papildomas aukštos įtampos maitinimo šaltinis.

- Priimamo signalo parametrai – dažnių juosta, diskretizavimo dažnis, signalo rezoliucija. Priimamo signalo dažnių juostą nustato naudojamas operacinis stiprintuvas ir jėgimo signalo filtrai. Dažnių juosta ir signalo diskretizavimo dažnis parenkami priklausomai nuo generuojamo ultragarsinio signalo dažnio ir to, kiek generuojamo signalo harmonikų norima užfiksuoti. Kuo didesni priimamo signalo diskretizavimo dažnis ir rezoliucija, tuo tikslesni gaunami rezultatai po signalų apdorojimo. Tačiau per aukštas diskretizavimo dažnis taip pat nėra geras sprendimas, kadangi kaupiamų signalų saugojimui reikia daugiau atminties, taip pat galingesnių skaičiavimo resursų jų apdorojimui. Priimamo signalo rezoliucija priklauso nuo naudojamo keitiklio analogas-kodas, taip pat nuo jėgimo stiprintuvo triukšmų lygio bei stiprinimo koeficiento. Paprastai ultragarsinėse sistemose naudojami stiprintuvai su reguliuojamu stiprinimo koeficientu, dažniausiai – 20-80dB ribose. Didesnio stiprinimo poreikis yra tik specializuotos sistemose, pavyzdžiui atliekant matavimus per oro tarpą, paprastai derinant su kitomis santykio signalas/triukšmas gerinimo priemonėmis.
- Ultragarsinės sistemos skaitmeninės dalies parametrai – operatyviosios atminties kiekis ir signalo apdorojimo galimybės. Nuo ultragarsinėje sistemoje naudojamos operatyviosios atminties dydžio priklauso, kiek priimamo signalo atskaitų galima sukaupti vieno

matavimo metu. Naudojant pakankamo dydžio operatyviają atmintį vienu metu joje galima laikyti keletą signalų, juos lyginti tarpusavyje. Galimas signalo apdorojimo sudėtingumas priklauso nuo ultragarsinėje sistemoje naudojamo procesoriaus, ar papildomų skaičiavimo bloką, pajėgumo. Tais atvejais, kai ultragarsinėje sistemoje esantis procesorius signalo neapdoroja, o tik persiunčia jį į duomenų apdorojimo centrą, gali pakakti pigaus ir nesudėtingo mikrovaldiklio, tuo tarpu, norint signalą apdoroti ir atvaizduoti realiu laiku, skaičiavimams gali tekti naudoti asmeninio kompiuterio procesorių.

- Tais atvejais, kai prietaisas maitinamas iš akumulatoriaus, ar atsinaujinančios energijos šaltinio, taip pat svarbu, kiek ilgai ir koku dažnumu galima atlikti matavimus, kiek energijos suvartojama kiekvienam signalo išsiuntimo, priėmimo ir apdorojimo ciklui. Nemaža dalis šiuolaikinių ultragarsinių matavimo sistemų naudoja autonominį maitinimą, kadangi tai daro šias sistemas mobilias, saugas, tinkamas naudoti tiek vidaus, tiek lauko sąlygomis.

Apibendrinant ultragarsinių sistemų struktūrą galima išskirti kelis jų tipus. Pirmiausiai, tai ištiesai naudojimo metu dirbančios sistemos. Tipinis tokios sistemos pavyzdys yra bet kokia įprastinė neardomųjų bandymų sistema, tarkime defektoskopas, naudojamas autonominiame, rankiniame režime. Tokių prietaisų dydis nėra labai kritiškas (aišku turi būti lengvas), kaip ir galimo darbo laikas autonominiame režime (keletas valandų). Reikia pažymėti, kad tokie prietaisai vartotojo požiūriu yra vienetiniai. Vartotojas (įmonė) gali turėti keletą tokių prietaisų, tačiau jų darbas nesusiejamas, nepriklausomas. Kita dalis ultragarsinių sistemų yra prietaisai naudojami srautų ar lygių matavimui įvairiuose pramonės vamzdynuose ar talpose [10, 11]. Paprastai tokie prietaisai yra autonominiai, dirba sąlyginai nuolatini, t.y. matavimus atlieka reguliariai, tam tikrais laiko intervalais. Dažniausiai jie yra vieno kanalo (turi vieną siuntiklio-ėmiklio porą). Didelės miniatiūrizacijos poreikio tokiems prietaisams nėra, tačiau autonominio darbo laikas turi būti ilgas, daugeliu atvejų skaičiuojamas metais. Tokių prietaisų skaičius įmonėje gali būti sąlyginai didelis. Paprastai duomenys yra centralizuotai surenkami ir apibendrinami. Trečia dalis yra taip vadinamos monitoringo ar stebėsenos sistemos. Tokių sistemų įdėja yra tame, kad ant objekto išdėstytas nemažas kiekis ultragarsinių keitiklių (ar mažų sistemų) reguliariai atlieka matavimus ir centralizuotai atlieka duomenų surinkimą ir analizę, kuri įgalina pastebėti pakitimus stebimo objekto struktūroje. Dažniausiai monitoringo sistemos naudojamos tirti metalams ir kompozitinėms medžiagoms – gali būti panaudojamos aviacijoje [12, 13], vėjo energetikos objektams ar tiltams [14] stebėti. Tokių sistemų atveju miniatiūrizacija yra svarbi, nes daugelyje atvejų bent jau ultragarsiniai keitikliai gali būti instaliuojami tiesiog į kompozitinę konstrukciją. Tačiau, jei instaliuojami tik keitikliai, atsiranda laidų klausimas ir visa sistema tampa griozdiška ir

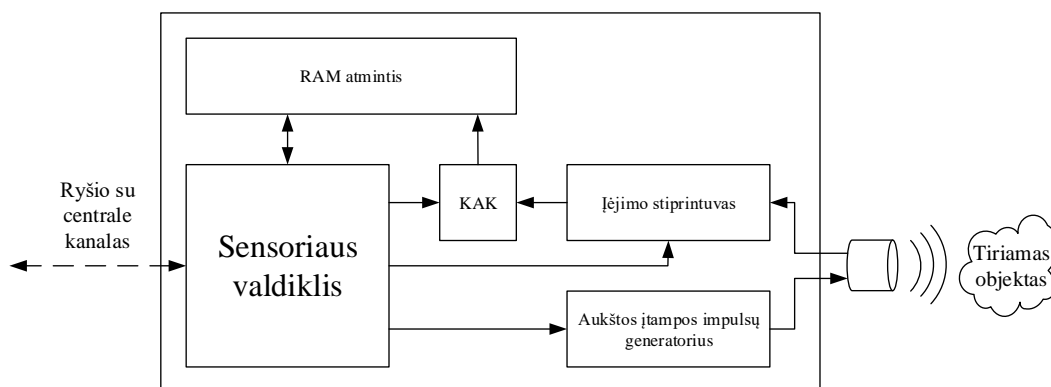
sunkiai instaliuojama. Sukūrus sąlyginai mažas, kad ir nesudėtingas, ultragarsines sistemas galima būtų atlikti belaidžius matavimus bei duomenų surinkimą. Tuo atveju tiek energetinis tiek kainos klausimas tampa kritinis.

Teoriškai nagrinėjant ultragarsinės sistemos sandarą galima daryti prielaidą, kad yra įmanoma sukurti mažą autonominę ultragarsinę sistemą, turinčią visas įprastoms ultragarsinėms monitoringo sistemoms reikalingas dalis, kuri būtų maitinama akumuliatoriumi. Visgi norint atsakyti į klausimus, kokie galėtų būti tokios sistemos parametrai, dydis, kaina ir veikimo laikas, reikia ultragarsinę sistemą, suskirsčius į atskirus modulius, išsiaiškinti, kokius sistemos parametrus šie moduliai įtakoja ir kokios architektūros modulius naudojant būtų galima suprojektuoti reikiamų parametrų ultragarsinį sensorių.

1.1. Tipinės ultragarsinės sistemos sandara

Nagrinėjant egzistuojančius ultragarsinius prietaisus, galima pastebėti, kad visų šių prietaisų sandara yra panaši, iš esmės keičiasi tik naudojamų komponentų kokybė ir sudėtingumas, o pati sandara daugumoje prietaisų lieka ta pati. Nesudėtingą vieno kanalo ultragarsinę sistemą galima suskirstyti į šias dalis (1.1 pav.):

1. Aukštos įtampos impulsų generatorius – dalis, skirta žadinti ultragarsinį keitiklį, kad šis spinduliuotų ultragarso bangas į tiriamą objektą.
2. Signalo priėmimo dalis - skirta priimti iš keitiklio ateinantį signalą, jį nufiltruoti ir sustiprinti iki keitikliui analogas-kodas reikiamo įtampos lygio.
3. Signalo konvertavimo/saugojimo dalis – šią dalį sudaro keitiklis analogas kodas, RAM atmintis ir šiuos du elementus taktuojantis valdiklis – signalas iš analoginio į skaitmeninį verčiamas tam tikrais intervalais ir įrašomas į atmintį.
4. Signalo apdorojimo/duomenų perdavimo dalis – šioje dalyje galima pasiūlyti įvairių variantų – reikiamu algoritmu duomenis apdoroti prie ultragarsinio keitiklio esančiame mikrovaldiklyje ir į centralę siųsti gautą rezultatą; tiesiogiai siųsti neapdorotus duomenis į centrinį bloką, arba į apdorojimo bloką siųsti priimtą signalą, prieš tai jį suspaudus, panaudojant atitinkamą duomenų spaudimo algoritmą.



1.1 pav. Tipinė ultragarsinio matavimo prietaiso sandara

Pavaizduotą sistemą papildžius keliais įtampos šaltiniais (aukštesnės įtampos – signalo generavimo daliai ir žemesnės – priimto signalo apdorojimui skirtai elektronikai) bei komunikacijos įrenginiu būtų gauta sąlyginai nedidelė ir nepriklausoma ultragarsinė sistema, kuri, priklausomai nuo panaudotų komponentų, galėtų generuoti, priimti ir apdoroti ultragarsinius signalus bei rezultatus siųsti į centralę tolimesniam apdorojimui.

1.2. Egzistuojantys autonominių ultragarsinių prietaisų sprendimai

Apžvelgiant egzistuojančius ultragarsinių prietaisų sprendimus, įgalinančius autonomiškai matuoti tam tikrus parametrus ir su centre stotimi komunikuojančius bevieliu ryšiu, galima išskirti keletą žemiau išvardintų jų grupių.

Pirmiausiai tai ultragarsiniai skysčių ir dujų srauto ar debito matuokliai. Tipinis tokių sprendimų pavyzdys yra kinų kompanijos HMK Test siūlomas ultragarsinis vandens srauto matuoklis, maitinamas iš tinklo, ar vidinės baterijos, o duomenis perduodantis laidiniu RS-485, ar bevieliais WiFi, ar GPRS ryšiais. Prietaisas skirtas jungti prie 4 colių (101,6 mm) vamzdžių, iliustracija prietaiso gabaritų įvertinimui pateikiama 1.2 paveiksle, kairėje.

Kitas tokių prietaisų pavyzdys yra Britų kompanijos Halman Water Management siūlomos bevielės (vandens) lygio matavimo stotelės, kurios autonomiškai įvertina matuojamoje srityje esantį vandens lygį ir gautus duomenis į centralę raportuoja GPRS, GSM, ar palydoviniu tinklais. Įdomu, kad tokiam prietaisui nereikalingas papildomas maitinimas, o deklaruojama veikimo trukmė – net 5 metai. Prietaiso matavimo dalies matmenys – 90 x 90 mm, papildomai prie prietaiso jungiamas išorinis akumuliatorius. Iliustracija gabaritų įvertinimui pateikiama 1.2 paveiksle, dešinėje.



1.2 pav. Kompanijos HKM Test sukurtas ultragarsinis srauto matuoklis (kairėje) ir kompanijos HWM sukurtas ultragarsinis vandens lygio matuoklis (dešinėje)

1.3. Egzistuojančių ultragarsinių sistemų parametrų apžvalga

Ultragarsinės sistemos kaina, dydis ir suvartojama energija labai priklauso nuo jos parametrų. Norint suprojektuoti portatyvią, nesudėtingai suinstaliuojamą ultragarsinę sistemą ypatingą dėmesį reikia atkreipti į šiuos veiksniai:

1. Ultragarsinio signalo parametrai: žadinimo signalo dažnis ir įtampa, grįžtančio signalo matavimo tikslumas ir dažnių juosta. Priklausomai nuo šių parametrų yra parenkamas atitinkamas aukštos įtampos šaltinis, impulsų generatorius, keitiklis analogas-kodas. Taip pat, esant dideliame KAK diskretizavimo dažniui gali tekti naudoti didesnės spartos valdiklį. Šių elementų parinkimas labiausiai įtakoja sensoriaus kainą, kiek mažiau - suvartojamą galią ir prietaiso dydį.
2. Signalų perdavimo/apdorojimo dalis. Šis modulis gali iš ultragarsinio keitiklio gautą signalą persiųsti į centralę, arba atlikti reikiamą apdorojimą pačiame procesoriuje ir siųsti tik jau suskaičiuotą rezultatą, tarkime, išmatuotą srauto greitį. Nuo signalo apdorojimo sudėtingumo priklauso, kokios skaičiavimo galios (ar su kokia papildoma periferija) procesorius reikalingas, tai įtakoja prietaiso galios suvartojimą ir galutinę kainą. Iš kitos pusės, atlikus signalo apdorojimą ir gaunant norimo parametro skaitinius įvertinimus, ženkliai sumažinamas perduodamų duomenų kiekis. Beveik visais atvejais signalo duomenų apimtis baitais bus didesnė už keletas suskaičiuotų įverčių.

Tačiau ne visada apdorojimo algoritmai pajėgūs gauti tuos įverčius, naudodami tik vieno ultragarsinio sensoriaus išmatuotus signalus. Bendram matavimo ar monitoringo tikslui pasiekti gali reikėti susieto visų signalų apdorojimo. Tuo atveju kitos išeities nėra, tik siųsti kiekvieno ultragarsinio sensoriaus (sistemos) išmatuotus signalus į centrinį duomenų apdorojimo mazgą.

3. Maitinimo šaltinis. Čia galimi trys variantai – maitinimas iš akumulatoriaus, atsinaujinančios energijos šaltinis, ar maitinimas, ateinantis laidu. Prietaisą maitinti iš akumulatoriaus galima esant mažam energijos suvartojimui, arba tuo atveju, jeigu prietaisui atliekama dažna techninė apžiūra, kurios metu akumuliatorių galima pakeisti. Maitinimas atsinaujinančios energijos šaltiniu galimas tada, kai prietaisas suvartoja nedaug galios ir duomenų registravimas ir siuntimas vyksta ganėtinai retai (pavyzdžiui, keletą kartų per savaitę). Visais kitais atvejais neišvengiamas yra maitinimas laidu, kas kai kuriais atvejais gali sudaryti daug papildomų problemų montuojant sistemą.
4. Ryšio su centrale kanalas. Paprasčiausiu atveju duomenys į centralę ir atgal siunčiami laidais. Tačiau net esant sąlyginai koncentruotam sistemų išdėstymui, ne visada galima ryšį realizuoti laidais, tiek bendrai dėl atsirandančio nemažo laidų kiekio, tiek apskritai dėl prieinamumo (pavyzdžiui, jeigu nėra konstrukcinių skylių laidams praveisti). Tarkime vėjo jėgainės atveju laidai nepageidautini dėl galimo žaibų poveikio. Tokiu atveju nuo centralės nutolusiose, ar plačiu spinduliu išdėstytose matavimo sistemose tenka naudoti radijo ryšį. Nedideliais atstumais išdėstyti sensoriai gali palaikyti ryšį Wi-Fi ar ZigBee ryšiu, tuo tarpu dideliais atstumais nutolę sensoriai duomenis siųsti gali GSM, ar 3G/4G tinklais.

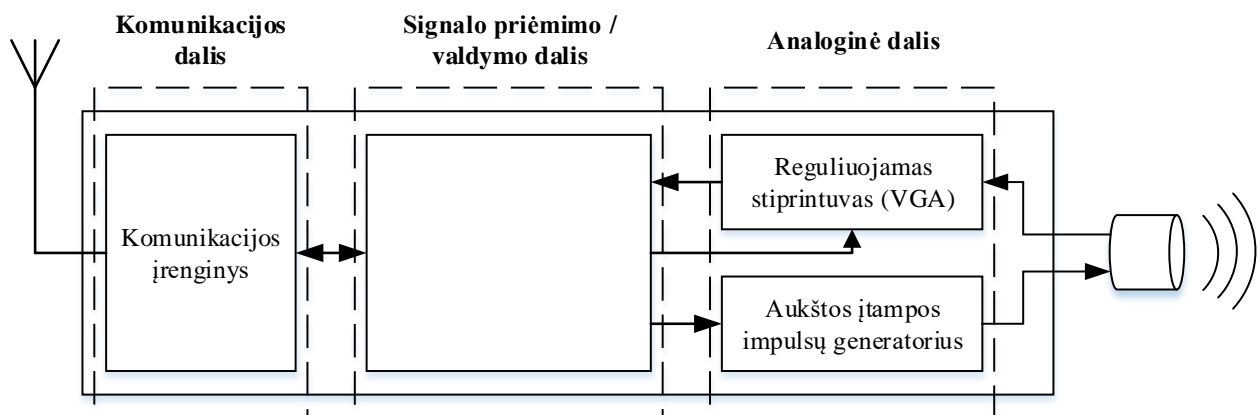
Apibendrinant egzistuojančių ultragarsinių sistemų sprendimų analizę galima teigti, kad jų miniatiūrizacijos galimybių nustatymui reikia atlikti žemiau išvardintus uždavinius:

- Apžvelgti egzistuojančius ultragarsinių sistemų sprendimus jų miniatiūrizacijos galimybių požiūriu;
- Atlikti galimų ultragarsinės sistemos architektūrinių sprendimų analizę ir nustatyti parametrus, labiausia ribojančius jos miniatiūrizaciją (ultragarsinės mikro-sistemos);
- Iširti, kaip ultragarsinės sistemos dydį, kainą ir veikimo trukmę įtakoja darbinų dažnių diapazonas, žadinimo įtampos ir stiprinimo parametrai;
- Iširti sistemos darbo režimų įtaką energetinių resursų poreikiui;
- Pasiūlyti apibendrintus sprendimus ultragarsinės mikro-sistemos realizacijai.

2. ULTRAGARSINIŲ SISTEMŲ ARCHITEKTŪRŲ TYRIMAS, JŲ PARAMETRŲ NUSTATYMAS IR ANALIZĖ

Tiriant paprastų ultragarsinių sistemų (senorių) projektavimo galimybes nutarta apsiriboti sistemomis, kurios neapdoroja priimto signalo, o jį tik priima ir perduoda į centrinę sistemą tolesniam apdorojimui, kadangi monitoringo sistemose, kuriose naudojami keli sensoriai, gali tekti priimti signalus iš kitų keitiklių, vėliau lyginti iš kelių senorių priimtus signalus tarpusavyje, kas būtų neįmanoma neturint pilnų priimtų signalų. Tokiu atveju galima nesigilinti į tokius su skaičiavimais susijusius parametrus, kaip duomenų apdorojimo algoritmų mikrovaldiklyje įgyvendinimas ir sparta bei energijos suvartojimas vykdant signalo apdorojimą, bet įgalina parinkti ryšio liniją, skirtą perduoti dideliems duomenų kiekiams ir suvartojančią kuo mažiau energijos

Siekiant nagrinėti sistemą dalimis, kurias būtų galima nesunkiai tarpusavyje integruoti, tiriama sistema suskirstoma į tris dalis: Komunikacijos, signalo priėmimo / valdymo ir analoginę (2.1 pav.).



2.1 pav. Kuriama ultragarsinė sistema, suskirstyta į struktūrinius blokus

Pirmiausiai nagrinėjama ultragarsinės sistemos signalo priėmimo / valdymo dalis. Tiriant skirtingas šio sisteminio bloko architektūras galime apytiksliai apibrėžti šiuos ultragarsinio sensoriaus parametrus:

- Generuojamo žadinimo signalo dažnis ir forma laike;
- Priimamo signalo diskretizavimo dažnis;
- Keitiklio analogas-kodas rezoliucija, signalo ir triukšmo santykis;
- Priimto signalo, saugojamo operatyviojoje atmintyje, trukmė / sukaupiamų signalo atskaitų kiekis.

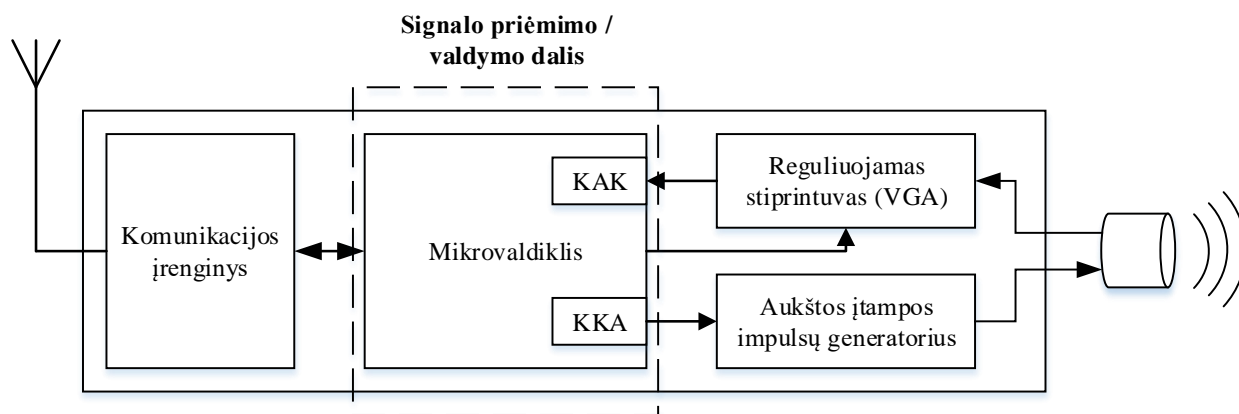
Taip pat apibrėžiami šie, signalo priėmimo / valdymo blokui būdingi parametrai, kurių įtaką visos sistemos parametrams įvertinti pilnai bus galima tik tada, kai bus apžvelgti kitų sisteminių blokų galimi variantai:

- Plokštėje užimamas plotas (angl. „*footprint*“);
- Sistemos dalies energijos suvartojimas;
- Sistemos dalies kaina.

Sistemos dalies kaina vertinama pasirenkant priimtinus komponentus iš „Farnell“ internetinio katalogo, energijos suvartojimas vertinamas tolesniame skyriuje.

2.1.1. Sprendimas su mikrovaldikliu

Paprasčiausiame ir pigiausiame tiriamame ultragarsiniame sensoriuje mikrovaldiklis atlieka visas signalo priėmimo / valdymo dalies funkcijas. Be procesų valdymo ir komunikacijos su centrale įgyvendinimo, mikrovaldiklyje yra generuojami impulsai, grįžtantis ultragarsinis signalas yra verčiamas į skaitmeninį panaudojant vidinį mikrovaldiklio keitiklį analogas-kodas, priimtas signalas sukaupiamas mikrovaldiklio operatyvinėje atmintyje, o vėliau perduodamas į centralę. Ultragarsinio sensoriaus (mikro sistemos) struktūra pateikiama 2.2 paveiksle.



2.2 pav. Sistemos sprendimo su mikroprocesoriumi struktūrinė schema

Tokios sistemos parametrus labiausiai apriboja pasirinkto mikrovaldiklio savybės. Kadangi mikrovaldiklis yra reikalingas iš esmės, bet kokioje autonominėje ultragarsinėje sistemoje, nuspręsta parinkti mikrovaldiklį, kurį būtų galima panaudoti ir kitokiuose sistemos variantuose.




Mikrovaldiklis renkamas iš trijų didžiųjų gamintojų – ST Microelectronics, Texas instruments ir NXP – mikrovaldiklių, parenkant mažo galios suvartojimo ir didelio našumo modelius su ARM šerdimi. Renkantis mikrovaldiklį vertinami šie parametrai:

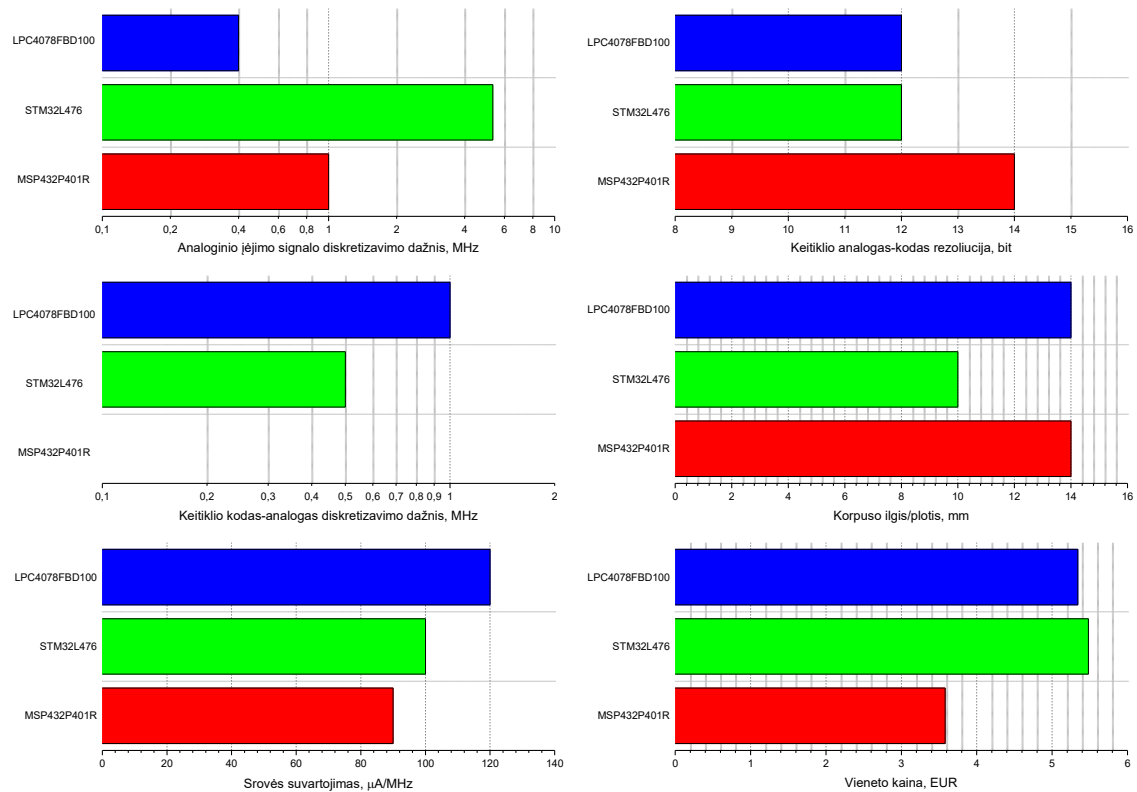
- f_{dMAX} – Didžiausias galimas priimamo signalo diskretizavimo dažnis;

- n_{ADC} - Keitiklio analogas-kodas rezoliucija;
- f_{DAC} – Maksimalus keitikliu kodas-analogas generuojamo signalo dažnis;
- *RAM* - Operatyviosios atminties talpa;
- *Korpusas* - Mikrovaldiklio korpuso dydis;
- *Energijos suvartojimas* – Pateikiama suvartojama galia susieta su procesoriaus taktiniu dažniu (vatais megahercui), aktyviame režime;
- *Kaina* – Vieno mikrovaldiklio kaina, perkant 1000 vienetų, remiantis gamintojų puslapiuose esančiomis nuorodomis;
- *Papildomi privalumai* - Skaičiavimo pajėgumas, speciali periferija signalų apdorojimui.

Apžvelgus gamintojų katalogus išrinkti trys galimi mikrovaldiklių variantai – Texas Instruments MSP432P401R, ST Microelectronics STM32L476 ir NXP LPC4078FBD100. Mikrovaldiklių palyginimas pagal reikiamus parametrus 2.1 lentelėje, palyginimo grafikai pateikiami 2.3 paveiksle.

2.1 lentelė. Mikrovaldiklių palyginimas

Mikrovaldiklis	MSP432P401R 	STM32L476 	LPC4078FBD100 
$f_{d\ MAX}$	1 MSPS	5,33 MSPS	0,4 MSPS
n_{ADC}	14 bitų	12 bitų	12 bitų
<i>RAM</i>	64 kB	128 kB	96 kB
f_{DAC}	-	0,5 MHz	1 MHz
<i>Korpusas</i>	LQFP100, 14x14 mm	LQFP64, 10x10 mm	LQFP100, 14x14 mm
<i>Energijos suvartojimas</i>	90 μ A/MHz	100 μ A/MHz	120 μ A/MHz
<i>Kaina</i>	3,58 €	5,48 €	5,34 €
<i>Papildomi privalumai</i>	EnergyTrace™ technologija, leidžianti sekti energijos suvartojimą	FPU periferinis blokas, pagreitinantis slankaus kabelio skaičių operacijas	Aukščiausias taktinis dažnis – iki 120 MHz



2.3 pav. Mikrovaldiklių palyginimo grafikai

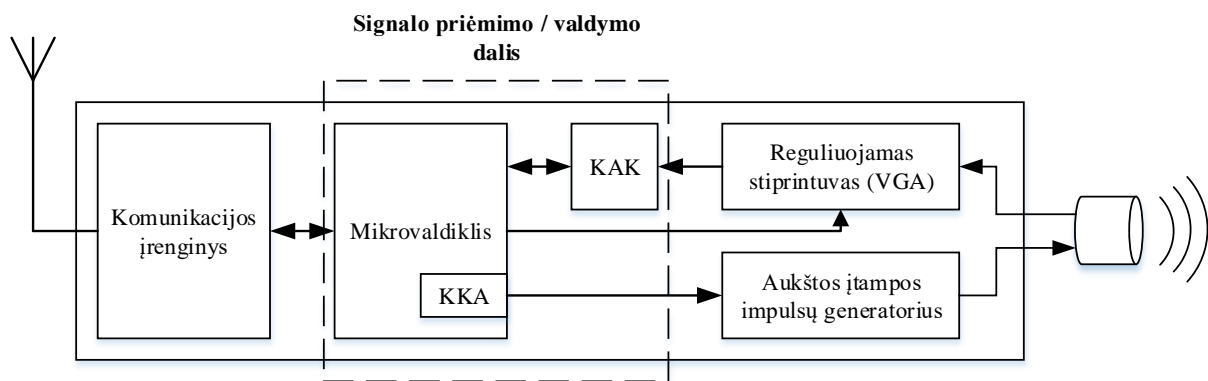
Pagal šiuos duomenis labiausiai ultragarsiniai mikro sistemai yra tinkamas mikrovaldiklis STM32L476. Šio mikrovaldiklio pranašumai prieš kitus – didžiausias diskretizavimo dažnis, talpiausia operatyvioji atmintis ir nedidelis energijos suvartojimas. Naudojant šį mikrovaldiklį sensoriaus maksimalūs parametrai būtų tokie:

- Priimamo signalo diskretizavimo dažnis – iki 5,3 MSPS;
- Keitiklio analogas-kodas rezoliucija – 12 bitų;
- Mažiausias signalo ir triukšmo santykis – 64 dB, esant maksimaliam duomenų surinkimo dažniui;
- Maksimalus keitikliu kodas-analogas generuojamo signalo dažnis - 0,5 MHz. Signalą generuojant keitikliu kodas-analogas galima sugeneruoti trumpus sudėtingesnės formos, pavyzdžiui – „Chirp“ signalus;
- Operatyviosios atminties talpa – 128 kB. Tokia talpa leidžia vienu signalo registravimo ciklu sukaupti iki 12 ms trukmės signalą, esant maksimalioms diskretizavimo dažnio ir signalo rezoliucijos reikšmėms;
- Užimamas plotas – iki 9 cm².

Šiuo atveju, mikrovaldiklio parinkimas nustato sistemos parametrus, kurie 2.1.4 skyriuje yra palyginami su kitokių galimų signalo priėmimo / valdymo dalies architektūrų sprendimų apibrėžiamais parametrais

2.1.2. Sprendimas su mikrovaldikliu ir išoriniu keitikliu analogas-kodas

Antrasis sistemos variantas beveik nesiskiria nuo pirmojo, tik vietoje mikrovaldiklyje esančio keitiklio analogas-kodas naudojamas išorinis, triukšmui atsparesnis ir, esant poreikiui, didesnės raiškos keitiklis analogas-kodas. Taip sudarytoje sistemoje signalas būtų priimamas tiksliau, bet, dėl keitiklio analogas-kodas ir mikrovaldiklio sujungimui naudojamos SPI sąsajos riboto duomenų perdavimo greičio, mažesniu diskretizavimo dažniu. Šiuo atveju, kaip ir pirmuoju, signalas iki išsiuntimo būtų kaupiamas mikrovaldiklio operatyviojoje atmintyje, kuri, panaudojus didesnės skyros keitiklį analogas-kodas talpintų kiek mažiau signalo atskaitų, nei pirmajame variante.



2.4 pav. Sistemos sprendimo su mikroprocesoriumi ir išoriniu keitikliu analogas-kodas struktūrinė schema

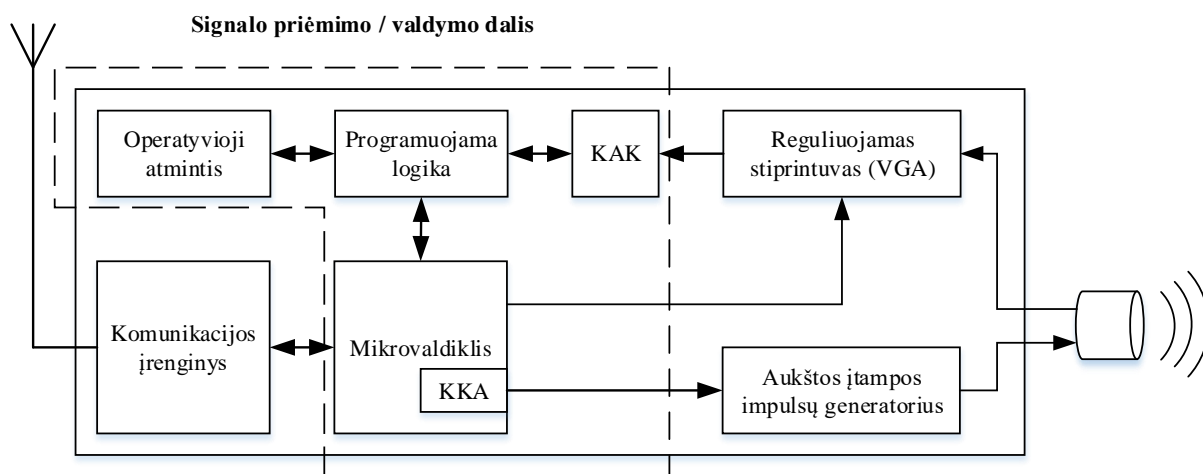
Preliminarūs varianto apibrėžiami parametrai:

- Priimamo signalo diskretizavimo dažnis – iki 3 MSPS (naudojant analogas-kodas keitiklį AD7276);
- Keitiklio analogas-kodas rezoliucija – 12 bitų;
- Mažiausias signalo ir triukšmo santykis – 69 dB, esant maksimaliam duomenų surinkimo dažniui (naudojant analogas-kodas keitiklį AD7276);
- Generuojamo analoginio signalo diskretizavimo dažnis - 0,5 MHz;
- Operatyviosios atminties talpa – 128 kB;
- Užimamas plotas – apie 16 cm².

Lyginant su anksčiau aprašytu variantu, sprendimas su išoriniu keitikliu analogas-kodas yra pranašesnis tik tuo, kad naudojant išorinį KKA galima lengviau atskirti sistemos skaitmeninę dalį nuo analoginės, kas leidžia padidinti santykį signalas/triukšmas.

2.1.3. Sprendimas su mikrovaldikliu ir greitaigė duomenų surinkimo sistema

Trečiasis, sudėtingiausias, sistemos variantas yra sudarytas iš daugiau komponentų, nei pirmi du – čia naudojamas atskiras keitiklis analogas-kodas, atskiras operatyviosios atminties lustas bei greitaigiam duomenų surinkimui pritaikyta programuojamos logikos mikroschema (CPLD). Pradedant signalo surinkimą mikrovaldiklis, ar atskiras rezonatorius taktuoja programuojamą logiką, kuri atitinkamu dažniu paima duomenis iš keitiklio analogas-kodas ir talpina juos operatyviojoje atmintyje. Vėliau per programuojamą logiką duomenys mažesniu greičiu perduodami į mikrovaldiklį, o iš jo – į komunikacijos įrenginį, kuris duomenis siunčia į centrinę sistemą. Šiame variante mikrovaldiklyje esanti operatyvioji atmintis neberiboja kaupiamo signalo trukmės, taip pat, panaudojant programuojamą logiką keitiklio analogas-kodas ir operatyviosios atminties magistralių didesnę signalo diskretizavimo dažnį, nemažinant, arba netgi padidinant priimamo signalo rezoliuciją.



2.5 pav. Sprendimo su mikrovaldikliu ir greitaigė duomenų surinkimo sistema struktūrinė schema

Preliminarūs varianto apibrėžiami parametrai:

- Priimamo signalo diskretizavimo dažnis – Gali viršyti ir 100 MSPS, vertinimui parenkamas 40 MSPS spartos keitiklis AD9629BCPZ-40 (Analog Devices);
- Keitiklio analogas-kodas rezoliucija – 12 bitų;
- Signalas ir triukšmo santykis – 70,3 dB, esant maksimaliam duomenų surinkimo dažniui (naudojant AD9629BCPZ-40 keitiklį analogas-kodas);

- Generuojamo analoginio signalo diskretizavimo dažnis - 0,5 MHz;
- Operatyviosios atminties talpa – gali viršyti 4 MB, vertinimui parenkama 4 MB talpos operatyvioji atmintis AS6C4016-55BIN (Alliance Memory);
- Užimamas plotas – iki 36 cm².

Šis sprendimas, nors ir brangesnis, bei užimantis 3 – 4 kartus daugiau vietos spausdintinėje plokštėje, nei kiti siūlomi variantai, turi daug pranašumų, lyginant su kitais variantais. Tai ženkliai didesnis priimamo signalo diskretizavimo dažnis, didesnė operatyviosios atminties talpa, bei geresnis santykis signalas/triukšmas. Taip pat, panaudojant programuojamą logiką ir operatyviąją atmintį galima generuoti aukšto dažnio skaitmeninių impulsų sekas, ar kintamo dažnio skaitmeninius signalus. Šią sensoriaus architektūrą reiktų naudoti išskirtiniais atvejais, kai dirbama su sąlyginai aukšto dažnio ultragarsiniais signalais.

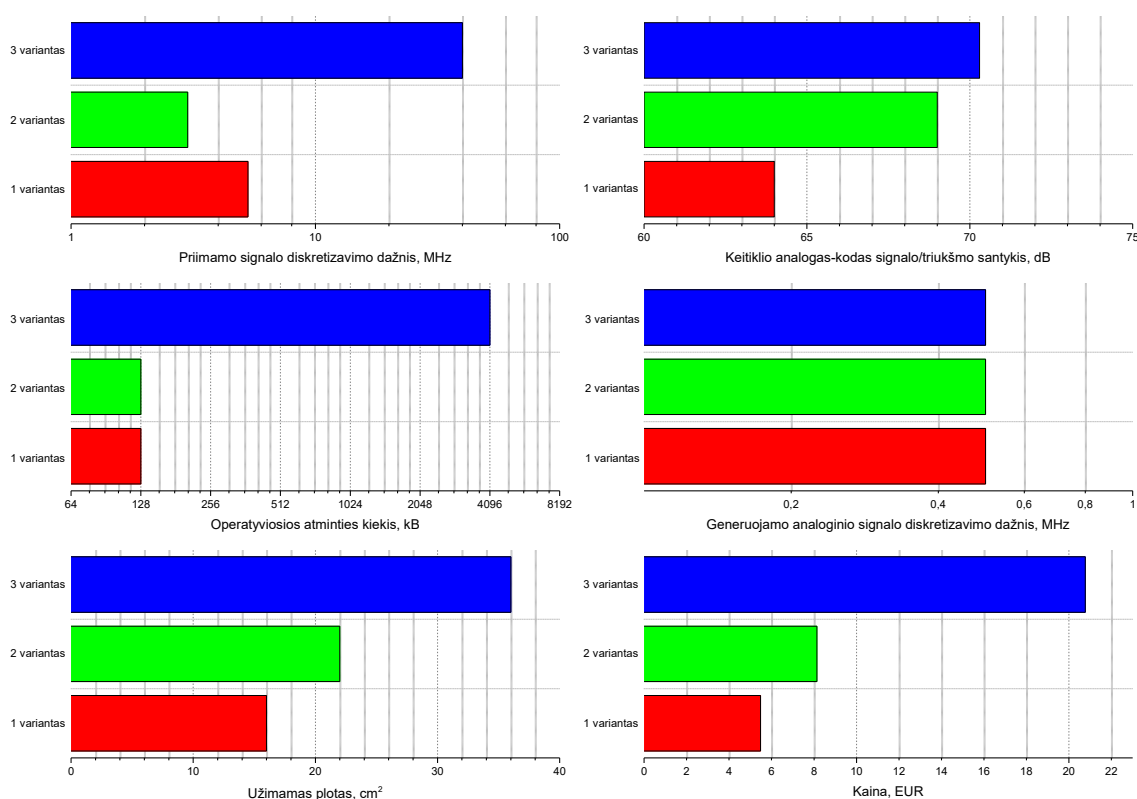
2.1.4. Bendras signalo priėmimo / valdymo sisteminio bloko variantų palyginimas

Įvertinus tris galimus signalo priėmimo / valdymo struktūrinio bloko sandaros variantus, bei pasirinkus elektroninius komponentus variantų tarpusavio palyginimui, į 2.2 lentelę surašomi visų trijų sistemos dalies variantų parametrai. Parametrų sutrumpinimai su paaiškinimais:

- f_{dMAX} – Didžiausias galimas priimamo signalo diskretizavimo dažnis;
- n_{ADC} , SNR – Keitiklio analogas-kodas rezoliucija, signalo ir triukšmo santykis;
- RAM – Operatyviosios atminties talpa;
- f_{DAC} – Generuojamo žadinimo signalo dažnis (naudojant analoginį mikrovaldiklio išėjimą);
- $Plotas$ – Plokštėje užimamas plotas (angl. „footprint“);
- $Kaina$ – Sistemos dalies kaina, neskaičiuojant diskretinių komponentų. Kaina nustatoma pagal „Farnell“ internetinį katalogą, perkant mažiausiai po 500 kiekvieno komponento.

2.2 lentelė. Signalų priėmimo / valdymo dalies struktūros palyginimas

Parametras	1 variantas	2 variantas	3 variantas
f_{dMAX}	5,3 MSPS	3 MSPS	40 MSPS
$n_{ADC} SNR$	12 bitų, 64 dB	12 bitų, 69 dB	12 bitų, 70,3 dB
RAM	128 kB	128 kB	4 MB
f_{DAC}	0,5 MHz	0,5 MHz	0,5 MHz
Plotas	Iki 9 cm ²	Iki 16 cm ²	Iki 36 cm ²
Kaina	5,48 €	8,14 €	20,77 €



2.6 pav. Signalų priėmimo / valdymo dalies struktūros palyginimo grafikai

Iš lentelės matome, kad antrąjį variantą vertėtų rinktis tik tuo atveju, kai reikalingas didelis keitiklio analogas-kodas tikslumas. Trečias variantas, nors ir beveik tris kartus brangesnis už pirmąjį, smarkiai lenkia kitus du variantus savo parametrais, taigi esant situacijai, kai kitų sistemos dalių kainos lenktų signalo apdorojimo / valdymo dalies kainą, vertėtų rinktis šią struktūrinės dalies topologiją.

2.2. Komunikacijos dalies variantų palyginimas.

Renkantis ultragarsinio sensoriaus bevielės komunikacijos kanalą, pagrindiniai vertinimo kriterijai turėtų būti šie:

- Energijos suvartojimas, susietas su išsiunčiamų duomenų kiekiu (labiau orientuojamasi į duomenų išsiuntimą, kadangi tikima, jog ultragarsinis sensorius priiminės daug mažiau duomenų, nei jų išsiųs), pavyzdžiui, galia suvartojama išsiunčiant vieną bitą duomenų
- Duomenų pralaida
- Maksimalus signalo perdavimo atstumas
- Modulio kaina

Nuspręsta palyginti tris populiariausius ir labiausiai tinkančius šioje aplikacijoje bevielės komunikacijos protokolus – WiFi, ZigBee ir Bluetooth Low Energy.

WiFi – populiariausia bevielės komunikacijos technologija, WiFi modulius galima rasti daugelyje šiuolaikinių prietaisų, taigi ultragarsiniame sensoriuje naudojant šią technologiją prietaisas būtų lengvai suderinamas su egzistuojančiais įrenginiais.



ZigBee – daugiausiai išmaniuosiuose namuose naudojamas komunikacijos protokolas. Išskirtinis tuo, kad palaiko „Mesh“ tinklą, kas reiškia jog išdėsčius keitikius vieną po kito teoriškai galima pasiekti itin didelį atstumą tarp centrinio įrenginio ir sensorių.

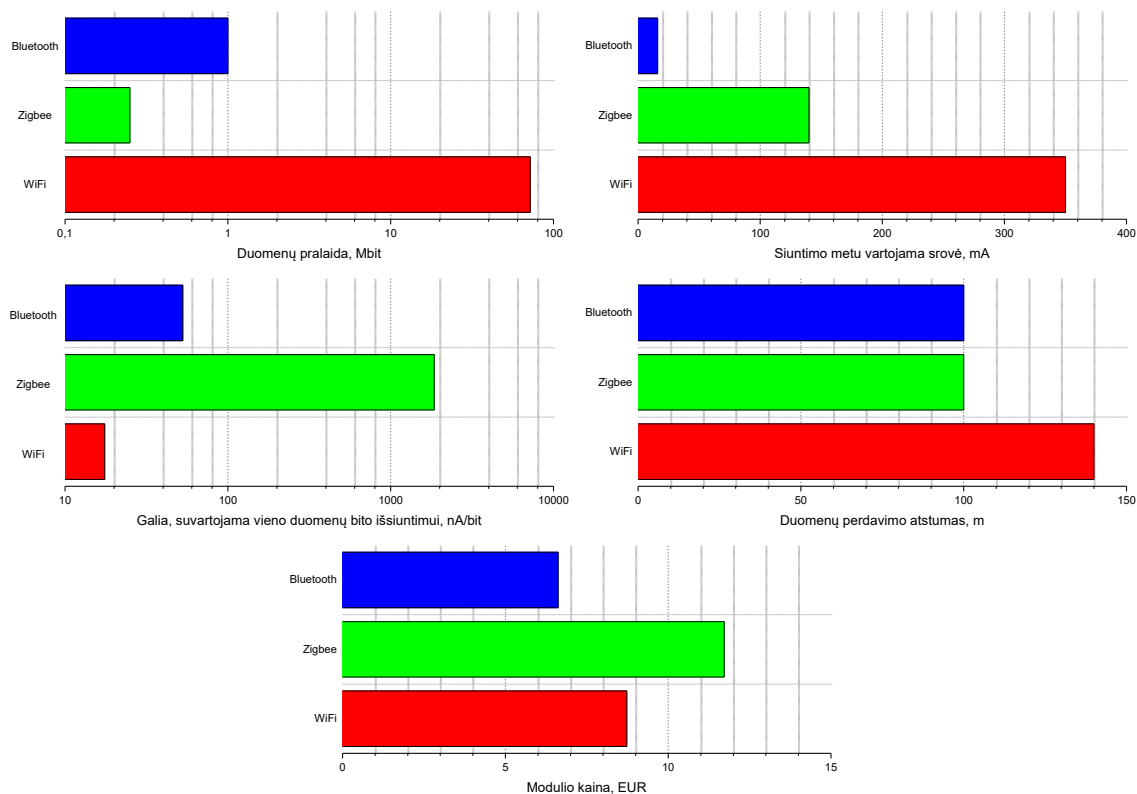
Bluetooth Low Energy – 2010 metais atnaujinta Bluetooth standarto versija, skirta perduoti duomenis sumažinant energijos suvartojimą. Bluetooth transmiteriai, kaip ir WiFi yra dažnai montuojami šiuolaikinėje nešiojamoje technikoje.

Žemiau esančioje 2.3 lentelėje šie trys bevielio ryšio standartai palyginami pagal užsiduotus kriterijus:

- P/bit - galia suvartojama išsiunčiant vieną bitą duomenų. Parametras apskaičiuojamas padalinus modulio suvartojamą galią siuntimo metu iš maksimalios duomenų pralaidos.
- I_{TX} – Maksimali modulio vartojama srovė vykstant duomenų siuntimui
- TP - Duomenų pralaidos sparta
- L - Maksimalus signalo perdavimo atstumas (tarp dviejų siųstuvų/imtuvų)
- $Kaina$ – ryšio modulio kaina. Kainos vertinamos išrinkus pigiausią tinkamą modulį Mouser internetiniame kataloge. Kainos pateikiamos perkant 100 vienetų modulių.

2.3 lentelė. Komunikacijos protokolų palyginimas

Parametras	WiFi 	ZigBee 	Bluetooth LE 
TP	72 Mbps	250 kbps	1 Mbps
I_{TX}	350 mA	140 mA	16 mA
P/bit	17,5 nW/bit	1,85 μ W/bit	52,8 nW/bit
L_{MAX}	140 m	100 m	100 m
<i>Kaina</i>	8,73 € (Tayo Yuden WYSAGVDX7)	11,72 € (Microchip MRF24J40ME-I/RM)	6,62 € (Microchip RN4020-V/RM)



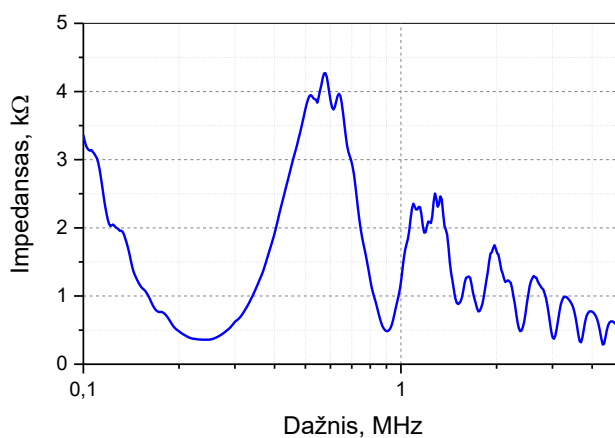
2.7 pav. Komunikacijos protokolų įvairių parametų palyginimo grafikai

3. ULTRAGARSINĖS SISTEMOS ANALIGINĖS DALIES ARCHITEKTŪRŲ SUDARYMAS

3.1. Aukštos įtampos impulsų generatorius

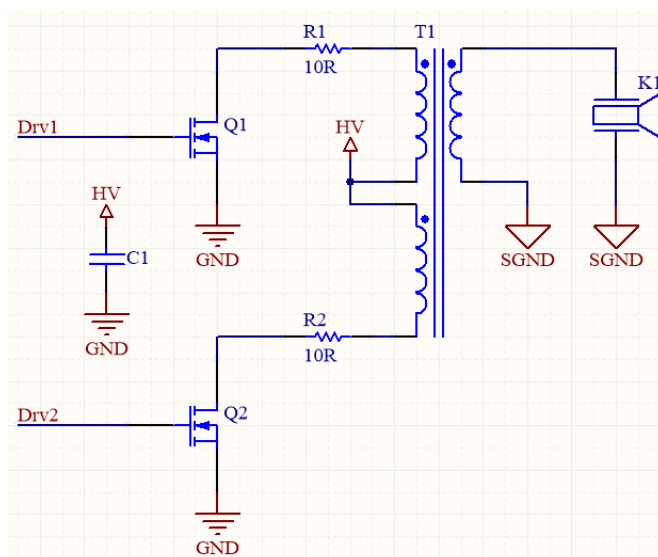
Kadangi tiriamasis darbas orientuojamas į nedideles ir kuo paprasčiau įgyvendinamas ultragarsines sistemas, ultragarsinio žadinimo signalo dažniai pasirenkami iš dažnai naudojamo diapazono – 100 kHz – 10 MHz. Žadinimo generatoriai tokia diapazone nereikalauja didelės galios maitinimo šaltinio, ar itin didelio talpumo kondensatorių, taip pat dažnis nėra toks didelis, kad norint sugeneruoti signalą reiktų išskirtinių, ar didelio tikslumo komponentų.

Kaip galimas ultragarsinio keitiklio variantas, ištirtas Panametrics firmos tiesioginio kontakto ultragarsinis keitiklis, skirtas dirbti 400 kHz dažniu. Svarbus ultragarsinio keitiklio parametras – jo impedansas, kuris kinta priklausomai nuo dažnio. Žinant keitiklio impedansą galima įvertinti apkrovą, tenkančią keitiklį žadinančiam impulsų generatoriui. Šiuo atveju keitiklio impedansas buvo išmatuotas impedanso matuokliu, gauta impedanso priklausomybė nuo dažnio pateikiama 3.1 paveiksle.



3.1 pav. Ultragarsinio keitiklio impedanso grafikas

Žadinimo generatoriaus topologija pasirinkta ganėtinai paprasta, bet efektyvi – tai transformatorius su trimis apvijomis (galima naudoti ir ketvirtą), valdomas dviejų lauko tranzistorių [15] (3.2 paveikslas). Atidarius vieną iš tranzistorių antrinėje apvijoje sugeneruojamas atitinkamo poliarumo impulsas, žadinantis ultragarsinį keitiklį. 10 Ω rezistoriai saugo tranzistorius nuo nepageidaujamų atsidarymų, galinčių įvykti dėl aukštos įtampos impulsų, gaunamų į tranzistoriaus santaką.

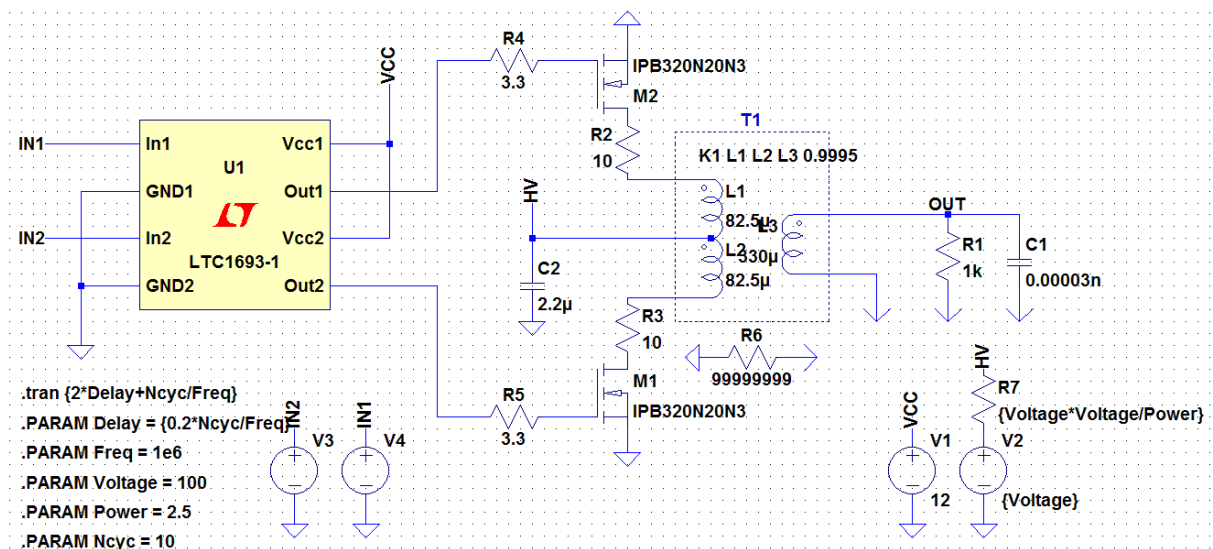


3.2 pav. Aukštos įtampos impulsų generatoriaus schema

Ši aukštos įtampos impulsų generatoriaus topologija turi keletą privalumų lyginant su kitomis žadinimo signalų generatorių topologijomis:

- Generatoriaus išėjimas yra galvaniškai atištas, kadangi naudojamas transformatorius;
- Generatorius gali generuoti teigiamos ir neigiamos poliarizacijos signalus;
- Kadangi naudojamas transformatorius, antrinėje apvijoje privyniojus daugiau vijų galima sugeneruoti aukštesnės, nei išduoda maitinimo šaltinis, įtampos signalą. Tiriamojo prietaiso atveju pasirinkta įtampą didinti dvigubai.

Siekiant ištirti aukštos įtampos impulsų generatoriaus veikimą, sudarytas automatizuotas simuliacinis modelis programoje LTspice IV. Siekiant simuliacinį modelį padaryti kuo lankstesniu, visi parametrai, kuriuos norima dažnai reguliuoti, modelyje įvesti, kaip SPICE direktyvos. Tokiu būdu galima ne tik nekeičiant kelių elementų parametrų reguliuoti norimas simuliacijos įėjimo reikšmes, bet ir išvesti grafikus, kuriuose būtų matomos atskiros išėjimo funkcijos, priklausomai nuo įėjimo parametrų. Simuliacijos modelio vaizdas pateikiamas 3.3 paveiksle.

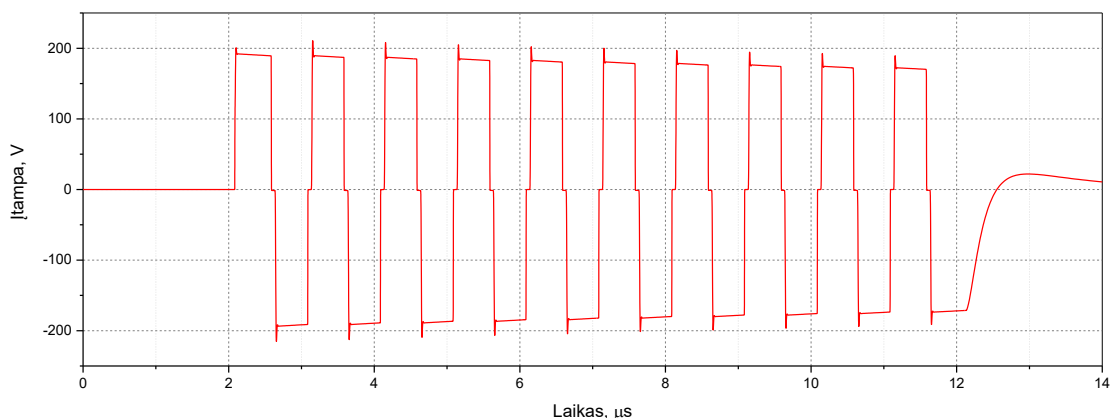


3.3 pav. Aukštos įtampos impulsų generatoriaus simuliacinis modelis LTspice IV aplinkoje

Atliekamo modeliavimo tikslas – išsiaiškinti dviejų komponentų, kondensatoriaus C2 ir transformatoriaus T1 (pagal 3.3 paveiksle pateiktą schemą), parametrus.

Kaip jau minėta anksčiau, nuspręsta naudoti transformatorių su dvigubai daugiau vijų antrinėje, nei pirminėse apvijose – tai sumažins reikalavimus aukštos įtampos maitinimo šaltiniui, bus galima rinktis iš daugiau maitinimo šaltinio topologijos variantų. Atliekant modeliavimą išsiaiškinta, kad siekiant geresnio į keitiklį perduodamų impulsų atidirbimo, transformatoriaus apvijų induktyvumas turėtų būti kuo didesnis (bent jau iki kelių milihenrių eilės induktyvumų). Apžvelgus Farnell katalogą, ieškant nedidelių matmenų transformatoriaus su šerdimi, pasižymintčia dideliu Al induktyvumo faktoriumi, išrinktas Epcos firmos transformatoriaus korpusas B65812C1512T001 su šerdimi B65811JR87. Ši šerdis pasižymi 3,3 μH Al induktyvumo faktoriumi, bei maždaug 30 mm² skerspjūvio plotu, skirtu vynioti apvijoms. Naudojant ganėtinai tvirtą 0,5 mm diametro vielą ant tokios šerdies galima suvynioti transformatorių su 40 vijų – po 10 pirminėms ir 20 antrinei apvijoms – tokia transformatoriaus konfigūracija ir naudojama modeliavime.

Atliekant pirminį modeliavimą su 2,2 μF kondensatoriumi maitinimo grandyje (3.4 paveikslas), galima pastebėti, kad išėjimo signalo amplitudė mažėja su kiekvienu impulsu. Savaiame suprantama, šis amplitudės kritimo greitis priklauso nuo kondensatoriaus, esančio maitinimo grandyje, talpumo (apkrovos varžą paliekame pastovią, 1 kΩ).



3.4 pav. Modeliavimo rezultatas – signalas aukštos įtampos generatoriaus išėjime, esant 1 kΩ apkrovai

Siekiant išsiaiškinti, koks kondensatorius būtų tinkamiausias šioje pozicijoje, simuliacija atlikta su penkiais kondensatoriais, kurie tarpusavyje skiriasi talpumu, konstrukcija, dydžiu, bei kaina. Pagrindinis modeliavimo tikslas – išsiaiškinti, kelis impulsus generatorius gali sugeneruoti esant 1 kΩ apkrovai išėjime, kol įtampos amplitudė nukris iki 0,7 maksimalios amplitudės reikšmės. Modeliavimas atliekamas, naudojant 0,1 MHz ir 1 MHz žadinimo dažnius. Kondensatorių palyginimas pateikiamas 3.1 lentelėje.

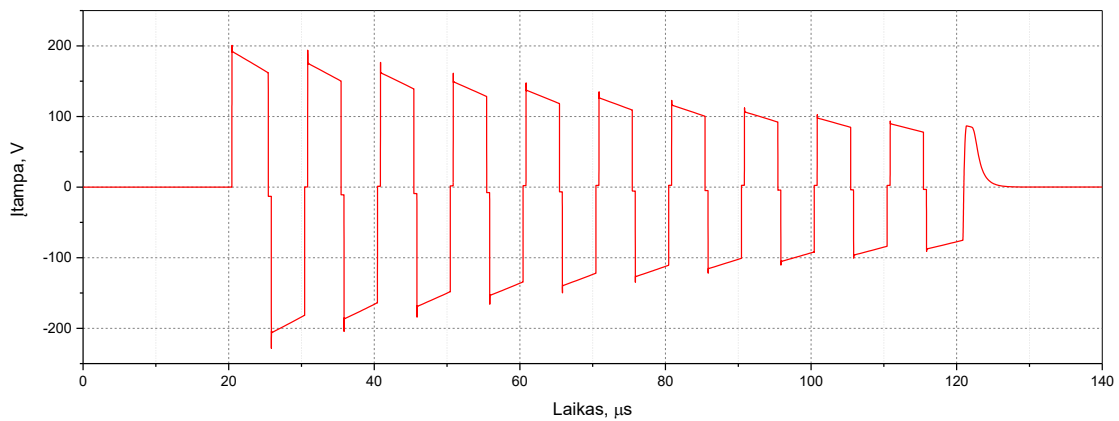
3.1 lentelė. Aukštos įtampos impulsų generatoriuje naudojamų kondensatorių palyginimas

Tipas	Keramikinis X7R	Plėvelinis (PP)	Keramikinis X7T	Keramikinis (kelių aukštų) X7R	Elektrolitinis
Talpa	0,47 μF	1 μF	2,2 μF	2,2 μF	10 μF
Įtampa	200 V	160 V	250 V	250 V	160 V
Gamintojo kodas	MC1210B474K 201CT	R75GI4100400 0J	CGA9P3X7T2 E225K250KE	C2220C225MA R2CT500	EEVEB2C100 Q
Generuojamų impulsų kiekis, f = 1 MHz	7	13	29	29	129
Generuojamų impulsų kiekis, f = 100 kHz	1	2	5	5	22
Kaina (@1k)	0,14 €	0,383 €	0,987 €	1,84 €	0,557 €
Plotas	8 mm ²	180 mm ²	29 mm ²	29 mm ²	100 mm ²

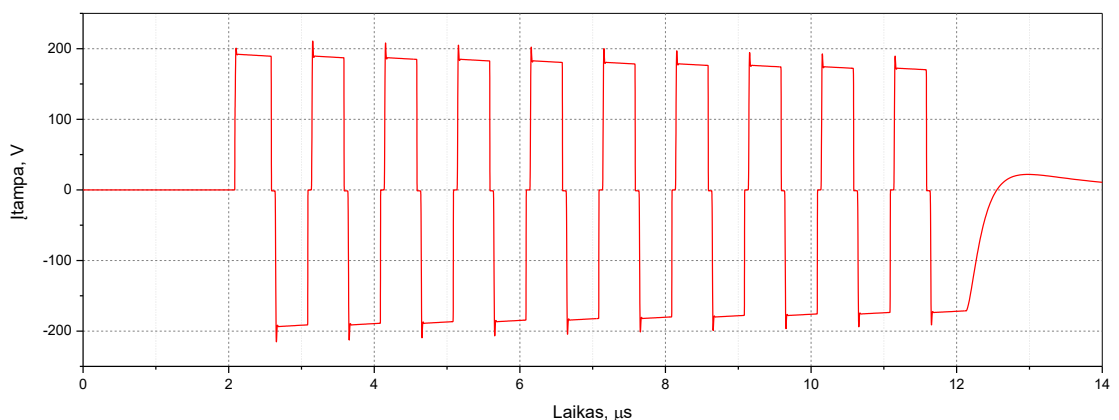
Rezultatai, pateikti 3.1 lentelėje rodo, kad daugiausiai impulsų nenukritus įtampai galima sugeneruoti naudojant elektrolitinį kondensatorių EEVEB2C100Q. Visgi elektrolitinio kondensatoriaus naudojimas turi trūkumų – didesnė nuosekloji varža, palyginus trumpas

tarnavimo laikas, didesnis komponento užimamas plotas. Kitų komponentų trūkumai irgi aiškiai pastebimi – kelių sluoksnių kondensatorius C2220C225MAR2CT500 dėl išskirtinės technologijos yra brangesnis, plėvelinis kondensatorius R75GI41004000J užima didelį plotą, o keramikinis kondensatorius MC1210B474K201CT yra per mažos talpos. Šiuo atveju optimalus variantas yra keramikinis kondensatorius CGA9P3X7T2E225K250KE – nors šio komponento kaina didesnė nei kitų palyginime naudojamų kondensatorių, šis pasižymi pakankama talpa bei didesne įtampos riba, yra nedidelis, bei ilgaamžis.

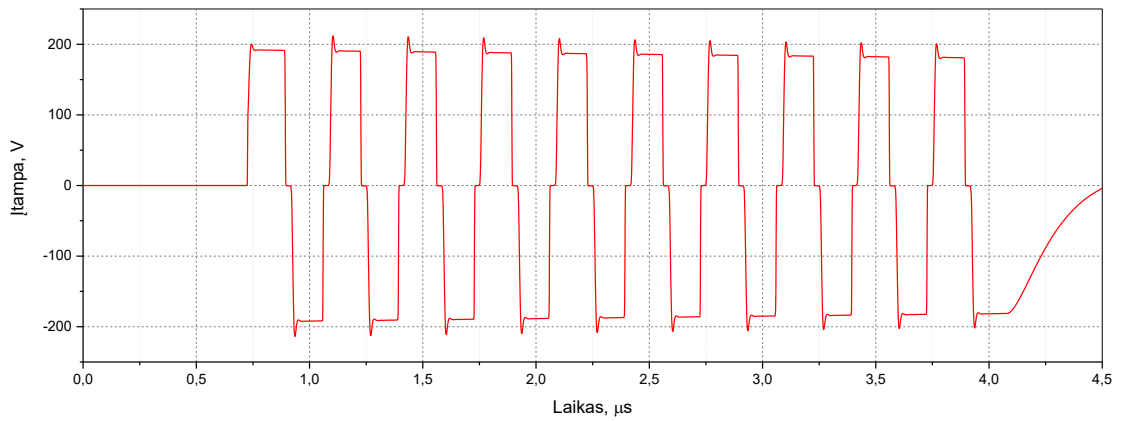
Nustačius optimalius komponentų parametrus atliekamas impulsų generatoriaus modeliavimas su keliomis skirtingomis apkrovomis (rezistyvine $1\text{ k}\Omega$ ir talpumine $3,3\text{ nF}$) prie keleto skirtingų dažnių, generuojant 10 impulsų. Modeliavimo rezultatai pateikiami 3.5 – 3.11 paveiksluose.



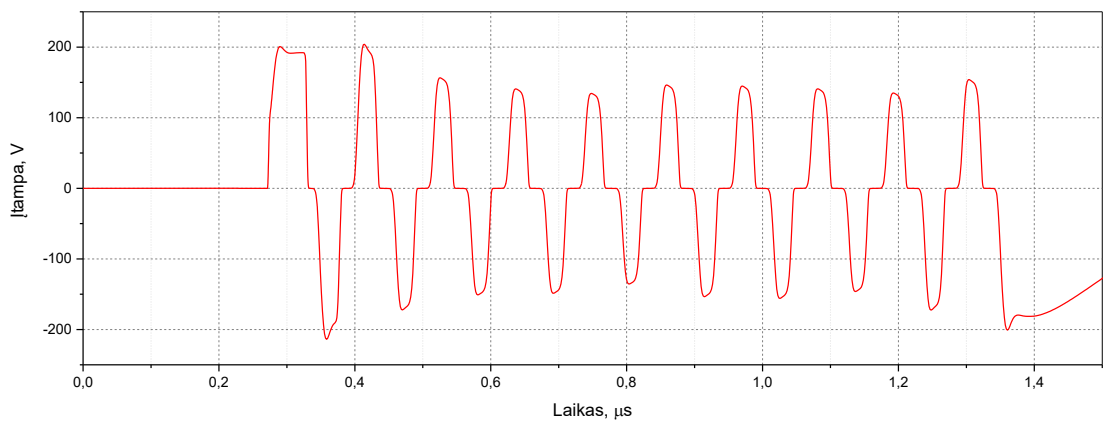
3.5 pav. Išėjimas aukštos įtampos generatoriaus išėjime, apkrova – $1\text{ k}\Omega$, impulsų dažnis – 100 kHz



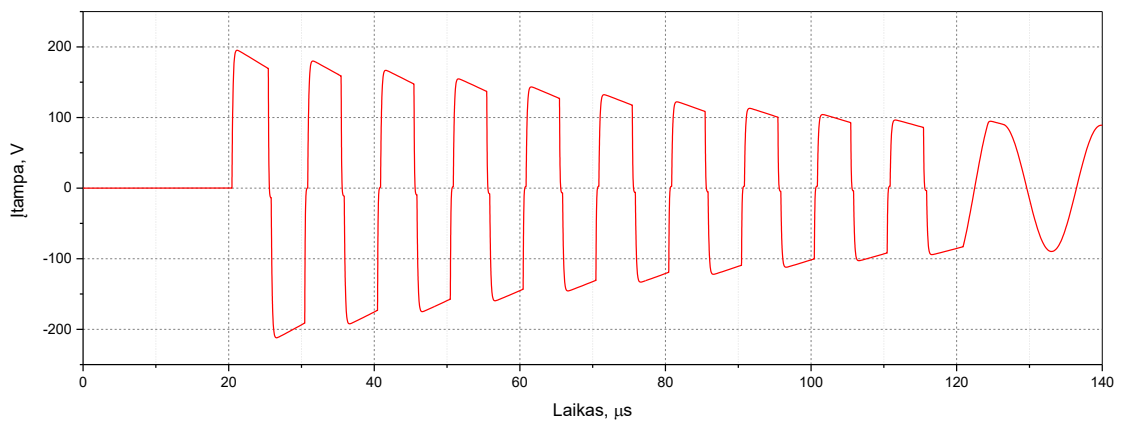
3.6 pav. Išėjimas aukštos įtampos generatoriaus išėjime, apkrova – $1\text{ k}\Omega$, impulsų dažnis – 1 MHz



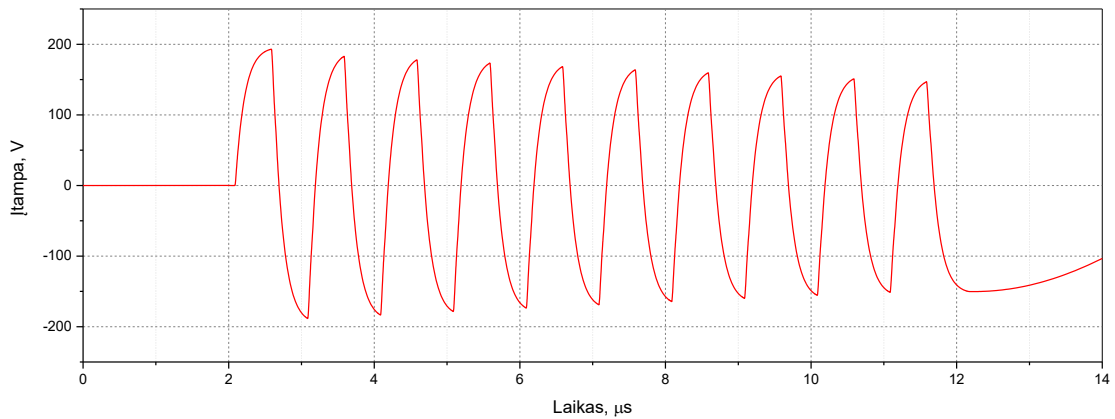
3.7 pav. Išėjimas aukštos įtampos generatoriaus išėjime, apkrova – 1 kΩ, impulsų dažnis – 3 MHz



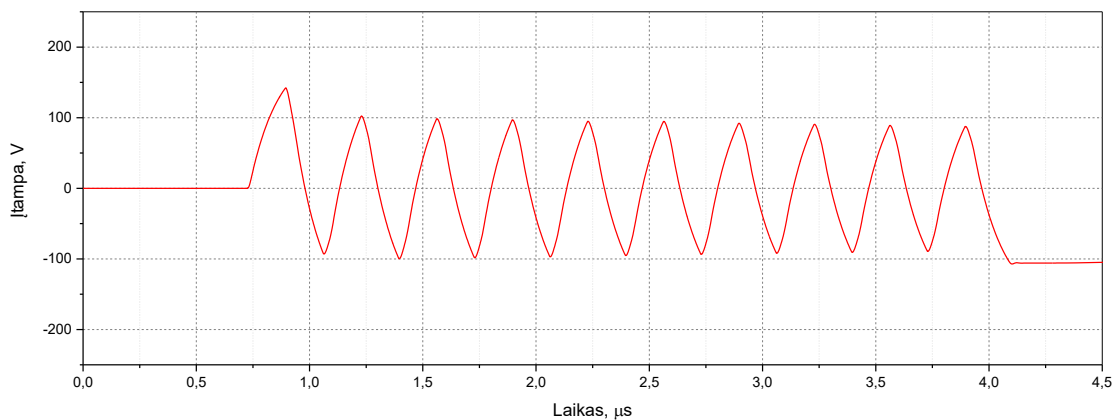
3.8 pav. Išėjimas aukštos įtampos generatoriaus išėjime, apkrova – 1 kΩ, impulsų dažnis – 9 MHz



3.9 pav. Išėjimas aukštos įtampos generatoriaus išėjime, apkrova – 3,3 nF, impulsų dažnis – 100 kHz



3.10 pav. Išėjimas aukštos įtampos generatoriaus išėjime, apkrova – 3,3 nF, impulsų dažnis – 1 MHz



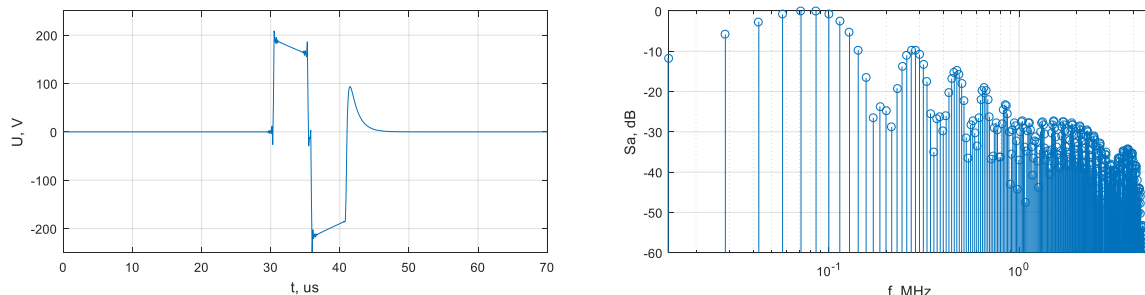
3.11 pav. Išėjimas aukštos įtampos generatoriaus išėjime, apkrova – 3,3 nF, impulsų dažnis – 3 MHz

Iš 3.5 ir 3.9 paveiksluose pateiktų grafikų matoma, kad generatoriaus signalo amplitudė prie 100 kHz dažnio smarkiai slopsta esant ir varžinei ir talpinei apkrovoms, todėl naudojant šį dažnį žaditimui vertėtų naudoti tik kelis impulsus.

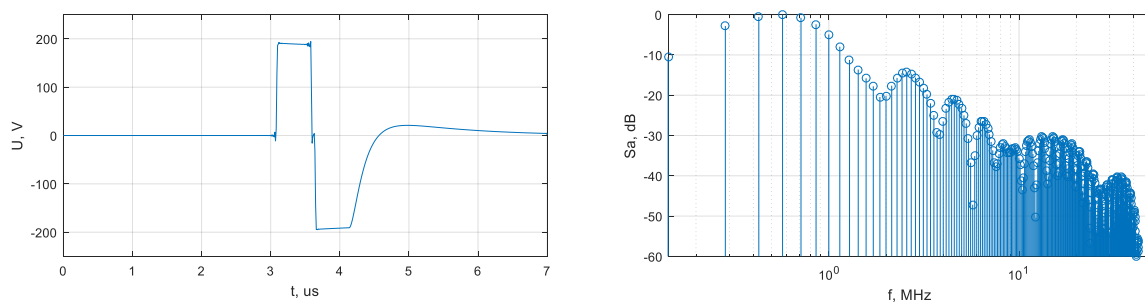
Prijungus rezistyvinę apkrovą, generatorius puikiai atidirba impulsus 1 MHz – 3 MHz diapazone – signalo frontai pakankamai statūs, amplitudė, generuojant net ir 10 impulsų, mažėja nežymiai (3.6 ir 3.7 paveikslai). Visgi, su varžine apkrova pasiekus 9 MHz dažnį, signalas tampa nebe panašus į stačiakampį, ypatingai išryškėja dėl tranzistoriaus atsidarymo laiko atsirandančios „pakopos“ signale (3.8 pav.).

Su talpumine apkrova išėjimo signalas stačiakampės formos yra tik 100 kHz – 1 MHz dažnių diapazone (3.9 paveikslas). Aukštesniuose dažniuose išėjimo signalas dėl apkrovos įsikrovimo tampa vis panašesnis į pjūklo formos signalą (3.10 pav.), signalo amplitudė pradeda mažėti (3.11 paveikslas).

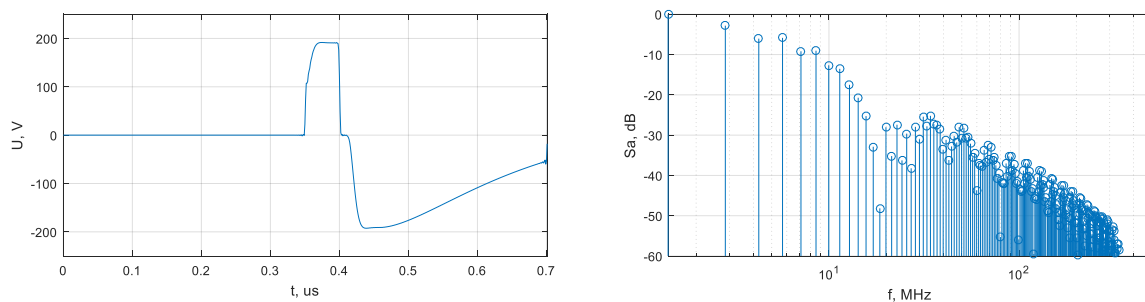
Atvejais, kai keitiklis žadinamas vienu impulsu, yra svarbu, kokia signalo forma yra laiko srityje, taip pat domina impulso spektras. 3.12 - 3.16 paveiksluose pateikiami keletu dažnių vienetinių dvipolių impulsų vaizdai laiko ir dažnių srityse.



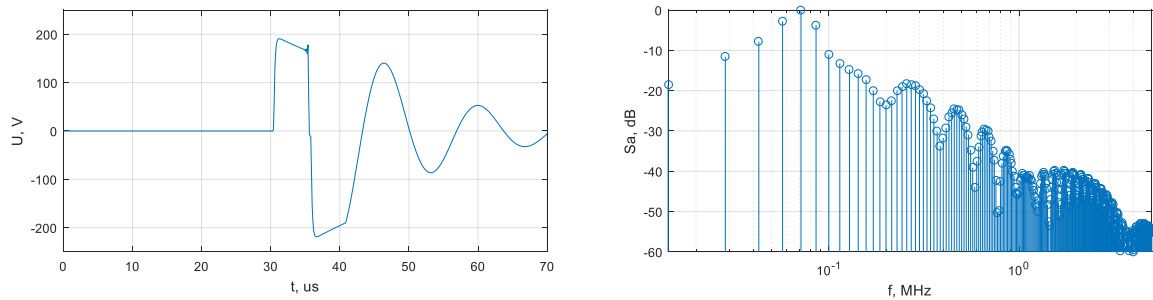
3.12 pav. Dvipolio vienetinio impulso vaizdas laiko srityje (kairėje) ir spektras (dešinėje). Signalo dažnis – 100 kHz, apkrova – 1 k Ω



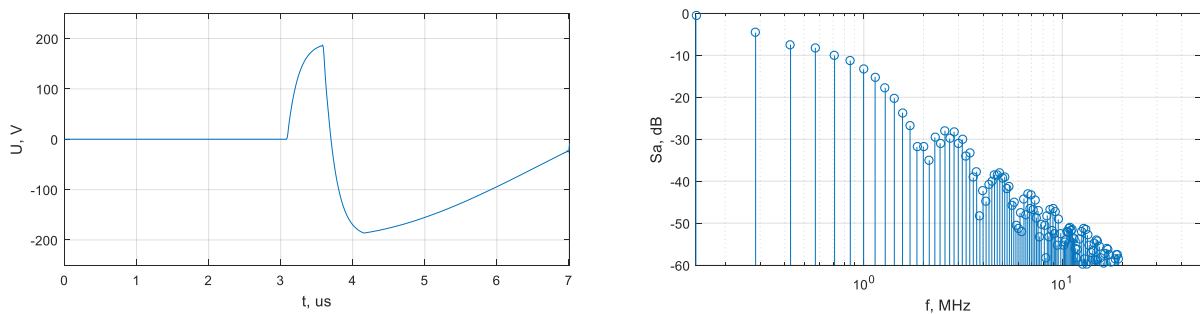
3.13 pav. Dvipolio vienetinio impulso vaizdas laiko srityje (kairėje) ir spektras (dešinėje). Signalo dažnis – 1 MHz, apkrova – 1 k Ω



3.14 pav. Dvipolio vienetinio impulso vaizdas laiko srityje (kairėje) ir spektras (dešinėje). Signalo dažnis – 10 MHz, apkrova – 1 k Ω



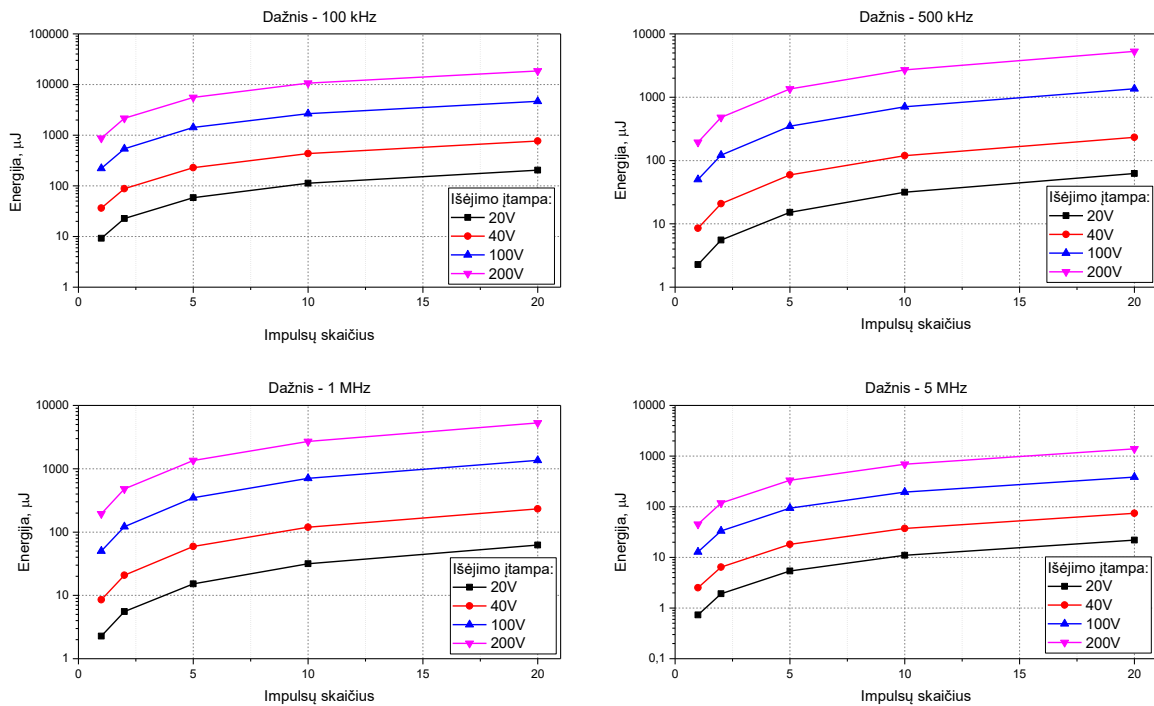
3.15 pav. Dvipolio vienetinio impulso vaizdas laiko srityje (kairėje) ir spektras (dešinėje). Signalo dažnis – 100 kHz, apkrova – 3,3 nF



3.16 pav. Dvipolio vienetinio impulso vaizdas laiko srityje (kairėje) ir spektras (dešinėje). Signalo dažnis – 1 MHz, apkrova – 3,3 nF

Grafikuose, esančiuose 3.12 - 3.16 paveiksluose matome, kad vieną impulsą generatorius atidirba geriau, negu impulsų seką, generuojant vieną impulsą galima pasiekti kiek didesnį žadinimo dažnį, nei generuojant impulsų seką. Visų signalų spektrai panašūs į teorinį dvipolio impulso spektrą. Naudojant talpuminę 3,3 nF apkrovą (3.15 pav. ir 3.16 pav.), transformatoriaus išėjime, po impulso, prasideda rezonansinė reakcija. Šią problemą išspręsti galima būtų transformatoriuje privyniojus papildomą apviją, prie kurios prijungta tranzistoriumi valdoma apkrova sugertų nepageidaujamą rezonansinį signalą.

Norint įvertinti sistemos energetinius parametrus reikia ištirti aukštos įtampos impulsų generavimui suvartojamą energiją. Tyrimas atliktas impulsų generatoriaus modelyje matuojant energiją, imamą iš maitinimo kondensatoriaus, prie septynių skirtingų dažnių ir keturių skirtingų įtampų, keičiant generuojamų impulsų kiekį. 3.17 paveiksle pateikiami rezultatai, kaip suvartojamos energijos kiekis priklauso nuo generuojamų impulsų skaičiaus prie skirtingų įtampų bei dažnių.



3.17 pav. Aukštos įtampos impulsų generatoriaus suvartojamos energijos priklausomybės nuo generuojamų impulsų skaičiaus prie skirtingų įtampų bei dažnių grafikai

Iš grafikų, pateikiamų 3.17 paveiksle matome, kad energijos suvartojimo tendencijos panašios – vyrauja beveik tiesinė priklausomybė tarp generuojamų impulsų kiekio (esant didesniai impulsų skaičiui), taip pat matoma, kad tam tikru santykiu didėjant išėjimo įtampai suvartojama energija didėja šio santykio kvadratu.

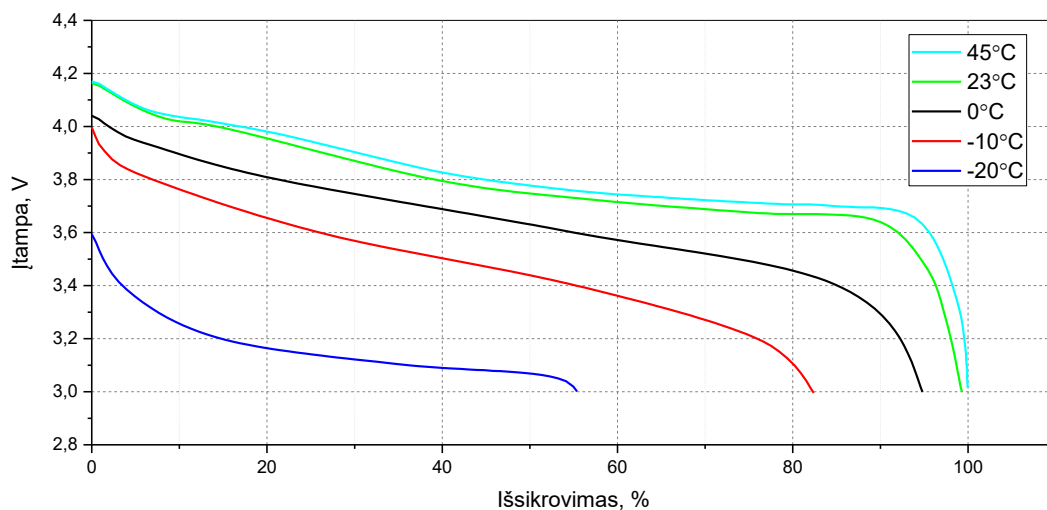
3.2. Aukštos įtampos maitinimo šaltinis

Kadangi ultragarsiniams keitikliams žadinti paprastai reikalinga 20 V – 200 V įtampa, reikia parinkti, arba suprojektuoti aukštos įtampos maitinimo šaltinį, kuris ne tik aprūpintų aukštos įtampos impulsų generatorių pakankama įtampa, reikalinga keitikliui žadinti, bet ir būtų kiek galima efektyvesnis. Privalumas būtų reguliuojama išėjimo įtampa. Taip pat, siekiant išlaikyti darbo pradžioje užsibrėžtus tikslus, reikia skaičiuoti apytikslių įtampos keitiklio kainą, bei įvertinti įtampos keitiklio plokštėje užimamą plotą. Palyginime vertinami aukštos įtampos keitiklio parametrai:

- Išėjimo įtampa;
- Atiduodama galia;
- Naudingumo koeficientas;
- Kaina;
- Užimamas plotas.

Tiriant įtampą aukštinančius keitiklius nuspręsta apžvelgti dvi keitiklių topologijas – *Charge pump* ir *Flyback* keitiklius. Siekiant ištirti šių keitiklių panaudojimo sistemoje galimybes reikia nustatyti parametrus, kurie visose sistemose išliks tie patys, taip sumažinant kintamųjų kiekį.

Kadangi darbo tikslas yra ištirti belaidžių ultragarsinių sensorių, maitinamų iš akumuliatoriaus, sukūrimo galimybes, galima nustatyti aukštos įtampos maitinimo šaltinio įėjimo įtampą. Šiuo metu rinkoje daugiausiai naudojami yra ličio jonų akumuliatoriai, kurių darbinė įtampa, priklausomai nuo išsikrovimo lygio svyruoja nuo 3,4 V iki 4,2 V. Apžvelgus internetinius katalogus išrinkti du ličio jonų akumuliatoriai, kuriuos būtų galima panaudoti šioje sistemoje – firmos BAK akumuliatoriai 103456A-1S-3M ir 18650CA-2P-3J. Tarpusavyje šių akumuliatorių talpa skiriasi daugiau nei dvigubai – atitinkamai 2050 mAh ir 4500 mAh – įtampa vienoda – 3,7 V. Akumuliatorių matmenys – 56 mm x 36,8 mm x 10,7 mm ir 69 mm x 37 mm x 18,5 mm. Ličio jonų akumuliatoriaus įtampos priklausomybės nuo išsikrovimo prie skirtingų temperatūrų pateiktas 3.18 paveiksle.



3.18 pav. Ličio jonų akumuliatoriaus įtampos priklausomybė nuo išsikrovimo lygio esant skirtingoms aplinkos temperatūroms

Taip pat galime apytiksliai apibrėžti aukštos įtampos keitiklio išėjimo parametrus – įtampą ir srovę. Keitikliui žadinti impulsais paprastai naudojamos įtampos nuo 20 V iki 200 V, todėl parenkamo / projektuojamo aukštos įtampos maitinimo šaltinio maksimali įtampa turėtų būti apie 100 V.

Maitinimo šaltinių palyginimui pasirinkta apžvelgti vieną integruotą maitinimo šaltinį ir dvi šioje sistemoje galimas naudoti maitinimo šaltinių topologijas – *Charge pump* ir *Flyback*.

3.2.1. Pico Electronics maitinimo šaltinis

Apžvelgus interneto katalogus pavyko rasti tik vienos rūšies aukštos įtampos maitinimo šaltinį, kuris tenkintų visus užsiduotus reikalavimus – tai firmos Pico Electronics maitinimo šaltinis 5SVV100S. Maitinimo šaltinio parametrai:

- Ilgis - 36,3 mm, plotis - 31,5 mm, aukštis – 11 mm
- Įėjimo įtampa – nuo 2,5 V iki 5 V
- Išėjimo įtampa – 47 V – 100 V
- Maksimali atiduodama galia – 4 W
- Naudingumo koeficientas, esant pilnai apkrovai – 83 %



3.19 pav. Gamintojo puslapyje pateikiama maitinimo šaltinio iliustracija

Šį maitinimo šaltinį patogiu nauoti sistemoje, kadangi jam nereikia jokių papildomų komponentų – aukšta įtampa gaunama tik pajungus prietaisą keturiais kontaktais. Visgi toks paprastumas kartu atneša ir trūkumų – maitinimo šaltinio išėjimo įtampa yra tiesiogiai proporcinga įėjimo įtampai, taigi aukštos įtampos išėjime bus maždaug 64 V – 84 V įtampa, kuri kis priklausomai nuo akumulatoriaus išsikrovimo ir kurios nebus galima reguliuoti.

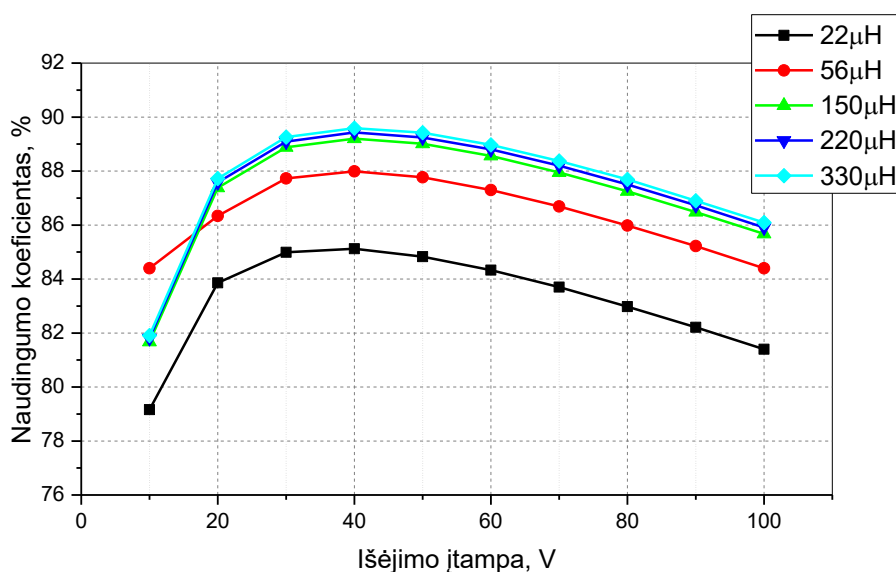
Gamintojo puslapyje pateikiama maitinimo šaltinio kaina – 116,63 dolerio. Niekur aiškiai nenurodyta, bet galima manyti, kad ši kaina galioja perkant vieną modulį, taigi gaminant didesnį sensorių kiekį galima tikėtis nuolaidų.

3.2.2. „Charge pump“ topologijos aukštos įtampos maitinimo šaltinis

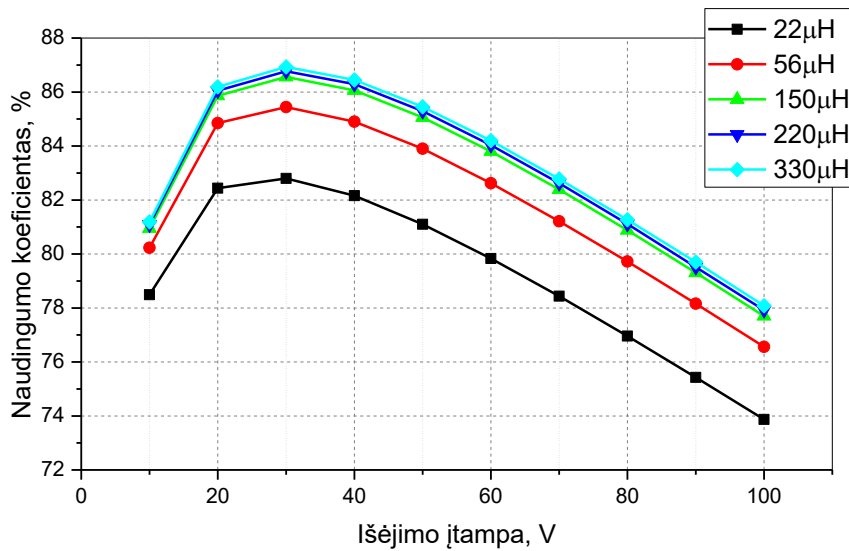
Tiriant Charge pump topologijos keitiklį, valdiklį nuspręsta rinktis iš įmonės Linear Technology katalogo. Šios įmonės keitikliai pasirinkti dėl aukštos kokybės ir patikimumo, taip pat galimybės simuliuoti jų veikimą pasinaudojant įrankiais LTspice IV ir LTpowerCAD II.

Naudojant programą LTpowerCAD II rastas projektuojamam aukštos įtampos šaltiniui tinkamiausias valdiklis – LT3579. Ši valdiklio mikroschema pasižymi įėjimo įtampomis nuo 2,5 V iki 16 V, maksimalia 100 V išėjimo įtampa, turi vidinį raktą.

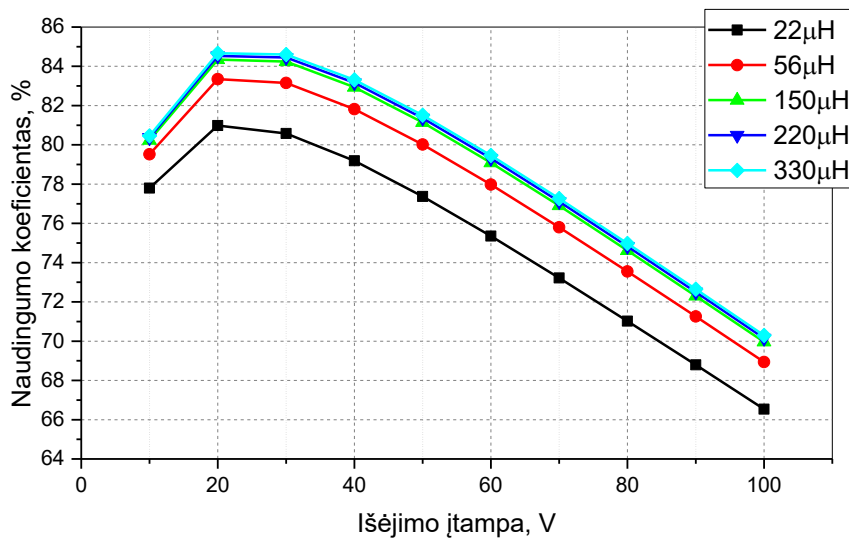
Pradžioje, siekiant išgauti maksimalų maitinimo šaltinio naudingumo koeficientą ir išsiaiškinti optimalius projektuojamo maitinimo šaltinio elementų parametrus, buvo atliktas naudingumo koeficiento modeliavimas priklausomai nuo išėjimo įtampos, ritės induktyvumo ir keitiklio dažnio. Modeliavimas atliktas naudojant LTpowerCAD II įrankį. Keičiant išėjimo įtampos ir keitiklio perjungimo dažnio vertes, buvo gautos penkios galimos naudoti induktyvumų reikšmės – 22 μH , 56 μH , 150 μH , 220 μH ir 330 μH – pasirinkus šias induktyvumų reikšmes kaip konstantas, buvo reguliuojama išėjimo įtampa, bei keitiklio perjungimo dažnis ir registruojamas naudingumo koeficientas. Tiriama keitiklio dažniai – 200 kHz, 400 kHz, 600 kHz ir 750 kHz, išėjimo įtampa keičiama kas 10 V, nuo 10 V iki 100 V. Simuliacijos rezultatai pateikiami 3.20 - 3.23 paveiksluose.



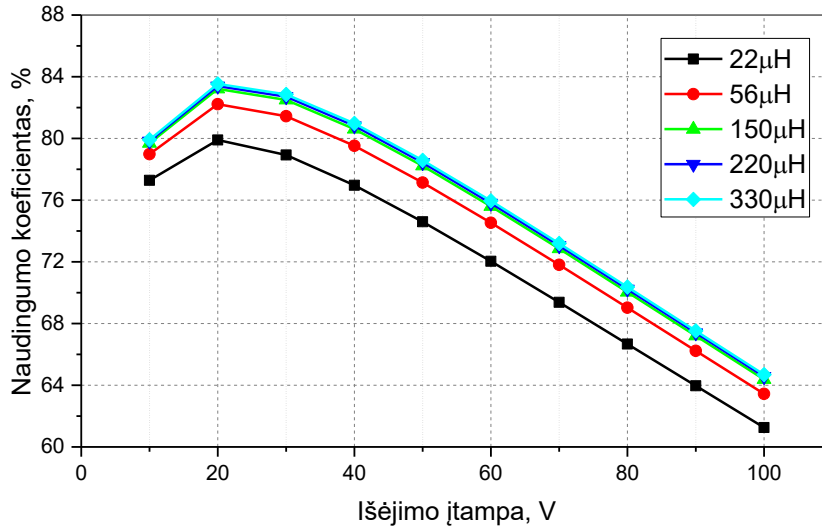
3.20 pav. Maitinimo šaltinio naudingumo koeficiento priklausomybė nuo išėjimo įtampos, naudojant skirtingo induktyvumo ritės. Įtampos keitiklio perjungimo dažnis – 200 kHz



3.21 pav. Maitinimo šaltinio naudingumo koeficiento priklausomybė nuo išėjimo įtampos, naudojant skirtingo induktyvumo rites. Įtampos keitiklio perjungimo dažnis – 400 kHz

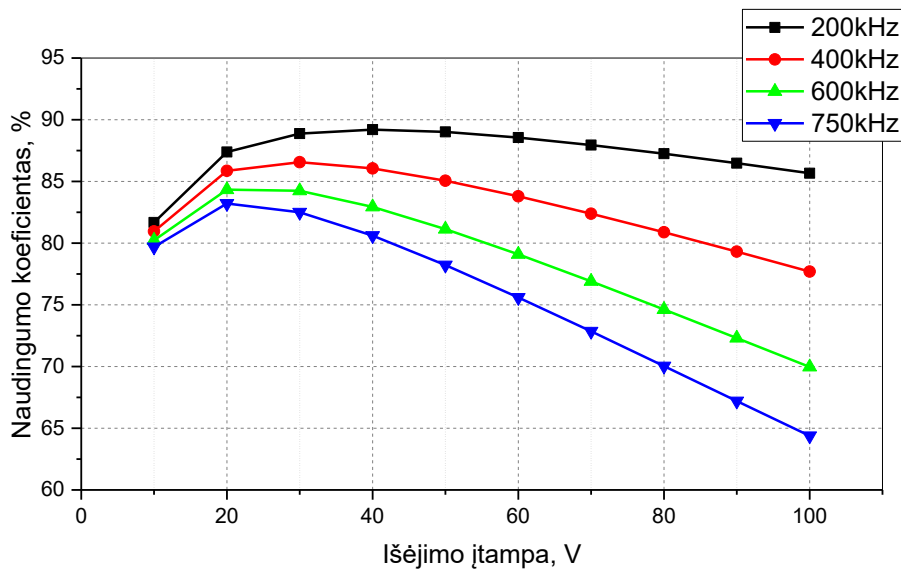


3.22 pav. Maitinimo šaltinio naudingumo koeficiento priklausomybė nuo išėjimo įtampos, naudojant skirtingo induktyvumo rites. Įtampos keitiklio perjungimo dažnis – 600 kHz



3.23 pav. Maitinimo šaltinio naudingumo koeficiento priklausomybė nuo išėjimo įtampos, naudojant skirtingo induktyvumo rites. Įtampos keitiklio perjungimo dažnis –750 kHz

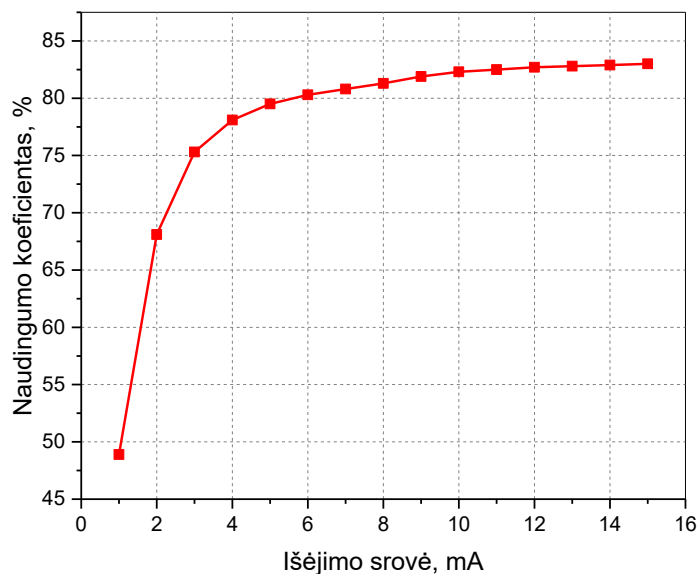
Grafikuose, pateiktuose 3.20 - 3.23 paveiksluose aiškiai pastebima tendencija - prie visų perjungimo dažnių maitinimo šaltinio naudingumo koeficientas tiesiogiai priklauso nuo ritės induktyvumo – kuo didesnis ritės induktyvumas, tuo naudingumo koeficientas aukštesnis. Visgi, visuose pateiktuose grafikuose matoma, kad naudingumo koeficientai prie 150 μH, 220 μH ir 330 μH induktyvumų skiriasi tik keliomis dešimtosiomis procento dalimis. Savaiame aišku, būtų netikslinga naudoti didesnę induktyvumą dėl tokių mažų pakitimų naudingume, tokiu būdu didinant ritės matmenis, todėl prietaise pasirinkta naudoti 150 μH induktyvumo ritę, kaip optimalų variantą tarp naudingumo ir ritės matmenų. 3.24 paveiksle pateikiamas naudingumo koeficiento priklausomybės nuo įtampos grafikas, esant skirtingiems įtampos keitiklio perjungimo dažniams. Ritės induktyvumas pastovus – 150 μH.



3.24 pav. Maitinimo šaltinio naudingumo koeficiento priklausomybė nuo išėjimo įtampos, esant skirtingiems įtampos keitiklio perjungimo dažniams. Naudojamas ritės induktyvumas – 150 μ H

Grafike, pateiktame 3.24 paveiksle matoma kad įtampos keitiklio naudingumo koeficientas tuo didesnis, kuo mažesnis yra perjungimo dažnis, taigi tiriamoje sistemoje pasirinkta naudoti 200 kHz perjungimo dažnį. Siekiant labiau išsiaiškinti į Charge pump tipo įtampos keitiklio veikimą, šis keitiklis, naudojant gautus parametrus, sumodeliuojamas LTspice IV aplinkoje.

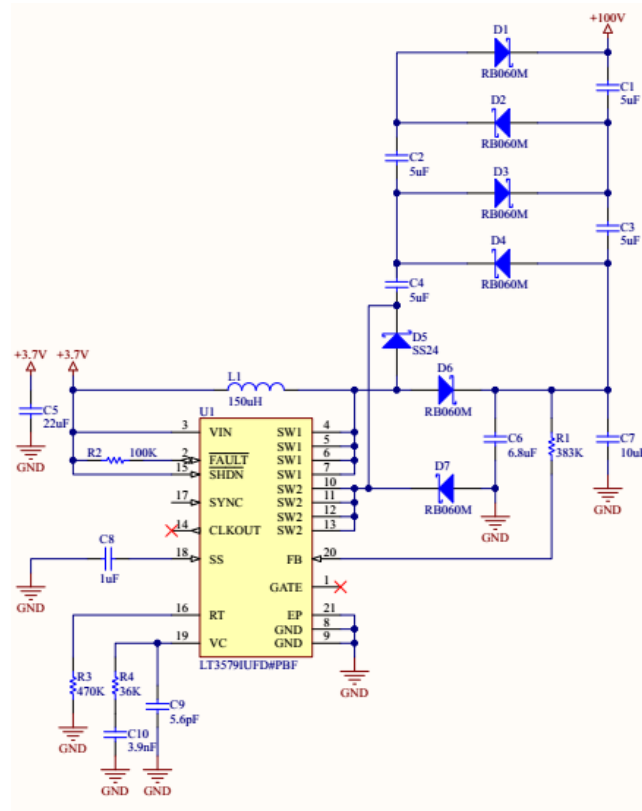
Atliekant modeliavimą ištirta maitinimo šaltinio naudingumo koeficiento priklausomybė nuo srovės, tekančios apkrova. Modeliuojamoje schemoje išėjimo įtampa parinkta pastovi – 100 V, keičiama buvo apkrovos varža, taip reguliuojant išėjimo srovę. Modeliavimo rezultatai pateikiami 3.25 paveiksle.



3.25 pav. Maitinimo šaltinio naudingumo koeficiento priklausomybė nuo išėjimo srovės. Maitinimo šaltinio išėjimo įtampa pastovi – 100 V

Iš 3.25 paveiksle pateikto grafiko matome, kad maitinimo šaltinio naudingumo koeficientas tuo didesnis, kuo didesnė srovė yra reikalinga išėjime. Šiuo atveju tokia maitinimo šaltinio savybė yra priimtina, kadangi aukštos įtampos maitinimo šaltinio paskirtis yra krauti impulsų generatoriaus įėjimo kondensatorių.

Galutinė tiriamo įtampos šaltinio schema pateikiama 3.26 paveiksle. Reguluoti maitinimo šaltinio išėjimo įtampą galima rezistorių R1 pakeitus į skaitmeninį potenciometrą, kurį galima valdyti iš centrinio mikrovaldiklio.



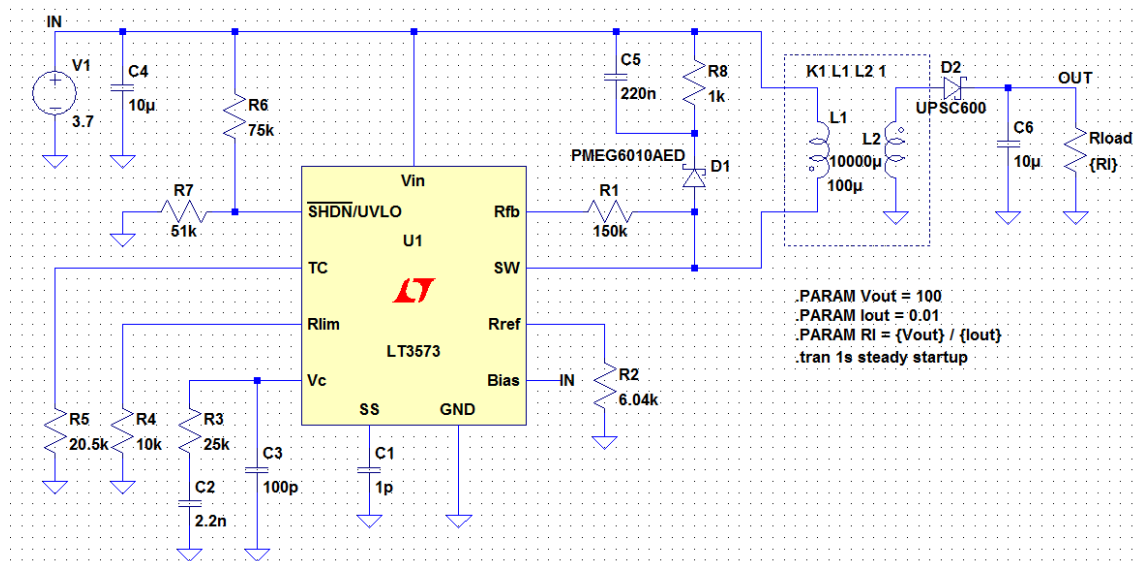
3.26 pav. Galutinė aukštos įtampos maitinimo šaltinio Charge pump topologijos schema

3.2.3. „Flyback“ topologijos aukštos įtampos maitinimo šaltinis

Tiriant galimybes sistemoje naudoti Flyback tipo keitiklį, kaip ir Charge pump keitiklio atveju, maitinimo šaltinio valdiklis buvo renkamas iš Linear Technology firmos katalogo. Susiaurinus paiešką iki dviejų valdiklių - LT3573 ir LT8301, buvo pasirinktas LT3573, kadangi šis valdiklis turi daugiau konfigūravimo galimybių, nei LT8301.

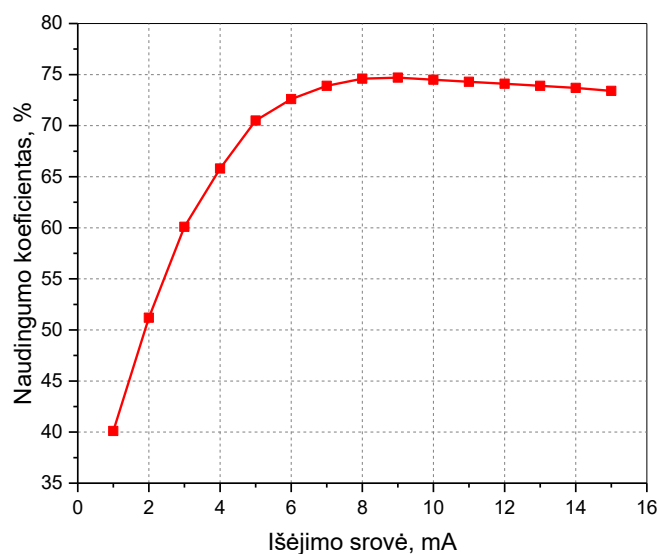
Siekiant ištirti šio keitiklio veikimą ir, svarbiausia, naudingumo koeficientą, buvo sudarytas maitinimo šaltinio simuliacinis modelis (LTspice IV aplinkoje). Modelyje galima reguliuoti išėjimo apkrovą, tokiu būdu stebint kaip maitinimo šaltinio naudingumo koeficientas priklauso

nuo išėjimo srovės. Simuliacinio modelio vaizdas LTspice IV aplinkoje pateikiamas 3.27 paveiksle.



3.27 pav. Flyback topologijos aukštos įtampos maitinimo šaltinio simuliacinis modelis

Panaudojant modelį ištirta galima maitinimo šaltinio naudingumo koeficiento priklausomybė nuo išėjimo srovės. Simuliacijos metu išėjimo įtampa naudota pastovi – 100 V, įtampą galima reguliuoti prie keitiklio mikroschemos FB įėjimo, nuosekliai rezistoriui R1, į žemę prijungiant skaitmeninį potenciometrą, kurį galima valdyti iš centrinio mikrovaldiklio. Gautas grafikas pateikiamas 3.28 paveiksle. Pagal gautus duomenis maitinimo šaltinio maksimalus naudingumo koeficientas yra artimas 75 %.



3.28 pav. Maitinimo šaltinio naudingumo koeficiento priklausomybė nuo išėjimo srovės. Maitinimo šaltinio išėjimo įtampa pastovi – 100 V

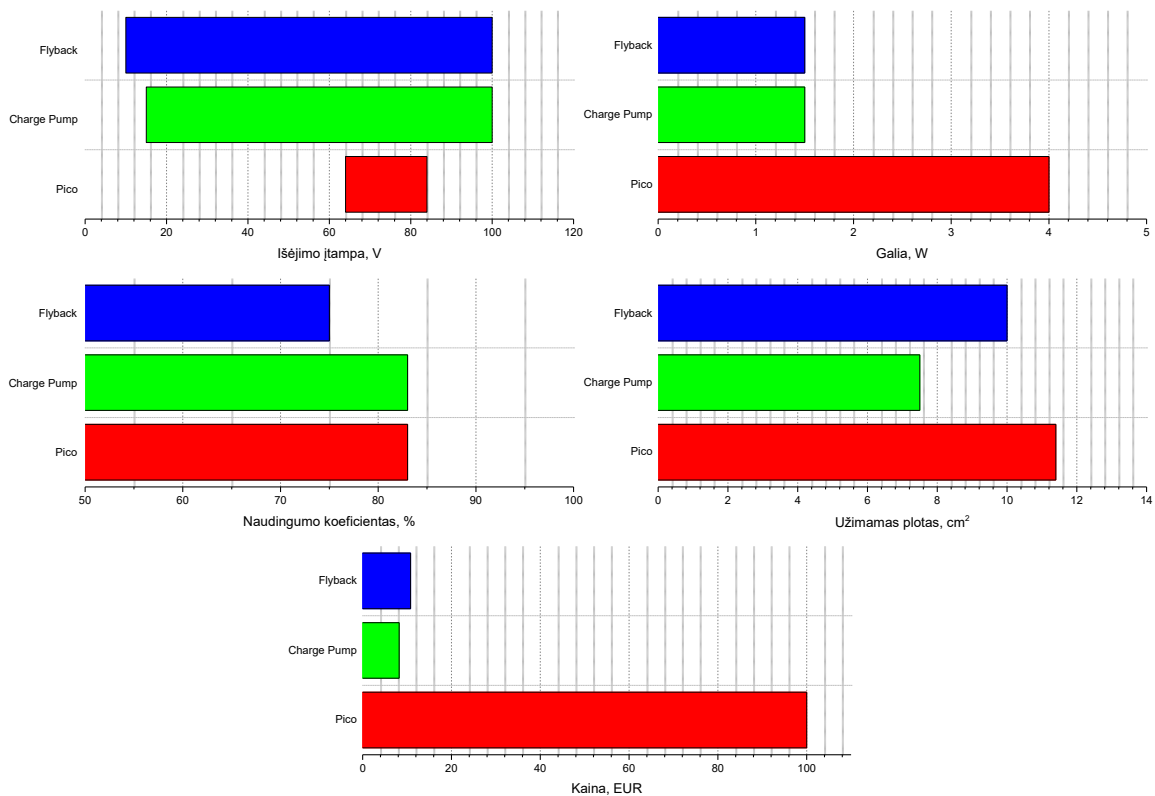
3.2.4. Aukštos įtampos maitinimo šaltinių variantų palyginimas

Ištyrus ir aprašius tris galimus aukštos įtampos maitinimo šaltinių variantus, atliekamas šių variantų palyginimas. Palyginime apžvelgiami šie maitinimo šaltinių kriterijai:

- *Įtampa* – išėjimo įtampų diapazonas;
- *Galia* – maksimali išėjime atiduodama galia;
- *Naudingumas* – naudingumo koeficientas;
- *Plotas* – apytikslis plotas, kurį maitinimo šaltinis užima plokštėje;
- *Kaina* – apytikslė maitinimo šaltinio dalių kaina, perkant / surenkant 1000 vienetų;
- *Papildomi privalumai*.

3.2 lentelė. Aukštos įtampos maitinimo šaltinio variantų palyginimas

Parametras	Pico Electronics 5SVV100S	Charge pump keitiklis (LT3579)	Flyback keitiklis (LT3573)
<i>Įtampa</i>	64 V – 84 V (nereguliuojama)	15 V – 100 V (reguliuojama)	10 V – 100 V (reguliuojama)
<i>Galia</i>	4 W	1,5 W	1.5 W
<i>Naudingumas</i>	≤ 83 %	≤ 83 %	< 75 %
<i>Plotas</i>	11,4 cm ²	12 cm ²	12 cm ²
<i>Kaina</i>	~100 €	~8,20 €	~10,80 €
<i>Papildomi privalumai</i>	–	–	Parentant tinkamą transformatorių teoriškai galima gauti bet kokią išėjimo įtampą



3.29 pav. Aukštos įtampos maitinimo šaltinio variantų palyginimo grafikai

Iš maitinio šaltinių palyginimo 3.2 lentelė lentelėje matome, kad Pico Electronics keitiklis turi galios pranašumą prieš kitus maitinimo šaltinius, taip pat pasižymi gan aukštu naudingumo koeficientu. Visgi didelis trūkumas yra tas, kad maitinimo šaltinio išėjimo įtampos negalima reguliuoti, įtampa automatiškai kinta priklausomai nuo baterijos išsikrovimo lygio. Taip pat šio maitinimo šaltinio kaina yra žymiai aukštesnė, nei kitų dviejų variantų.

Projektuojant maitinimo šaltinį, pasižymintį išėjimo įtampa iki 100 V kaip geriausias pasirinkimo variantas atrodo Charge pump topologijos keitiklis. Šio keitiklio privalumai prieš kitus variantus – aukštas naudingumo koeficientas, mažesnė komponentų kaina, taip pat mažesnis užimamas plotas.

Tais atvejais, kai maitinimo šaltinio išėjime reikalingos didesnės nei 100 V įtampos, reikėtų rinktis Flyback maitinimo šaltinio topologiją – toks maitinimo šaltinis užima nedidelį plotą, kaina labiausiai priklauso nuo schemoje naudojamo transformatoriaus.

3.3. Analoginio signalo stiprintuvas

Trečiasis aptariamas analoginės sensoriaus dalies struktūrinis blokas – ultragarsinio signalo stiprintuvas. Stiprintuvas yra skirtas sustiprinti iš ultragarsinio keitiklio priimamą signalą iki amplitudės, kurią būtų galima pakankama raiška užfiksuoti keitikliu analogas-kodas.

Nepriklausomai nuo pasirinkto naudoti operacinio stiprintuvo, analoginio stiprintuvo dalį sudarys įtampos ribojimo schema, juostinis filtras ir operacinis stiprintuvas su jam reikalinga periferija. Įtampos ribojimo schema reikalinga sugerti aukštos įtampos (kuri gali siekti 200 V ir daugiau) impulsus, pasiekiančius analoginio stiprintuvo įėjimą iš žadinimo generatoriaus, ir praleisti tik žemos amplitudės signalus, gaunamus iš ultragarsinio keitiklio. Juostinis filtras yra skirtas nufiltruoti nepageidaujamų dažnių signalus, kurie gali įtakoti tyrimų rezultatus. Priklausomai nuo naudojamo operacinio stiprintuvo, juostinis filtras gali būti naudojamas pasyvinis, jungiamas po operacinio stiprintuvo; arba aktyvinis, tai yra suprojektuotas naudojant tą patį operacinį stiprintuvą, kuris stiprina signalą.

Palyginimui išrinkti keturi operaciniai stiprintuvai iš skirtingų kategorijų:

- Reguliuojamo stiprinimo koeficiento stiprintuvas (angl. *Variable Gain Amplifier – VGA*) LTC6412;
- Programuojamo stiprinimo koeficiento stiprintuvas (angl. *Programmable Gain Amplifier – PGA*) LTC6910-1;
- Reguliuojamo stiprinimo koeficiento stiprintuvas AD8330 [16];
- Mažo triukšmo stiprintuvas (angl. *Low Noise Amplifier – LNA*) LT6236;
- Operacinis stiprintuvas (su išjungimo funkcija) LT1812.

Šie operaciniai stiprintuvai palyginami pagal keturis parametrus:

- Maksimalus neslopinamas dažnis (angl. *Gain bandwidth product*) – dažnis prie kurio operacinio stiprintuvo stiprinimo koeficientas lygus 0 dB;
- Stiprinimo koeficientas – stiprinimo koeficiento reikšmės arba reguliavimo ribos;
- Triukšmas – minimalus stiprintuvo įėjimo spektrinis triukšmo tankis ;
- Kaina – vieno operacinio stiprintuvo kaina, perkant daugiau nei 100 vienetų. Kainos gautos iš Linear Technology internetinio katalogo.

Operacinių stiprintuvų palyginimas pateikiamas 3.3 lentelėje

3.3 lentelė. Operacinių stiprintuvų palyginimas

Parametras	VGA LTC6412	VGA AD8330	PGA LTC6910-1	LNA LT6236
Maksimalus neslopinamas dažnis	800 MHz	150 MHz	11 MHz	215 MHz
Stiprinimo koeficientas	-14 dB .. +17 dB	0 dB .. +50 dB	0 dB, 6 dB, 14 dB, 20 dB, 26 dB, 34 dB, 40 dB	Fiksuotas, daugiausiai 46 dB (prie 1 MHz); 24 dB (prie 10 MHz)
Triukšmas	2,7 nV/√Hz	5,2 nV/√Hz	8,6 nV/√Hz	1,1 nV/√Hz
Kaina	4,15 €	5,10 €	0,97 €	1,11 €
Papildoma informacija	Skirtas stiprinti tik kintamos įtampos signalams nuo 1 MHz	-	Taip pat egzistuoja stiprintuvo versijos LTC6910-2 ir LTC6910-3 su mažesniais stiprinimo koeficientais	-

Nereguliuojamo stiprinimo koeficiento operacinį stiprintuvą LT6236 ultragarsiniame sensoriuje galima būtų naudoti nebent tuo atveju, kai būtų konkrečiai žinoma matavimų paskirtis ir pagal tai, surenkant prietaisą, parenkamas stiprinimo koeficientas. Reiktų atkreipti dėmesį į tai, kad operacinio stiprintuvo LT6236 triukšmo tankis yra mažiausias iš visų apžvelgtų operacinio stiprintuvo variantų, todėl sistemos konfigūracijose, kur signalo tikslumas turi didelę reikšmę, reiktų nepagailėti papildomų lėšų šiam operaciniam stiprintuvui.

Reguliuojamo stiprinimo koeficiento operacinius stiprintuvus reiktų naudoti priklausomai nuo dažnių juostos: LTC6910-1 naudoti 100 kHz – 5 MHz dažniuose, o LTC6412 – esant 1 MHz ir aukštesniems dažniams. Taip pat, naudojant reguliuojamo stiprinimo koeficiento operacinį stiprintuvą, esant atvejams, kai maksimalaus stiprinimo koeficiento nepakanka, kartu gali tekti naudoti ir fiksuoto stiprinimo koeficiento stiprintuvą.

Šioje darbo dalyje įvertinti galimi visų sistemos sudedamųjų dalių variantai, išsiaiškinti sistemos parametrai, kuriuos įtakoja skirtingų variantų parinkimas, nustatyta atskirų variantų įtaka sistemos kainai ir gabaritams. Kitame skyriuje sudaromos įvairios galimos sistemos architektūros, parenkant optimalius skirtingų sistemos dalių variantus, priklausomai nuo pageidaujamų sistemos parametru, įvertinami sistemos kainą, dydį ir energetinius parametrus.

4. GALIMŲ MIKRO ULTRAGARSINĖS SISTEMOS SPRENDIMŲ APIBENDRINIMAS

Apžvelgus atskiras sistemos dalis, bei ultragarsinės sistemos parametrus, kuriems daro įtaką skirtingų dalių variantų parinkimas, išaiškėjo, kad didžiausią įtaką tiriamajame darbe vertinamiems parametrams (sistemos darbinų dažnių juostai, kainai, dydžiui ir energijos suvartojimui) daro signalo priėmimo / valdymo dalies architektūros parinkimas. Priklausomai nuo parenkamos signalo priėmimo / valdymo dalies architektūros kinta darbinė dažnių juosta – naudojant greitaeigę duomenų surinkimo sistemą galima pasiekti didesnę diskretizavimo dažnį; energijos suvartojimas – naudojant greitaeigę duomenų surinkimo sistemą papildoma atmintis ir programuojama logika suvartoja daugiau srovės, taip pat leidžia sukaupti ilgesnį signalą, kuriam išsiųsti bevieliu ryšiu reikia ženkliai daugiau energijos; didesnei sistemos su greitaeige duomenų surinkimo sistema kainai įtaką daro papildomų komponentų naudojimas. Dėl šios priežasties galutiniam sistemos sprendimų apibendrinime sistemos architektūros atskiriamos į du galimus variantus – sprendimą su mikrovaldikliu ir sprendimą su greitaeige duomenų surinkimo sistema (aprašyta 2.1.3 skyriuje). Papildomai parenkant kitų sistemos dalių – maitinimo šaltinio, akumulatoriaus, įėjimo stiprintuvo – variantus, galima keisti kitus, šiuo atveju mažiau svarbius, sistemos parametrus, kaip generuojamo signalo įtampa ar įėjimo santykis signalas/triukšmas, taip pat parenkant skirtingos talpos akumulatorius derinti prietaiso veikimo trukmę.

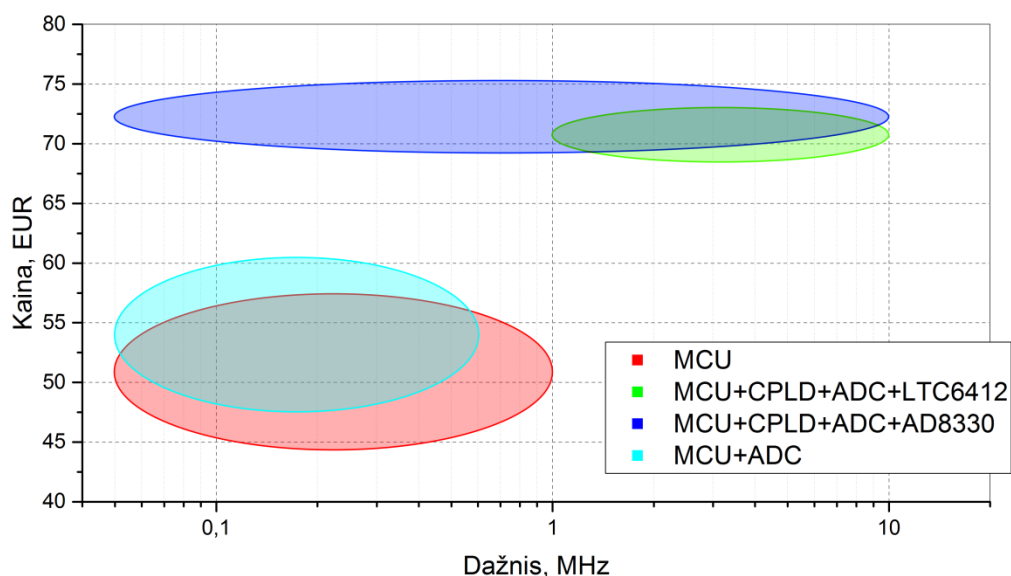
Vertinant sistemos kainą sudarytas ultragarsinės sistemos kainos priklausomybės nuo darbinės dažnių juostos grafikas. 4.1 paveiksle pavaizduotame grafike pateikiamos keturios galimos konkrečių signalo priėmimo / valdymo dalies ir naudojamų operacinių stiprintuvų kombinacijos, prie kurių parenkant skirtingus kitų sistemos dalių variantus, kartu su grafike nenagrinėjama parametrais varijuoja ir sistemos kaina. 4.1 paveiksle pateikiami sistemos sprendimai:

- *MCU* – sistemos sprendimas signalo priėmimo / valdymo dalyje naudojant tik mikrovaldiklį. Sistemos darbinį dažnį riboja mikrovaldiklio keitiklio analogas-kodas maksimalus diskretizavimo dažnis – 5,3 MSPS. Sistemos kaina priklauso nuo parenkamo aukštos įtampos maitinimo šaltinio, įėjimo stiprintuvo ir akumulatoriaus;
- *MCU+ADC* – sistemos sprendimas signalo priėmimo / valdymo dalyje naudojant mikrovaldiklį su išoriniu keitikliu analogas-kodas. Sistemos darbinį dažnį riboja keitiklio analogas-kodas maksimalus diskretizavimo dažnis – 3 MSPS. Sistemos kaina priklauso nuo parenkamo aukštos įtampos maitinimo šaltinio, įėjimo stiprintuvo ir akumulatoriaus;
- *MCU+CPLD+ADC+LTC6412* – sistemos sprendimas signalo priėmimo / valdymo dalyje naudojant mikrovaldiklį ir greitaeigę duomenų surinkimo sistemą programuojamos logikos pagrindu, bei operacinį stiprintuvą LTC6412. Maksimalų

sistemos darbinį dažnį riboja aukštos įtampos impulsų generatoriaus maksimalus sugeneruojamas dažnis, minimalų – operacinio stiprintuvo LTC6412 savybė stiprinti tik kintamos įtampos signalus nuo 1 MHz. Sistemos kaina priklauso nuo parenkamo aukštos įtampos maitinimo šaltinio ir akumuliatoriaus;

- *MCU+CPLD+ADC+AD8330* – sistemos sprendimas signalo priėmimo / valdymo dalyje naudojant mikrovaldiklį ir greitaeigę duomenų surinkimo sistemą programuojamos logikos pagrindu, bei operacinį stiprintuvą AD8330. Maksimalų sistemos darbinį dažnį riboja aukštos įtampos impulsų generatoriaus maksimalus sugeneruojamas dažnis.. Sistemos kaina priklauso nuo parenkamo aukštos įtampos maitinimo šaltinio ir akumuliatoriaus.

Sistemos kainų palyginimas esant skirtingiems architektūros sprendimams pateikiamas 4.1 paveiksle. Vertėtų atkreipti dėmesį į tai, kad grafike pateikiamos tik galimos elektroninės dalies kainos, nevertinant prietaiso korpuso ir ultragarsinio keitiklio kainų, kurios, lyginant su elektronine dalimi, gali būti gan didelės.



4.1 pav. Ultragarsinės sistemos darbinio dažnio ir kainos įvertinimas priklausomai nuo naudojamų architektūros sprendimų

Darbo pradžioje taip pat nuspręsta vertinti sistemos energetinius parametrus, konkrečiau - sistemos veikimo trukmę, esant skirtingiems veikimo režimams. Kaip ir vertinant kainą, atskiriamos sistema naudojanti tik mikrovaldiklį ir sistema su greitaeige duomenų surinkimo dalimi. Šių dviejų sistemos variantų suvartojamai energijai įvertinti sudarytos atskiros formulės, pateikiamos 4.1 lentelėje. Sistemos veikimo laiko įvertinimas atliekamas apskaičiuojant, kiek

energijos sistema suvartoja vienam signalo sugeneravimo, ar priėmimo bei perdavimo bevieliu ryšiu į centrinę stotį, ciklui, taip nustatant, kiek tokių ciklų su tam tikrais bevielio ryšio budėjimo periodais sistema gali atlikti, naudojant atitinkamą akumuliatorių. Vertinama, kad vieno duomenų surinkimo ir perdavimo bevieliu ryšiu ciklo metu yra užpildomas ir perduodamas visas operatyviosios atminties kiekis, taigi rezultatus stipriai įtakos naudojamos atminties talpa. Xx lentelėje naudojamų kintamųjų paaiškinimas:

- $P_{MCU}, P_{CPLD}, P_{RAM}, P_{ADC}, P_{OA}$ – Mikrovaldiklio, programuojamos logikos, operatyviosios atminties, keitiklio analogas-kodas ir operacinio stiprintuvo maksimalios naudojamos galios;
- P_{WiFi} – WiFi bevielio ryšio modulio siuntimo metu suvartojama energija;
- RAM – atminties talpa baitais;
- f_s – naudojamas signalo diskretizavimo dažnis;
- f_{SPI} – duomenų perdavimo iš mikrovaldiklio į bevielio ryšio modulį greitis. Šiuose skaičiavimuose visais atvejais lygus 4,5 MB/s;
- A_{SK} – signalo priėmimo / valdymo dalies suvartojama energija;
- A_{SP} – energija, suvartojama signalo perdavimui. Visi skaičiavimai atlikti su WiFi ryšiu;
- A_{OA} – operacinio stiprintuvo suvartojama energija;
- A_{TX} – aukštos įtampos impulsų generatoriaus sunaudojama energija tam tikro dažnio impulsui / impulsų sekai sugeneruoti. Vertės gaunamos iš modeliavimo, įvertinant aukštos įtampos maitinimo šaltinio naudingumo koeficientą;
- A_{SAVE} – bevielio ryšio modulio vartojama energija taupymo režime. Šiame režime modulis kas 100 ms patikrina, ar centrinė stotis nereikalauja užmegzti ryšio, visą kitą laiką modulis yra miego režime. Pasak bevielio ryšio modulio aprašymo, ši energija lygi 8,6 mJ;
- A_{SLEEP} – bevielio ryšio modulio vartojama energija miego režime. Šiame režime bevielio ryšio modulis signalo nepriima ir nesiunčia, kol to nepareikalauja mikrovaldiklis. Pasak bevielio ryšio modulio aprašymo, ši energija lygi 2,4 mJ;
- A_{BAT} – akumuliatoriaus talpa, išreikšta džauliais;
- T - laiko tarpas tarp signalo generavimo, ar priėmimo ciklų;
- t – sistemos veikimo laikas.

4.1 lentelė. Formulės, naudojamos energijos sąnaudoms apskaičiuoti

Energiją vartojantis elementas	Naudojant mikrovaldiklį	Naudojant greitaigę duomenų surinkimo dalį
Signalų priėmimo / valdymo dalis	$A_{SK} = P_{MCU} \cdot \frac{RAM \cdot 8}{f_s \cdot 12}$	$A_{SK} = (P_{MCU} + P_{CPLD} + P_{RAM} + P_{ADC}) \cdot \frac{RAM \cdot 8}{f_s \cdot 12}$
Komunikacijos dalis	$A_{SP} = (P_{MCU} + P_{WiFi}) \cdot \frac{RAM}{f_{SPI}}$	
Aukštos įtampos impulsų generatorius	A_{TX} vertės gaunamos atliekant modeliavimą	
Operacinis stiprintuvas	$A_{OA} = P_{OA} \cdot \frac{RAM \cdot 8}{f_s \cdot 12}$	

Iš formulių matoma, kad nėra sumuojamos absoliučiai visų atskirų komponentų ciklo metu suvartojamos energijos (pavyzdžiui, mikrovaldiklio suvartojama energija generuojant signalą), bet šių dydžių reikšmės tokios mažos, lyginant su kitų komponentų vartojamos energijos dydžiais, kad nuspręsta jų nepaisyti, taip palengvinant skaičiavimus. Sistemos veikimo trukmė, priklausomai nuo laiko tarpo tarp matavimų, esant skirtingiems režimams, apskaičiuojama pagal formules:

Ultragarsinio signalo generavimo režime:

$$t(T) = T \cdot \frac{A_{BAT}}{A_{TX} + T \cdot A_{SAVE}} \quad (1)$$

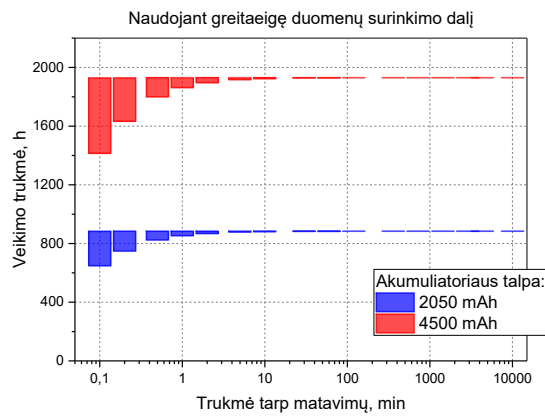
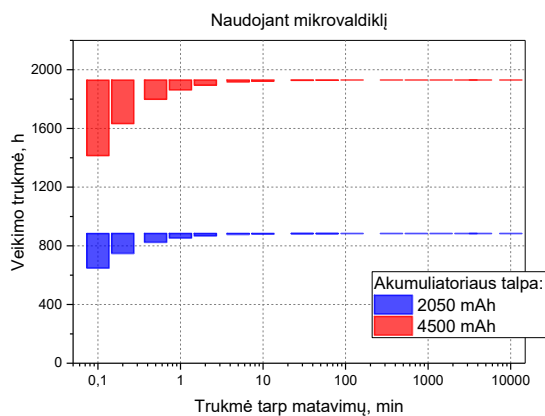
Ultragarsinio signalo priėmimo režime:

$$t(T) = T \cdot \frac{A_{BAT}}{A_{SK} + A_{SP} + A_{OA} + T \cdot A_{SAVE}} \quad (2)$$

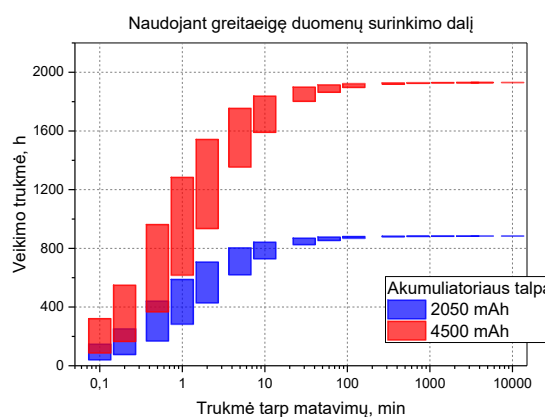
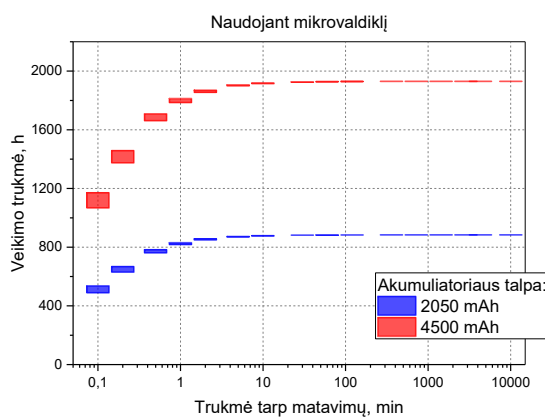
Ultragarsinio signalo generavimo ir priėmimo režime:

$$t(T) = T \cdot \frac{A_{BAT}}{A_{TX} + A_{SK} + A_{SP} + A_{OA} + T \cdot A_{SAVE}} \quad (3)$$

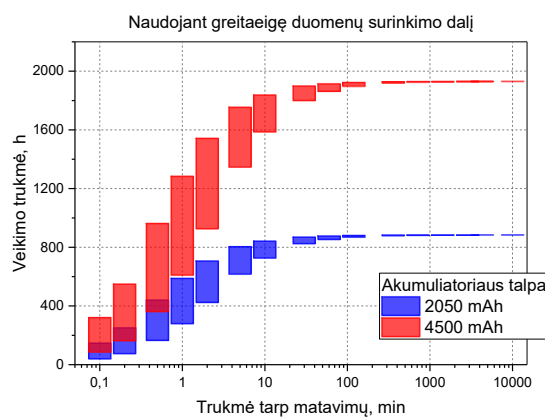
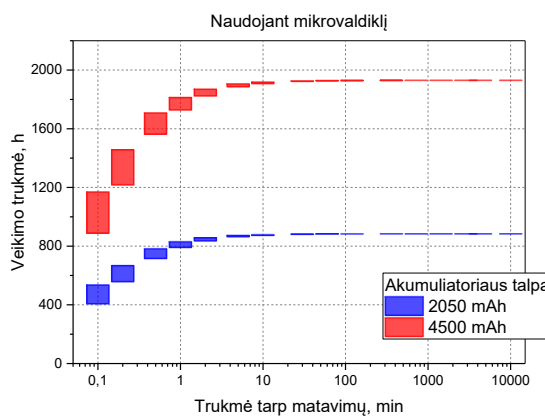
Pasinaudojant šiomis formulėmis atlikti skaičiavimai, įvertinantys galimas sistemos veikimo trukmes, naudojant skirtingas skaitmeninės dalies architektūras, akumulatorius, bei keičiant signalo parametrus. Skaičiavimų rezultatai pateikiami 4.2 - 4.4 paveiksluose.



4.2 pav. Ultragarsinės sistemos veikimo trukmės priklausomybė nuo ultragarsinio signalo generavimo ciklų dažnumo, esant skirtingoms sistemos architektūroms ir akumuliatoriaus talpoms



4.3 pav. Ultragarsinės sistemos veikimo trukmės priklausomybė nuo ultragarsinio signalo surinkimo ir perdavimo į centralę ciklų dažnumo, esant skirtingoms sistemos architektūroms ir akumuliatoriaus talpoms

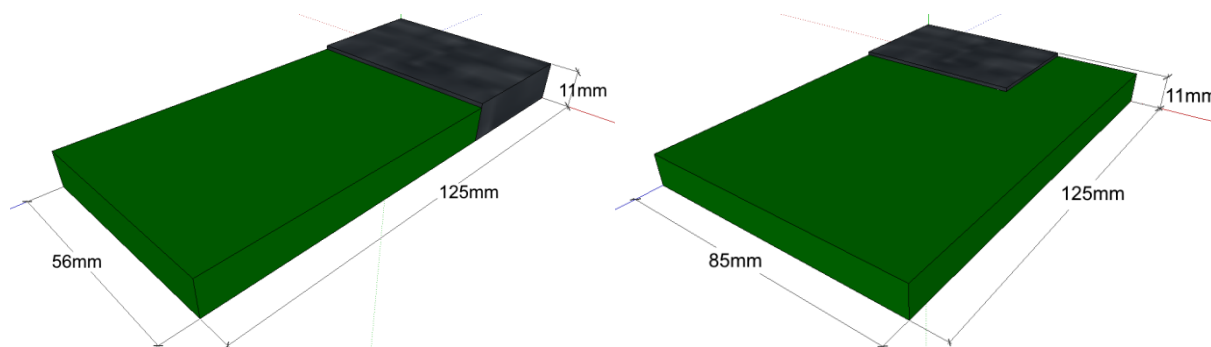


4.4 pav. Ultragarsinės sistemos veikimo trukmės priklausomybė nuo ultragarsinio signalo surinkimo ir perdavimo į centralę ciklų dažnumo, esant skirtingoms sistemos architektūroms ir akumuliatoriaus talpoms

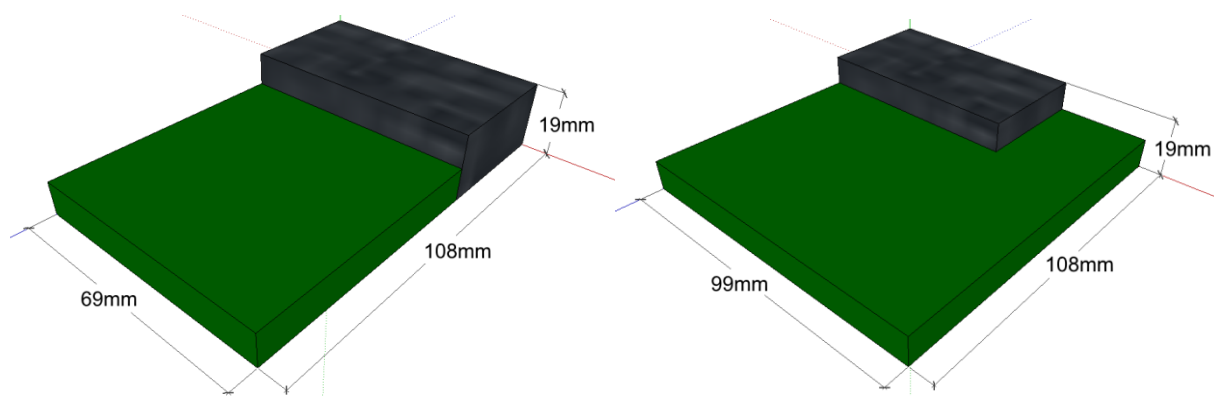
Apžvelgiant gautus ultragarsinės sistemos veikimo trukmės grafikus, pateiktus 4.2 - 4.4 paveiksluose galime daryti keletą išvadų:

1. Didžiausia energijos dalis yra suvartojama surenkant ir perduodant signalą, o ne generuojant aukštos įtampos impulsus. Tai galima matyti iš 4.2 paveiksle pateiktų grafikų, kurie rodo, jog esant tam tikriems generuojamo signalo parametrams aukštos įtampos signalus galima generuoti kelis kartus per minutę, ir tai beveik neturės įtakos sistemos veikimo trukmei.
2. Signalų priėmimo ir perdavimo bevielio ryšiu metu daugiau srovės suvartoja sistema su greitaigiu duomenų surinkimo dalimi. Tikėtina pagrindinė šio reiškinio priežastis – didesnė operatyviosios atminties talpa, dėl kurios padidėja duomenų, perduodamų kiekvieno ciklo metu kiekis.
3. Visose sistemos konfigūracijose ir visuose režimuose didinant laiko tarpus tarp matavimų ir peržengus 100 minučių ribą, sistemos veikimo trukmė pastebimai nedidėja, taigi galima būtų teigti, kad siekiant efektyviai išnaudoti sistemos energijos rezervą, matavimus reiktų atlikti ne rečiau, nei kas dvi valandas.

Siekiant įvertinti kaip realybėje galėtų atrodyti tiriama sistema, reikia apžvelgti, kokie būtų vienos, ar kitos konfigūracijos sistemos gabaritai. Šiam tikslui pasiekti trimačio modeliavimo programoje sudaryti keletas sistemos vaizdų, įvertinant tikėtiną spausdintinės plokštės ir akumulatoriaus dydį. Orientaciniai sistemos vaizdai pateikiami 4.5 ir 4.6 paveiksluose, Juodas modelis iliustruoja akumuliatorių, o žalias – spausdintinę plokštę.



4.5 pav. Galimi minimalūs (kairėje) ir maksimalūs (dešinėje) sistemos matmenys, naudojant 2050 mAh talpos akumuliatorių



4.6 pav. Galimi minimalūs (kairėje) ir maksimalūs (dešinėje) sistemos matmenys, naudojant 4500 mAh talpos akumuliatorių

Pateiktuose sistemos dydžio įvertinimui skirtuose paveiksluose galima pastebėti, kad mažiausias galimas sistemos variantas savo dydžiu būtų panašus į nedidelį išmanųjį telefoną, tuo tarpu naudojanti didesnę bateriją ir spausdintinę plokštę sistema savo tūriu būtų maždaug keturis kartus didesnė.

5. IŠVADOS

1. Egzistuojančių sprendimų apžvaga parodė, kad šiuo metu faktiškai nėra ultragarsinių mikro-sistemų, kurias galima būtų įvardinti kaip ultragarsinius sensorius. Artimiausi sprendimai yra technologiniams parametrams matuoti naudojami ultragarsiniai prietaisai, tokie kaip srauto ar lygio matuokliai, kurie dirba autonomiškai, tačiau yra vis tiek per dideli ir negali būti integruojami į konstrukcijas.
2. Atlikta ultragarsinių sistemų architektūrinių sprendimų analizė parodė, kad galima išskirti tris pagrindines sistemos dalis – mikrovaldiklį su analogas kodas keitikliu (signalų priėmimo / valdymo dalį), analoginę dalį (aukštos įtampos impulsų generatorius ir stiprintuvas) ir komunikacijos modulį. Miniatiūrizacijos požiūriu labiausiai kritiška dalis yra sistemos energijos poreikis, kadangi siekiant ilgalaikio sistemos veikimo reikalingas, palyginus, didelių gabaritų akumuliatorius.
3. Išskirtos dvi pagrindinės galimos sistemos architektūros, nusakančios sistemos darbinį dažnių ribas. Nustatyta, kad labiausiai sistemos dydį, kainą ir energijos suvartojimą įtakoja darbinis dažnių diapazonas, matavimų pasikartojimo dažnis ir kaupiamų signalų trukmės.
4. Atlikti modeliavimai, skirti įvertinti įvairius ultragarsinių impulsų generatoriaus, aukštos įtampos maitinimo šaltinio parametrus ir apskritai energetinių resursų sunaudojimą parodė, kad labiausiai energijai imlus, lyginant su kitomis dalimis, yra komunikacijos modulis, kurio energijos suvartojimas yra tiesiogiai susijęs su kaupiamų signalų trukmėmis.

6. LITERATŪROS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS

1. PRISTOV, E., W. DALTON, G. LIKINS. Measurement of concrete thickness and detection of defects using ultrasound methods. In: Proceedings of the fifth highway geophysics – NDE conference. Charlotte, 2008. pp. 295–301.
2. CHENG, R, W. HEINZELMAN, M. STURGE-APPLE, and Z. IGNJATOVIC. Deployment of a wireless ultrasonic array for psychological monitoring. In: Sensor Applications, Experimentation, and Logistics. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 56-67. ISBN 978-3-642-11869-2.
3. HASENSTAB, A. and M. KRAUSE. Defect localisation in wood with low frequency Ultrasonic Echo Technique. In: 14th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. Eberswalde: Shaker Verlag, 2005. ISBN 3-8322-3949-9.
4. YEONG WU, Ta, Ningqun GUO, Chee YANG TEH, and Jacqueline XIAO WEN HAY. Advances in Ultrasound Technology for Environmental Remediation. Amsterdam: Springer Netherlands, 2013 pp. 5-12. ISBN 978-94-007-5532-1.
5. DAVID, J., and N. CHEEKE. Fundamentals and applications of ultrasonic waves, Second Edition. Boca Raton: CRC Press, 2012, pp. 484. ISBN 9781439854945
6. POSTEMA, Michiel. Fundamentals of Medical Ultrasonics. Boca Raton: CRC Press, 2011. ISBN 9780415563536.
7. MOORE, P.O., G.L. WORKMAN, and D. KISHONI. Nondestructive Testing Handbook: Ultrasonic Testing (Third Edition). Columbus: ASNT, 2007, vol.7. ISBN: 1-57117-163-0.
8. SANIIE, J., E. ORUKLU, S. GILLILAND, and S. ASLAN. Reconfigurable ultrasonic smart sensor platform for nondestructive evaluation and imaging applications. In: Smart Sensors and Mems. Cambridge: Woodhead Publishing, 2014, pp. 205-229. ISBN 9780857095022.
9. LICZNERSKI, Tomasz J., Jarosław JARONSKI, and Dariusz KOSZ. Ultrasonic system for accurate distance measurement in the air. Ultrasonics. Amsterdam: Elsevier, 2011, vol. 51, no. 8, pp. 960-965. ISSN 0041-624X.
10. MA, Chunyan and Gengxin LI. Research on a self-powered wireless ultrasonic flow sensor system. Progress in Informatics and Computing (PIC), 2010 IEEE International Conference on. Shanghai: IEEE, 2010, vol. 1, pp. 522-526. ISBN 978-1-4244-6788-4.

11. VISWANATH, Samarth, Marco BELCASTRO, John BARTON, Brendan O'FLYNN, Nicholas HOLMES, and Paul DIXON. Low-power wireless liquid monitoring system using ultrasonic sensors. In: International Journal on Smart Sensing & Intelligent Systems. Palmerston North: Massey University, 2015, vol. 8, no. 1, pp. 26-44. ISSN 1178-5608.
12. YENN CHONG, See, Manish Man SHRESTHA, and Jung-Ryul LEE. Development of Wireless Ultrasonic Propagation Imaging System for In-Situ Aircraft Inspection. EWSHM - 7th European Workshop on Structural Health Monitoring. Nantes: Nantes University, 2014, pp. 1025-1031. HAL 01021240.
13. ZHAO, Xiaoliang, Tao QIAN, Gang MEI, Chiman KWAN, Regan ZANE, Christi WALSH, Thurein PAING, and Zoya POPOVIC. Wireless Ultrasonic Transducer Network for Structural Health Monitoring of an Aircraft Wing. Shanghai: IOP Publishing Ltd, 2007.
14. FUCHS, P. A., A. V. CLARK, M. G. LOZEV, U. HALABE, P. KLINKHACHORN, S. PETRO, and H. GANGARAO. Ultrasonic instrumentation for measuring applied stress on bridges. In: Journal of Nondestructive Evaluation. New York: Springer US, 1998, vol. 17, no. 3, pp. 141 – 152. ISSN 1573-4862.
15. SVILAINIS, Linas and Giedrius MOTIEJŪNAS. Power amplifier for ultrasonic transducer excitation. Ultragarsas. Kaunas: Kaunas University of Technology, 2008, vol. 58, no. 1, pp 30-36. ISBN 1392-2114.
16. ŽUKAITIS, Gediminas. Ultragarsinių signalų siųstuvai-įmtuvai. Telekomunikacijos ir elektronika – 2013. Kaunas : Technologija 2013, pp. 46-47. ISSN 2335-7878.