



**Kauno technologijos universitetas**  
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

**Talpinių ultragarso keitiklių žadinimo grandinių tyrimas**  
Baigiamasis magistro studijų projektas

---

**Marius Palikevičius**  
Projekto autorius

**Doc. dr. Gailius Vanagas**  
Vadovas

---

**Panevėžys, 2020**



**Kauno technologijos universitetas**

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

## **Talpinių ultragarso keitiklių žadinimo grandinių tyrimas**

Baigiamasis magistro studijų projektas

Valdymo technologijos (6211EX014)

---

**Marius Palikevičius**

Projekto autorius

**Doc. dr. Gailius Vanagas**

Vadovas

---

**Panevėžys, 2020**



**Kauno technologijos universitetas**

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Marius Palikevičius

## **Talpinių ultragarso keitiklių žadinimo grandinių tyrimas**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Mariaus Palikevičiaus, baigiamasis projektas tema „Talpinių ultragarso keitiklių žadinimo grandinių tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir 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)



**Kauno technologijos universitetas**  
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

**TVIRTINU**  
TVKC vadovė  
Doc. dr. Nida Kvedaraitė

**Baigiamojo magistro projekto užduotis**

Diplomantui **Mariui Palikevičiui**

Baigiamojo projekto tema Talpinių ultragarso keitiklių žadinimo grandinių tyrimas  
(lietuvių kalba)

Baigiamojo projekto tema Research of Excitation Circuits for Capacitive Ultrasonic  
(anglų kalba) Transducers

Patvirtinta 2020 m. balandžio 6 d. dekanų potvarkiu Nr. V25-13-7-1

Parengto baigiamojo projekto įkėlimo į Lietuvos akademinės elektroninės bibliotekos informacinės sistemos (eLABa) talpyklą ir Moodle aplinką terminas iki 2020 m. birželio 1 d.

Duomenys, reikalavimai ir sąlygos baigiamajam projektui

Baigiamojo projekto užduotys / uždaviniai, kurie turi būti atskleisti projekte

1. Išnagrinėti (literatūrą nurodyta tematika, programos, susipažinti su įranga ir pan.)
  - 1.1. Išanalizuoti mokslinę literatūrą apie talpinius mikromontuojamus ultragarso keitiklius.
  - 1.2. Išnagrinėti rinkoje esančius ultragarsinių keitiklių žadinimo sprendinius.
  - 1.3. Parinkti sprendimą tinkantį talpinių keitiklių žadinimo realizacijai.
2. Eksperimentiškai ištirti (išbandyti, surinkti statistinius duomenis, sukurti programą ir pan.)
  - 2.1. Pasiūlyti optimalią techninės įrangos realizavimo koncepciją.
  - 2.2. Sukurti valdymo programą.
  - 2.3. Sudaryti matematinį modelį.
  - 2.4. Atlikti sukurtos sistemos teorinį ir eksperimentinį tyrimą.

Vadovas Doc. dr. Gailius Vanagas

*(vadovo pareigos, vardas, pavardė)*

Užduotį gavau Marius Palikevičius

*(studento vardas, pavardė)*

2020 m. balandžio 30 d.

Palikevičius, Marius. Talpinių ultragarso keitiklių žadinimo grandinių tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadoas doc. dr. Gailius Vanagas; Kauno technologijos universitetas, Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): elektronikos inžinerija, technologijos mokslai, (inžinerijos mokslai).

Reikšminiai žodžiai: ultragarso, CMUT, SAW, MEMS, FPGA, PWM.

Panevėžys, 2020. 61 p.

## Santrauka

Šio darbo tikslas – suprojektuoti ir ištirti talpinių mikromontuojamų ultragarso keitiklių žadinimo grandinių valdymo sistemą, naudojant standartinius mikroprocesorinius įrenginius. Darbe išanalizuota mokslinė literatūra apie talpinius mikromontuojamus ultragarso keitiklius. Atlikta rinkoje esančių ultragarsinių keitiklių žadinimo sprendinių analizė. Gautas rezultatas parodė, kad rinkoje siūlomos sistemos nėra lanksčios, turi valdymo parametrų trūkumų bei pasižymi didele kaina.

Tradiciniuose ultragarsiniuose skaneriuose naudojami dideli keitiklių masyvai ir FPGA paremti elektronikos grandynai, kurie reikalingi siunčiamiems signalams formuoti ir priimamiems signalams analizuoti. CMUT dėl didelio jautrumo mechaninei apkrovai gali būti naudojami kaip jutikliai. Šiuo atveju, nėra reikalingas didelis kanalų skaičius, todėl FPGA loginiai blokai vertinami kaip per daug sudėtingas ir brangus sprendimas.

Parinktas sprendimas, tinkantis talpinių keitiklių žadinimo realizacijai. Sudarytas sistemos modelis, kurį sudaro trys elementai: maitinimo šaltinis, žemos įtampos impulsų generatorius ir įtampos keitiklis. Darbe naudota aštuonių kanalų, trijų lygių Maxim Integrated impulsinė IC (Integrated Circuit) MAX14808, leidžianti gauti aukštos įtampos (iki 105 V), aukšto 20 MHz dažnio unipoliarinius ir bipoliarinius impulsus. Pateikiama žemos įtampos impulsų generatoriaus tyrimų sistemos bei metodikos analizė. Sukurta programa MAX14808 valdymo galimybių su Raspberry Pi 4B įvertinimui. Ištirtos programavimo kalbos ir jų bibliotekos, dažnio valdymai, pateikti grafikai. Programavimui naudota C kalbos WiringPi biblioteka, kuri leidžia turėti prieigą prie Raspberry Pi BCM2711 lusto laikmačio nustatymų. Sistema valdoma iš Apache serverio su PHP programavimo kalba. Sukurtas sistemos valdymo modelis ir aprašytos valdymo galimybės.

Atliktas realizuotos sistemos eksperimentinis tyrimas – impulso formos kitimas nuo apkrovos. Sudarytas sistemos matematinis modelis MATLAB aplinkoje, atlikti sukurtos sistemos eksperimentiniai tyrimai. Siekiant gauti reikiamos formos signalą prie aukštesnių dažnių maitinimo šaltinio ir ekvivalentinė MAX14808 srovės ribojimo varža turi būti kuo mažesnė. Tikslinga esant galimybei išskaidyti apkrovą tarp atskirų kanalų. Didėjant impulsų pasikartojimo dažniui ir amplitudei, MAX14808 temperatūra auga tiesiogiai proporcingai amplitudei ir dažniui. Naudojant ribinius (20 MHz ir didesnius) dažnius ir artimas 100 V impulsų amplitudes reikėtų papildomų aušinimo elementų.

Palikevičius, Marius. Research of Excitation Circuits for Capacitive Ultrasonic Transducers. Master's Final Degree Project / supervisor assoc. dr. Gailius Vanagas; Panevėžys Faculty of Technologies and Business, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Electronics Engineering, Technology Sciences, (Engineering Sciences).

Keywords: ultrasound, CMUT, SAW, MEMS, FPGA, PWM.

Panevėžys, 2020. 61 pages.

### Summary

The purpose of this work is to design and investigate the control system of excitation circuits for capacitive micro-mounted ultrasonic transducers using standard microprocessor devices. This paper analyzes the scientific literature on capacitive micromountable ultrasonic transducers. An analysis of excitation solutions for ultrasonic transducers available on the market was performed. This research revealed, that the systems offered on the market are not flexible, lack control parameters and come at a high price.

Traditional ultrasonic scanners use large arrays of transducers and FPGA-based electronic circuits, which are needed to generate transmissions and analyze received signals. CMUT can be used as sensors because of high sensitivity to mechanical load. Therefore, often a large number of channels is not required, so FPGA logic blocks in these cases are too complicated and expensive solutions.

An option suitable for the realization of capacitive converter excitation has been selected. The system model consists of three elements: power supply, low voltage pulse generator, and voltage converter. The eight-channel, three-level Maxim Integrated Pulse IC (Integrated Circuit) MAX14808 was used for an experiment, which allowed to receive high voltage (up to 105 V), high 20 MHz frequency unipolar and bipolar pulses. An analysis of the research system and methodology of the low voltage pulse generator is also presented in this paper. A program was designed to evaluate the MAX14808 control capabilities with the Raspberry Pi 4B. A study of programming languages and their libraries for frequency management is included (with graphs). The programming has been done using the C language WiringPi library, which allowed access to the Raspberry Pi BCM2711 chip timer settings. The system is managed via Apache server with PHP programming language. The system management model has also been developed and it's management options are presented.

A practical study of the experimental system design was performed – the change of the pulse shape from the load. The mathematical model of the system in MATLAB environment has been developed and experimental research of the system has been conducted. The complex study revealed that in order to obtain a signal of the required shape at a higher frequency power supply and the equivalent MAX14808 current limiting resistance must be as low as possible. It is recommended, if possible, to distribute the load between the individual channels. As the pulse repetition rate and amplitude increase, the MAX14808 temperature increases in direct proportion to the amplitude and frequency. Using marginal frequencies (20 MHz and higher) and pulse amplitudes close to 100 V would require additional cooling elements.

## Turinys

Lentelių sąrašas.....	8
Paveikslų sąrašas .....	9
Santrumpų ir terminų sąrašas .....	10
Įvadas.....	11
1. Apžvalga.....	12
1.1. Talpiniai mikromontuojami ultragarso keitikliai (CMUT) .....	12
1.1.1. CMUT struktūra ir veikimas .....	13
1.2. Paviršinės akustinės bangos .....	16
1.2.1. Paviršinių akustinių bangų įrenginiai .....	16
1.2.2. CMUT taikymas SAW .....	17
1.3. Ultragarso keitiklių žadinimo sprendimai .....	18
1.3.1. Programuojama loginė matrica.....	20
1.4. Laikmačio signalai skaitmeninėse grandinėse.....	21
1.5. Apibendrinimas .....	22
2. Metodinė dalis .....	24
2.1. Aukštos įtampos keitiklis .....	24
2.2. Žemos įtampos impulsų generatorius .....	25
2.2.1. Arduino mikrovaldiklio pritaikymas .....	26
2.2.2. Mikrokompiuteris Raspberry Pi pritaikymas .....	29
2.3. Apibendrinimas .....	34
3. Tiriamoji dalis .....	36
3.1. Aukšto dažnio valdymo tyrimas .....	36
3.2. Valdymo programos projektavimas .....	38
3.3. MAX14808 valdymo programa .....	42
3.4. Eksperimentinis tyrimas .....	42
3.5. Keitiklio temperatūros matavimas.....	51
Išvados.....	53
Literatūros sąrašas .....	54
Priedai.....	57
1 priedas. PHP valdymo kodas.....	57

## Lentelių sąrašas

<b>1 lentelė.</b> Ultragarsinių keitiklių technologijų palyginimas .....	13
<b>2 lentelė.</b> MAX14808 valdymui naudoti įrenginiai .....	34
<b>3 lentelė.</b> Lustų BCM2835 ir CM2711 palyginimas .....	36
<b>4 lentelė.</b> Darbinės srovės pasirinkimas .....	39
<b>5 lentelė.</b> Skaičiavimo rezultatai kai $C = 1 \text{ nF}$ .....	48
<b>6 lentelė.</b> Skaičiavimo rezultatai kai $C = 2 \text{ nF}$ .....	48
<b>7 lentelė.</b> Skaičiavimo rezultatai kai $C = 100 \text{ pF}$ .....	48
<b>8 lentelė.</b> Skaičiavimo rezultatai kai $C = 220 \text{ pF}$ .....	49



## Paveikslų sąrašas

1.1	pav. CMUT celės veikimo schema (a), veikimas perdavimo (b) ir priėmimo režimais (c) ....	14
1.2	pav. Tipinis paviršinių akustinių bangų įtaisų projektavimas su: a) vėlavimo linija; b) rezonatoriumi .....	17
1.3	pav. CMUT keitiklių žadinimo grandinės blokinė schema .....	19
1.4	pav. Impulsų pločio moduliacija.....	20
1.5	pav. MAX14808 aukštos įtampos keitiklis ir jo valdiklis .....	25
1.6	pav. Bipolinio impulso pločio moduliacija.....	25
1.7	pav. MAX14809 ir Arduino Uno jungimo schema .....	26
1.8	pav. Arduino programos kodas impulsų sekai sugeneruoti – 8 MHz.....	28
1.9	pav. Arduino Uno sugeneruotos impulsų sekos (a – 888,9 kHz, b – 1 MHz, c – 1,143 MHz, d – 1,333 MHz, e – 1,6 MHz, f – 2,667 MHz, g – 4 MHz, h – 8 MHz) .....	29
1.10	pav. MAX14809 ir Raspberry Pi 4 jungimo schema.....	30
1.11	pav. Raspberry Pi 4 išvadai (GPIO) .....	31
1.12	pav. Python programos kodas sugeneruoti impulsų sekai.....	31
1.13	pav. Python programavimo kalba sugeneruota impulsų seka – 1 MHz .....	32
1.14	pav. C programavimo kalbos kodas, naudojant a) WiringPi ir b) BCM2835 bibliotekas skirtas impulsų sekos generavimui .....	33
1.15	pav. Sugeneruoti dažniai a – WiringPi (28 MHz) ir b – BCM2835 (6,5 MHz) bibliotekomis	33
1.16	pav. MAX14808 valdymo programos lango grafinė sąsaja .....	39
1.17	pav. MAX14809 ir Raspberry Pi 4 B jungimo schema .....	40
1.18	pav. Sistemos valdymo algoritmas .....	41
1.19	pav. CMUT žadinimo sistemos valdymo galimybės.....	42
1.20	pav. MAX14809 ir Raspberry Pi 4B sistema .....	43
1.21	pav. MAX14808 kanalas apkrautas 220 pF kondensatoriumi (1 MHz, 30 V) kai: a) 0,5 A, b) 2 A	44
1.22	pav. MAX14808 kanalas apkrautas 220 pF kondensatoriumi (6,57 MHz, 30 V) kai: a) 0,5 A, b) 2 A.....	44
1.23	pav. MAX14808 kanalas apkrautas 220 pF kondensatoriumi (13,5 MHz, 30 V) kai: a) 0,5 A, b) 2 A.....	44
1.24	pav. MAX14808 kanalas apkrautas 220 pF kondensatoriumi (28 MHz, 30 V) kai: a) 0,5 A, b) 2 A	45
1.25	pav. Matlab / Simulink modelis.....	45
1.26	pav. MAX14808 kanalas apkrautas 220 pF kondensatoriumi (1 MHz, 30 V) kai: a) 0,5 A, b) 2 A	46
1.27	pav. MAX14808 kanalas apkrautas 220 pF kondensatoriumi (6,57 MHz, 30 V) kai: a) 0,5 A, b) 2 A.....	46
1.28	pav. MAX14808 kanalas apkrautas 220 pF kondensatoriumi (13,5 MHz, 30 V) kai: a) 0,5 A, b) 2 A.....	47
1.29	pav. MAX14808 kanalas apkrautas 220 pF kondensatoriumi (28 MHz, 30 V) kai: a) 0,5 A, b) 2 A	47
1.30	pav. Ribinio dažnio priklausomybė nuo srovės.....	49
1.31	pav. Simulink modeliavimo rezultatai. $f = 6,57$ MHz, $C = 0,1$ nF .....	50
1.32	pav. Simulink modeliavimo rezultatai. $f = 6,57$ MHz, $C = 1$ nF .....	50
1.33	pav. Simulink modeliavimo rezultatai. $f = 6,57$ MHz, $C = 2$ nF .....	51
1.34	pav. MAX14808 keitiklio temperatūros priklausomybė nuo generuojamo dažnio ir įtampos	52

## Santrumpų ir terminų sąrašas

### Santrumpos:

CMUT – talpiniai mikromontuojami ultragarso keitikliai (angl. *Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers*);

MEMS – mikroelektromechaninės sistemos (angl. *Micro-Electro-Mechanical Systems*);

SAW – paviršinės akustinės bangos (angl. *Surface Acoustic Wave*);

PZT – Pjezoelektriniai keitikliai (švino cirkonatas titanatas, pjezokeraminė medžiaga) (angl. *Piezoelectric Transducers*);

FPGA – programuojama loginė matrica (angl. *Field-Programmable Gate Array*);

V<sub>pp</sub> – amplitudė tarp neigiamo ir teigiamo (angl. *Peak – to – peak voltage*);

CMOS – silicio oksidacijos, siekiant atskirti puslaidininkinius elementus technologija (angl. *Complementary Metal Oxide-semiconductor*);

IDT – šukų tipo struktūrą turintis keitiklis (angl. *Interdigital transducer*);

USB – įtaisas su universaliaja jungtimi (angl. *Universal Serial Bus*);

PWM – impulsų pločio moduliacija (angl. *Pulse-Width Modulation*);

ASIC – taikomieji integriniai grandynai (angl. *Application Specific Integrated Circuits*);

IC – Integrinis grandynas (angl. *Integrated Circuit*);

VNC – kompiuterio nuotolinio valdymo protokolas (angl. *Virtual Network Computing*);

IP – interneto protokolas (angl. *Internet Protocol*);

GPIO – Bendrosios paskirties įvestis / išvestis (angl. *General-Purpose Input / Output*);

HTML – Hiperteksto žymėjimo kalba (angl. *Hyper Text Markup Language*).

## Įvadas

Talpiniai mikromontuojami ultragarso keitikliai (angl. *Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers* – CMUT) – alternatyvi ultragarso keitiklių kryptis tradiciniams pjezoelektriniams keitikliams. Šie keitikliai yra gaminami naudojant silicio technologiją ir pasižymi plačia darbo dažnių juosta bei dideliu membranų jautrumu masės pokyčiams. CMUT taip pat gali būti pritaikyti ir tokiose srityse, kuriose reikalingas masės pokyčiu paremtas matavimas. Tradiciniuose ultragarsiniuose skaneriuose yra naudojami dideli keitiklių masyvai ir FPGA paremti elektronikos grandynai, kurie reikalingi siunčiamiems signalams formuoti ir priimamiems signalams analizuoti. CMUT dėl didelio jautrumo mechaninei apkrovai gali būti naudojami kaip jutikliai. Šiuo atveju, didelis kanalų skaičius nėra reikalingas, todėl FPGA loginiai blokai yra per daug sudėtingas ir brangus sprendimas [20]. Pavyzdžiui, standartiniam paviršinių (angl. *Surface Acoustic Wave* – SAW) ar interfeisinių bangų (angl. *Interdigital transducer* – IDT), šukų tipo struktūrą turinčiam keitikliui, paprastai užtenka dviejų žadinimo ir dviejų priėmimo kanalų. Šiame darbe analizuojamos galimybės naudoti standartinius mikroprocesorinius įrenginius CMUT SAW, IDT keitiklių žadinimui ir valdymui perdavimo režime, kai perdavimo kanalų skaičius nėra didelis.

Darbo objektas – talpinių ultragarso keitiklių žadinimo grandinės.

Darbo tikslas – naudojant standartinius mikroprocesorinius įrenginius suprojektuoti ir ištirti talpinių mikromontuojamų ultragarso keitiklių žadinimo grandinių valdymo sistemą.

Darbo uždaviniai:

1. Išanalizuoti mokslinę literatūrą apie talpinius mikromontuojamus ultragarso keitiklius.
2. Išnagrinėti rinkoje esančius ultragarsinių keitiklių žadinimo sprendinius, parinkti sprendimą, tinkantį talpinių keitiklių žadinimo realizacijai.
3. Sukurti pasirinktos sistemos modelį.
4. Atlikti realizuotos sistemos eksperimentinį tyrimą.

Tyrimų metodai – mokslinės literatūros analizė, matematinis modeliavimas, eksperimentinis tyrimas.

Autoriaus publikuotų straipsnių bibliografinis sąrašas:

Palikevičius, Marius. Talpinių ultragarso keitiklių žadinimo grandinių tyrimas // Technologijų ir verslo aktualijos – 2020: studentų mokslinių darbų konferencijos pranešimų medžiaga, Lietuva, Panevėžys, 2020 balandžio 24 d. / Kauno technologijos universiteto Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas. Kaunas: Kauno technologijos universitetas.

## 1. Apžvalga

Ultragarso keitikliai yra vieni svarbiausių įtaisų įvairiose medicinos, techninės diagnostikos ir matavimų sistemose. Jais elektriniai signalai paverčiami mechaniniais virpesiais ir atvirkščiai. Šiuo metu visose sistemose naudojami tradiciniai pjezoelektriniai ultragarso keitikliai, kurie turi trūkumų dėl didelių gamybos sąnaudų ir pačio zondo dydžio. Talpuminiai keitikliai sulaukia tyrėjų dėmesio dėl geresnių impedanso suderinimo galimybių, lengvo integravimo, didelio jautrumo ir gerų funkcinų charakteristikų prie aukštų temperatūrų [14]. Tai sudaro galimybes išvengti didelės dalies techninių problemų, susijusių su tradicinėmis ultragarso keitiklių technologijomis ir leidžia sumažinti keitiklių gamybos bei surinkimo sąnaudas.

### 1.1. Talpiniai mikromontuojami ultragarso keitikliai (CMUT)

Modernios akustikos pradžia siejama su J. W. Strutt'o išleista publikacija „Garso teorija“ ir laikotarpiu, kuomet broliai Curie atrado pjezoelektrinį efektą (apie 1870 m.). L. Richardson'as ir A. Behm'as pirmą kartą pasiūlė naudoti akustines bangas ledkalniams aptikti po laivo „Titanic“ katastrofos, tačiau iki Pirmojo pasaulinio karo pradžios mokslas šioje srityje daugiau nepasistūmėjo į priekį. Proveržis įvyko, kai Prancūzijos mokslininkas P. Langevin'as pritaikė akustines bangas povandeniniams laivams aptikti [11]. Tai ir buvo sonaro (angl. Sound Navigation and Ranging – SONAR) technologijos pagrindas. Technologija nebuvo pritaikyta medicinos srityje – buvo sunku gauti dažnius, viršijančius 100 kHz. Pjezokristalai, tokie kaip kvarcas, būtų buvusi gera alternatyva aukštesniems dažniams generuoti, tačiau elektromechaninė jungtis buvo silpna ir nestabili. Reikėjo ieškoti geresnės alternatyvos, todėl 1947 m. atradus keraminę pjezoelektrinę medžiagą sukurta stipresnė elektromechaninė jungtis. Ši technologija iš pradžių buvo naudojama kietų medžiagų bandymams ir diagnostikai, taip paskatino pritaikyti ultragarsą medicinos srityje ir pradėti atlikti bandymus. 50-ųjų pradžioje ultragarsas jau naudojamas terapijai ir didelio intensyvumo procedūroms, pvz., audiniams šildyti. Nors pagrindiniai medicinai skirti ultragarso tyrimai atlikti 50-ųjų pabaigoje ir 60-ųjų pradžioje, pirmasis naudingas prietaisas pagamintas tik 70-aisiais praėjusio amžiaus metais, kai atsirado tinkama elektronika ir integriniai grandynai. Nuo to laiko pradėjo sparčiai vystytis medicininė ultragarso technologija. Ultragarsinių įrenginių skiriamoji geba yra tiesiogiai proporcinga bangos ilgiui  $\lambda = c / f$ , kur  $c$  – ultragarsinės bangos sklidimo greitis (vandenyje 1500 m/s),  $f$  – dažnis [20,4].

Nepaisant to, kad praktikoje seniai buvo naudojami magnetostrikiniai ir elektrostatiniai metodai, pjezokristalai ir pjezokeramika yra vienas iš pagrindinių pasirinkimų ultragarsinių bangų generavimui. Pjezoelektrinėmis savybėmis pasižymi natūraliai randami kristalai, tokie kaip kvarcas, topazas, turmalinas ir segneto druskos. Pagrindinė pjezoelektrinių keitiklių populiarumo priežastis yra geri elektromechaniniai parametrai, išbulinta gamybos technologija. Elektrostatiniai kondensatoriai taip pat buvo naudojami kaip garso imtuvai, tačiau ilgą laiką jie nebuvo naudojami medicinos srityje, nes tokiems tyrimams reikalingas siūstuvus. Daugelį dešimtmečių vyravo problema, susijusi su elektrostatiniais keitikliais. Jų veikimui reikalingas didelio intensyvumo elektrinis laukas. Fotolitografinių procesų vystymosi pažanga sudarė galimybes kurti tokius įrenginius, kaip mikroelektromechaninės sistemos (MEMS), kurias sudaro mikrometrinių matmenų mechaninės konstrukcijos (tokių sistemų matmenys paprastai neviršija 1 mm). Kartu su MEMS prietaisų atsiradimu, pradėti naudoti ir talpiniai mikromontuojami ultragarso keitikliai [13,32,19].

CMUT keitikliai turi daug privalumų, lyginant su pjezoelektriniais keitikliais (žr. 1 lentelę).

## 1 lentelė. Ultragarsinių keitiklių technologijų palyginimas

–	Pjezoelektriniai keitikliai	CMUT
Gamybos metodas	Keramikos technologija	MEMS technologija
Masyvo gamyba	Sudėtingi 2D ir aukšto dažnio masyvai	2D masyvas, kurį įgalina perjungiamosios plokštės. Įgalinti aukšto dažnio plačiajuosčio ryšio keitiklis.
Keitiklio pralaidumas	Nedidelis, reikalingas tinkamas sluoksnis	Didelis, nereikia tinkamo sluoksnio
Masyvo vienodumas	Vidutinis	Aukštas
Terminis stabilumas	Žemas	Aukštas
Integrinio grandyno integracija	Sudėtingas	Monolitinė arba hibridinė integracija
Išėjimo slėgis	Aukštas	Santykinai mažas, bet vis tobulinama ir gerėja

1 lentelėje lyginamos ultragarsinių keitiklių technologijos pagal gamybos metodus, keitiklio pralaidumą, masyvo vienodumą, terminį stabilumą, integrinio grandyno integraciją, išėjimo slėgį.

9-ojo dešimtmečio pradžioje sėkmingai atlikus bandymus su CMUT, jie medicinos srityje tapo nauja technologija, naudojama echoskopijos tyrimams. Didelis CMUT keitiklių kiekis gali būti gaminamas ant tos pačios plokštelės, dėl to, lyginant su pjezoelektriniais keitikliais, sumažėja gamybos išlaidos. Ši technologija palengvina didelių 1D ir 2D masyvų kūrimą. CMUT elementai gali būti mikrometrinių matmenų, todėl juos galima naudoti tose programose, kurioms reikalinga gera ašinė skiriamoji geba. Dėl mažesnių matmenų, kuriuos užtikrina šiuolaikiniai fotolitografiniai procesai, šia technologija pagaminti keitikliai, gali generuoti aukštus dažnius, kurie yra pageidautini tokiose srityse kaip intravaskulinis ultragarsas. Galima konstatuoti, kad CMUT išplėtė komercinės medicininės ultragarsinės vaizdo technologijos galimybes ir rinką [10,25].

### 1.1.1. CMUT struktūra ir veikimas

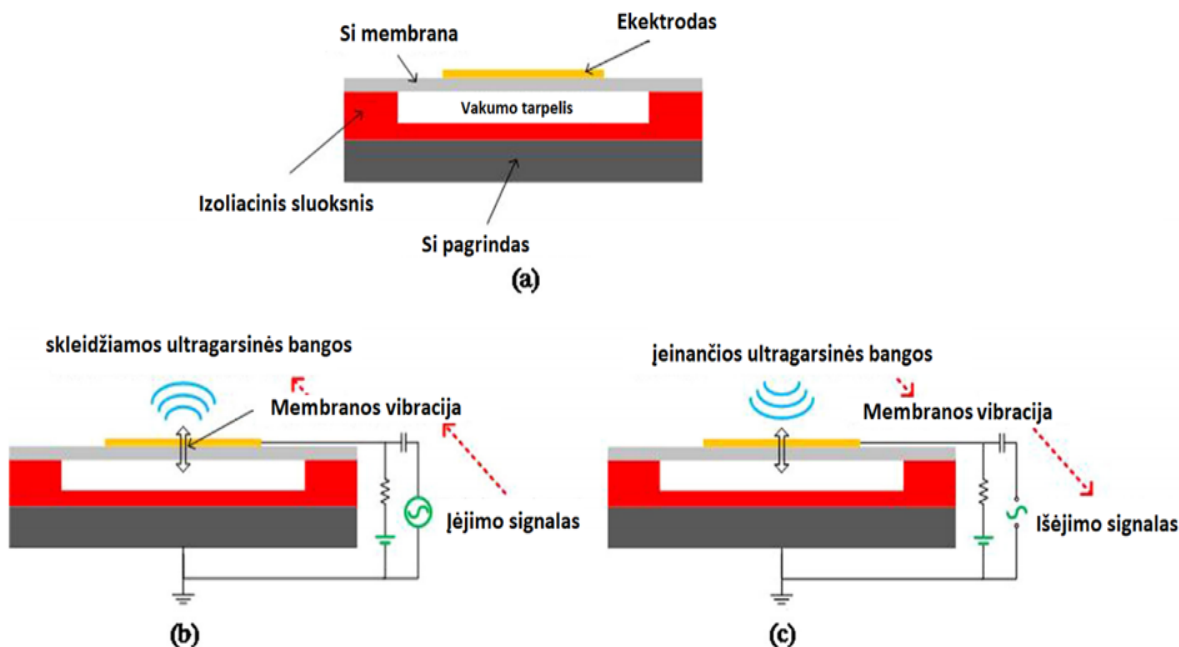
Ultragarsinių bangų keitikliai – vieni iš pagrindinių ultragarsinės sistemos sudedamųjų dalių, jau seniai naudojamų garso bangoms sužadinti ir aptikti. Dažniausiai ultragarsiniai keitikliai gali tiek priimti, tiek siųsti ultragarsines bangas. Priimtose ultragarsinės bangos paverčiamos į elektrinius signalus ir atvirkščiai. Įspūdingas elektrostatiinių prietaisų pranašumas, lyginant su kitų tipų keitikliais (pvz., pjezoelektriniu ir magnetostrikciniu), yra geras impedanso suderinamumas tarp jutiklio ir aplinkos tarpės [26].

Talpiniai mikromontuojami ultragarso keitikliai (CMUT) – alternatyvi ultragarso keitiklių kryptis tradiciniams pjezoelektriniais keitikliams. Šie keitikliai gaminami naudojant silicio technologiją ir pasižymi plačia darbo dažnių juosta bei dideliu membranų jautrumu masės pokyčiams. CMUT taip pat gali būti pritaikyti ir tokiose srityse, kuriose reikalingas masės pokyčiu paremtas matavimas [27].

Maža membranos mechaninė varža dažnai yra nereikšminga, dėl to labai efektyviai priimamos ir perduodamos garso bangos. Naujojo tipo CMUT keitikliai turi didesnę energetinio efektyvumo potencialą, lyginant su pjezoelektriniu keitikliu. Šia technologija veikiantys keitikliai kokybiškai pranašesni, tačiau reikalinga moderni mažų prietaisų gamybos technologija (MEMS) [6]. Tikslus analitinis CMUT modeliavimas yra svarbus, norint sklandžiai ir efektyviai projektuoti, taip išvengiant

bandymų ir skaičiavimo klaidų. Kadangi CMUT įrenginio mechaninis veikimas yra tikslus ir nelineinis, jo matematinis modeliavimas nėra paprastas ir lengvas.

Pagrindinį keitiklio mechanizmą sudaro plonos plokštelės vibracija, kuri yra veikiamą elektrostatiu bangų (žr. 1.1 pav.) [14].



1.1 pav. CMUT celės veikimo schema (a), veikimas perdavimo (b) ir priėmimo režimais (c)

Daugelis mikroelektromechaninių įrenginių naudoja 1.1 paveiksle pavaizduotą mechanizmą garsinėms bangoms generuoti ir fiksuoti. Geriausias veikimo analogo pavyzdys – kondensatorinis mikrofonas. Paprasčiausia šio įrenginio forma – plona membrana su laidžiu elektrodu, pritvirtintu virš pagrindo. Tarp pagrindo ir membranos suformuojamas mažas vakuuminis tarpelis. Suformuotas kondensatorius, įkraunamas nuolatinės srovės įtampa per didelės varžos rezistorių. Dėl elektrostatinės jėgos tarp membranos ir pagrindo, membrana įlinksta. Kai prietaisą veikia garso bangos, tarpelio aukštis moduluojamas membraną veikiančio slėgio lauko dažniu. Šis procesas sukelia įrenginio talpos pokyčius ir generuoja išėjimo įtampą, proporcingą slėgio lauko amplitudei. Kondensatoriaus struktūra taip pat gali būti naudojama garso bangoms generuoti. Jei membrana yra valdoma kintama įtampa, tai garso sklaidimą palaikančioje terpėje sukuriama harmoninis laukas [5].

Dėl savo privalumų CMUT tapo konkurencingu ultragarso keitikliu, plačiai naudojamam pjezoelektriniam kolektoriui. Vienas iš pranašumų – galimybė pagaminti didelių matmenų (tiek 1D, tiek 2D) masyvą, kuris reikalingas 3D ultragarso vizualizavimo programoms. Integruotos grandinės gamybos technologija leidžia CMUT gaminti įvairių dydžių (nuo mikronų iki dešimčių milimetrų) ir formų (disko, kvadrato), naudojant tiesiogines litografijos technologijas. Gamybos procesas leidžia gauti geresnį suderinamumą su elektronika ir iš esmės, palengvina integravimo procesą bei prietaisų valdymą.

CMUT celę sudaro membrana, vakuuminė ertmė ir pagrindas. Konstrukcija panaši į kondensatoriaus struktūrą. Metalinis sluoksnis, nusodintas ant membranos paviršiaus, naudojamas kaip viršutinis elektrodas, o laidus pagrindas veikia kaip apatinis elektrodas. Ultragarsinės bangos siuntimo režimu tarp šių elektrodų tuo pačiu metu įjungiamas nuolatinės ir kintamosios įtampos signalas [16]. Dėl

kintančios elektrostatinės traukos jėgos poveikio membrana priverčiama vibruoti, todėl į aplinkinę terpę yra skleidžiamos akustinės bangos. Priėmimo režime naudojamas tik pastovios įtampos sukeliama membranos įlinkis. Kai akustinė banga pasiekia membraną, pakinta slėgis ir sukeliama vibracija. Dėl pasikeitusios talpos generuojamas srovės signalas. Nuskaicius signalą, gaunama priimamos akustinės bangos informacija [22]. Pastovios ir kintamosios įtampos suma parenkama taip, kad membrana nesiliestų su pagrindu. Pastovios įtampos pokytis sukelia proporcingą membranos deformaciją ir įtempius. Išėjimo įtampos amplitudė priklauso nuo bangos dažnio, priešįtampio ir įrenginio talpos. Didžiausia kintamosios srovės sukelta deformacija yra membranos centre.

Silicio nitrido ar silicio membraną nuo pagrindo skiria maža vakuuminė ertmė ir izoliacinis sluoksnis, leidžiantis išvengti trumpų jungimų tarp elektrodo ir laidaus pagrindo. Kai tarp viršutinio ir apatinio elektrodo susidaro įtampa, nepriklausomai nuo poliškumo, dėl elektrostatinių jėgų membrana pasislenka pagrindo kryptimi. Didinant įtampą, atitinkamai padidėja ir įtampos gradientas, kuris sukelia deformaciją, t. y. membranos judėjimą iš pirminės horizontalios padėties. Perdavimui naudojamas kintamas signalas su pastovios įtampos statiniu poslinkiu. Dėl kintamosios įtampos, susidarę priešingos krypties įtempiai atitinkamai sukelia priešingą membranos poslinkį. Membrana pradeda švytuoti ir jos vibracija sukuria ultragarsą. Atitinkamai, priėmimo metu, akustinis slėgis priverčia judėti membraną tarp elektrodų, todėl priimamas kintamosios srovės signalas.

CMUT naudojama ultragarsinių bangų generavimui dujinėje aplinkoje (ore) ir skystyje. Kadangi CMUT daugiau naudojami aukšto dažnio bangų generavimui, kurių slopinimas dujų aplinkoje yra didelis, šiame režime keitiksiai dažniausiai tik charakterizuojami, bet naudojami rečiau. Šiame režime CMUT membranos yra apkrautos oru arba dujomis. Panardinimo režimas taikomas ten, kur apkrovos terpė yra skystis: ultragarsinis medicininis vaizdavimas, dujų srauto matavimas, ultragarso termometrija, CMUT pagrįstas mikrofonas, radaras ir kt. Taip pat medicinoje plačiai naudojami struktūros sveikatos stebėsenai, žmogaus rankų anatominiams elementams biometriškai atpažinti, trijų dimensijų rankų geometrijos metodams ir kraujo krešėjimui ultragarsu aptikti.

Terapiniam taikymui CMUT gali būti suprojektuoti taip, kad generuotų iki 3,5 karto didesnę akustinę galią nei pjezoelektriniai keitiksiai. Šiame režime naudojami ne mažesnės, kaip 100 V amplitudės impulsai. Svarbi sąlyga yra galimybė integruoti talpinių keitiklių matricas su elektroninėmis grandinėmis. Tai leidžia pagerinti veikimo greitį, energijos suvartojimą ir funkcionalumą. CMUT generuojamų ultragarsinių bangų slėgis siekia iki 3 MPa [16].

Literatūroje sutinkami mokslininkų aprašyti įvairūs analitiniai metodai CMUT savybių įvertinimui [21]. Iš pradžių, kai buvo sukurtas CMUT prietaisas, mokslininkai paskelbė kelis apvalių celių matematinius modelius. Iš esmės jie sukurti lygiagrečiai pozicijuotų mechaninių plokštelių aproksimavimo metodais, siekiant įvertinti kritinius CMUT parametrus ir charakteristikas. Praktinis judančios plokštelės poslinkis įvertinamas taikant lygiavertį grandinės analizės modelį. Modeliuose lengviau pritaikoma apskrita plokštelės struktūra, nes tokios plokščių CMUT struktūros yra paprastos ir tiksliai paaiškina deformaciją [23]. Sukurta daugialypė membrana CMUT ( $M^3$  – CMUT) kurioje naudojamos kelios judančios membranos vienoje celėje. Šio tipo jutikliai leido pagerinti tarpdomeninį energijos konvertavimo efektyvumą bei jautrumą, kurį lemia mažesnis vakuuminio tarpelio aukštis. Tačiau dėl sudėtingesnės gamybos procesų, tai gali būti vertinama ir kaip trūkumas [9].

CMUT technologija, ypač per pastarąjį dešimtmetį, padarė didelę pažangą. Ultragariniai medžiagų ir gaminių kokybės kontrolės metodai plačiai taikomi moksliniuose tyrimuose ir gamyboje. Tiriant šiais metodais sluoksniuotas medžiagas, kontroliuojamo sluoksnio kokybė nustatoma pagal ultragarso bangų sklidimo greitį jame. Ultragarso bangų sklidimo greičiui nustatyti medžiagos sluoksnyje paprastai naudojamos dviejų arba trijų ultragarinių keitiklių kombinacijos.

Daugybė CMUT teikiamų pranašumų paskatino mokslininkus jį pritaikyti tokiems tyrimams kaip optoakustinė kompiuterinė tomografija ir optoakustinė endoskopija. Optoakustinis vaizdavimas yra hibridinio vaizdavimo technika, kur kūną apšviečiant moduluotu lazerinės šviesos srautu dalis šviesos yra absorbuojama ir ji virsta šiluma, besiplėsdamas kūnas skleidžia bangas. Šių bangu aptikimas ir CMUT integravimas tapo neatsiejama optoakustikos sistemos dalis [5].

## **1.2. Paviršinės akustinės bangos**

Paviršinių akustinių bangų (angl. *Surface Acoustic Wave* – SAW) jutikliai jau daugelį metų naudojami temperatūrai, slėgiui, klampumui, pagreičiui, koncentracijai ir cheminėms medžiagoms / biologiniams objektams matuoti. Jie taip pat naudojami signalų apdorojimo operacijoms atlikti ir yra jautrūs aplinkos poveikiams [29]. Šio tipo akustinių bangų jutikliai susideda iš tokių komponentų, kaip pjezoelektrinis substratas (kristalai, tokie kaip kvarcas), mikrometalizacijos elementai (elektrodai). Šie jutikliai dar įvardijami kaip skaitmeniniai keitikliai (angl. *Interdigital transducer* – IDT). Pjezoelektrinis įtaisas nustato masės pokyčius jutiklio paviršiuje kaip dažnio atsaką, nes pjezoelektrinio pagrindo paviršiaus elektrodai perduoda ir gauna akustines bangas [29].

Pjezoelektrinio pagrindo paviršiaus sužadinta akustinė banga sklinda išilgai kristalo paviršiaus. Paviršiaus bangos greitis pasikeičia dėl medžiagos tankio, Jungo modulio, klampumo pokyčių bei dėl rišamosios reakcijos ant jutiklio paviršiaus. Šie prietaisai dažniausiai naudojami dėl jų gebėjimo tiesiogiai nustatyti mechaninių ir masinių savybių pokyčius, ir turi platų indikuojamų savybių spektrą: slėgį, temperatūrą, klampumą, masę ir cheminę bei biologinę jutimą [29]. SAW jutikliai, padengti organinėmis ir (arba) neorganinėmis medžiagomis, gali būti naudojami absorbcijos analizei įrenginio paviršiuje [26]. Veikimo metu SAW jutiklis reaguoja į dujų ar garų poveikį ore, dėl ko pakinta rezonansinis signalo dažnis. Pradinis keitiklio dažnis atkurdamas, kai jutiklis yra veikiamas aplinkos, kurioje nėra analizuojamų medžiagų atsako signalo pokyčiams [29]. SAW greitis kinta priklausomai nuo ultragarinę bangą sugeriančios cheminės medžiagos savybių. Dėl ko atsiranda masės apkrovos, elastingos įtampos ir polimerinės dangos laidumo pokyčių SAW įrenginyje.

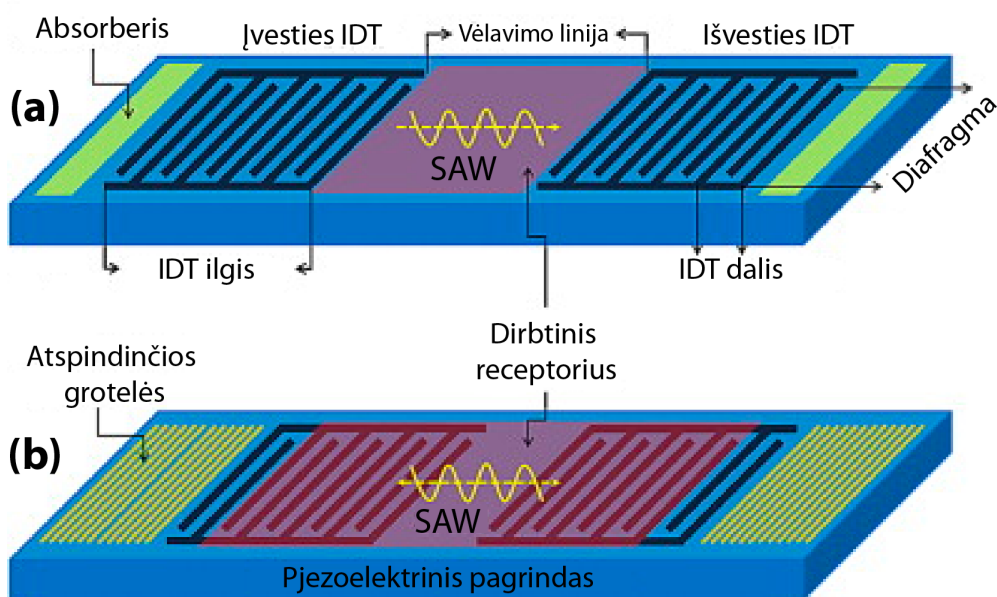
### **1.2.1. Paviršinių akustinių bangų įrenginiai**

SAW įrenginiai naudoja pjezoelektrinius kristalus akustinėms bangoms generuoti, kurios gali būti elektriškai sužadintos per IDT. IDT sudaro du blokuojantys šukų formos metaliniai elektrodai, išdėstyti ant pjezoelektrinio pagrindo [36]. IDT dažniausiai gaminami naudojant fotolitografinį metodą [28]. Prijungiant įtampą tarp skirtingų poliarizuotų įvesties ar siųstuvo IDT pirštų, sukuriama elektrinis laukas, kuris sukelia bangų tipo mechaninę deformaciją ant pagrindo paviršiaus. Iš įvesties IDT perduodama akustinė paviršiaus banga, sklinda lygiagrečiai paviršiui (per uždelsimo liniją) link išvesties arba imtuvo IDT, kur konvertuojama į elektrinį signalą. Didžiausia bangos amplitudė perduodama tik tada, kai keitiklio periodas yra lygus paviršiaus bangos ilgiui. Šis parametras apibrėžia įrenginio darbinį dažnį.



SAW charakteristikos priklauso nuo mechaninių bangų sklidimo kietos medžiagos paviršiuje savybių. Įrenginio charakterizavimui šiuo atveju tinkamiausia Reilio bangų teorija, pagal kurią kietųjų dalelių trajektorijos yra elipsės formos. Jos sklinda greičiu, priklausančiu nuo medžiagos savybių ir išiskverbia tik į kietąją medžiagą iki tokio gylio, ekvivalentiško bangos ilgiui.

Kaip parodyta 1.2 paveiksle, dažniausiai naudojami du SAW įrenginių projektavimo principai: a) SAW vėlinimo linija ir (b) SAW rezonatorius [3]. Vėlavimo linijos SAW įrenginyje yra du IDT. Erdvė tarp dviejų IDT yra vadinama uždelsimo linija ir yra padengta chemiškai jautria atpažinimo medžiaga (žr. 1.2 pav., a).



**1.2 pav.** Tipinis paviršinių akustinių bangų įtaisų projektavimas su: a) vėlavimo linija; b) rezonatoriumi

Vėlavimo linijoje akustinės bangos, nukreiptos į pagrindo kraštus, slopinamos taikant ploną silicio plėvelę ant kristalų kraštų, kuris veikia kaip absorberis, siekiant išvengti trikdžių dėl atspindžių. SAW rezonatoriuose naudojamas ultragarsinės bangos atspindys, kuris gaunamas, išdėstant atspindžio grotelės ITD kraštuose. Dėl šios priežasties akustinė banga atsispindi nuo šių grotelių ir nukreipiama atgal į IDT. SAW rezonatoriaus IDT gali būti padengtas molekulinio atpažinimo sluoksniu. 1.2 paveiksle (b) pavaizduota tipinė dviejų prievadų SAW rezonatoriaus struktūra.

Vienas iš IDT konvertuoja elektros energiją į mechaninę energiją, todėl veikia kaip siūstuvai, kitas veikia kaip imtuvai. Dėl mažo paviršiaus bangos greičio gaunamas ultragarsinės bangos vėlavimas, kuris matuojamas elektroninėmis priemonėmis. Tokiu būdu bet koks fizinis dydis, dėl kurio pasikeičia šis vėlavimas, gali būti pakeistas elektros signalu [1]. SAW sėkmingai naudojami kaip jutikliai masei, įtampai, jėgai, sukimo momentui, drėgmei, cheminė koncentracijai matuoti.

### 1.2.2. CMUT taikymas SAW

Vietoje pjezoelektrinio pagrindo naudojant talpinius mikromechaninius ultragarso keitiklius, skirtus generuoti ir aptikti akustinės bangos substrate, atsiranda didesnė elektroninio integravimo galimybė. Paviršinės akustinės bangos apibūdinamos kaip bangos, einančios išilgai elastingos medžiagos paviršiaus, o medžiagos dalelių judėjimo amplitudė eksponentiškai mažėja didėjant gyliui. Sąveika

gana stipriai veikia bangos amplitudę, slopinimą ir greitį tarp judančių paviršinių dalelių ir bet kokios kitos terpės (išskyrus vakuumą).

SAW pagrįstos vėlavimo linijos yra vienas populiariausių šiuolaikinių ryšių mikroelektromechaninių įrenginių [15]. SAW taip pat sėkmingai panaudojami fiziniams paviršiaus pokyčiams identifikuoti dėl mechaninės ar cheminės sąveikos, todėl tai yra naudinga platforma jutikliams kurti. Klasikinę SAW sampratą apima dviejų tipų sąsajų bangos: Stoneley bangos, sklindančios tarp dviejų elastingų medžiagų, ir Scholte bangos, sklindančios kietoje ir skystoje sąsajoje [35]. Scholte bangos gali būti naudojamos nustatant skystų medžiagų fizines savybes. Skirtingai nuo SAW jutiklių gaminiuose dar reikia rasti sąsajos bangų. De facto standartas mikro dydžio SAW vėlavimo linijoms arba jutiklių gamybos technologijoms yra plonos aliuminio nitrido plėvelės, turinčios puikias pjezoelektrines savybes. Nors ši technologinė koncepcija gali būti suderinta su nusistovėjusia mikroelektronikos gamybos technologija, visgi reikalauja pakeisti dabartines technologijas [7].

Kaip alternatyva akustinių bangų pjezoelektriniam sužadimui ir priėmimui buvo įrodyta, kad talpiniai mikromechaniniai ultragarso keitikliai sėkmingai sužadina ir gauna Scholte bangas bei veikia kaip skysčių savybių jutiklis. CMUT gali būti pagamintas naudojant standartinę (struktūrą) silicio oksidacijos, siekiant atskirti puslaidininkinius elementus (angl. Complementary metal oxide – semiconductor – CMOS) technologiją ir taip pat yra pranašesnis už pjezoelektrinių įrenginių jautrumą masės pokyčiui [31].

Mokslininkai įrodė, kad Scholte bangų fazės greitis yra patogi fizinė vertė, kuri gali būti naudojama skysčių savybėms aptikti arba galimai kitiems kietosios kūno ir skysčio sąsajos savybių pokyčiams.

### 1.3. Ultragarso keitiklių žadinimo sprendimai

Pjezoelektriniai keitikliai yra dominuojanti ultragarso keitiklių technologija. Tačiau geresniam sistemų tarpusavio integravimui tinkamesni talpiniai mikromechaniniai ultragarso keitikliai. Analizuojamų medžiagų sąsaja su CMUT skiriasi nuo sąsajų su PZT (angl. *Piezoelectric Transducers* – Pjezoelektriniai keitikliai). Efektyvi CMUT apkrova yra didesnė, atitinkamai yra didesnis ekvivalentinės varžos pokytis ir analitinis signalas. Naudingas CMUT signalas yra proporcingas talpos pokyčiui. Statinė talpa yra nenaudinga (parazitinė). Pagrindinė didelės parazitinės talpos priežastis yra fizinė CMUT elemento struktūra, kuri sudaro lygiagretų plokštelių kondensatorių. [8].

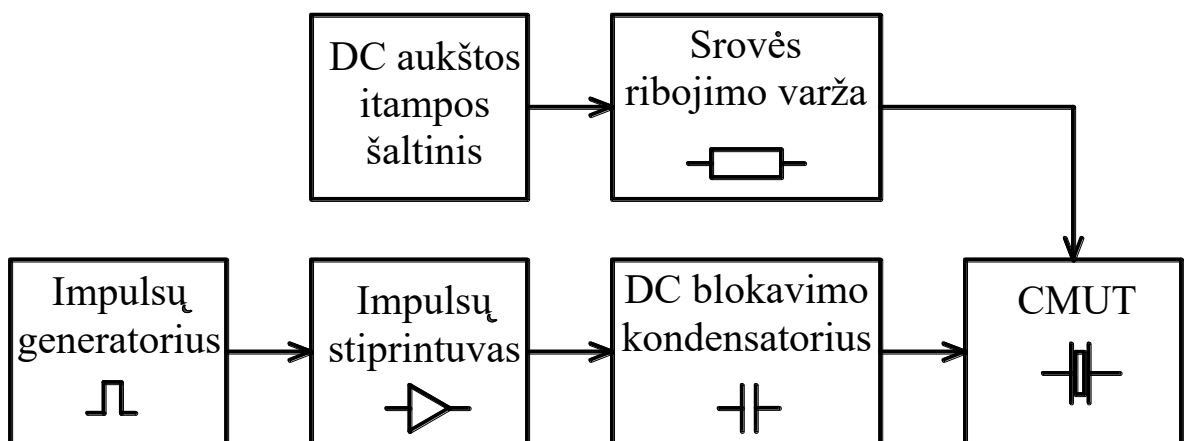
Didelės įtampos linijiniai stiprintuvai paprastai naudojami pjezoelektrinių keitiklių apkrovoms žadinti. Tačiau CMUT apkrovai valdyti linijiniai stiprintuvai naudojami neefektyviai. Dėl stiprintuvo galios suvartojimo ir galios praradimo priežastys, susijusios su CMUT elemento parazitinės talpos įkrovimu ir iškrovimu, mažinančiu bendrą siūstovo veikimo efektyvumą. Be to, CMUT elementas iškreipia stiprintuvo išėjimo bangos formą per netiesioginį ryšį tarp elektros įvesties signalo ir elektrostatinės jėgos, veikiančios elemento membraną. Siekiant panaikinti krovimo talpas, naudojami rezonansiniai siūstuvai su induktoriais, kurie padidina energetinį efektyvumą. Tam kiekvienam perdavimo kanalui reikalingi kelių mikrohenrių nominalo induktoriai, skirti dirbti su tipinėmis 10–200 pF vieno kanalo apkrovomis, 1–20 MHz ultragarso dažnių diapazone. Talpinės apkrovos įtakos mažinimui taip pat gali būti taikomi daugiapakopiai impulsiniai metodai. PZT ultragarso žadinimo įrenginiuose naudojami daugiapakopiai metodai, skirti impulsų formavimui ir harmonikų slopinimui [33].

Ultragarsinių matavimų efektyvumas priklauso nuo sužadinto signalo kokybės ir perdavimo efektyvumo. Ultragarso keitikliams žadinti dažniausiai yra naudojami impulsiniai signalai. Tačiau dėl plačios dažnių juostos toks žadinimo būdas turi trūkumų: visi dažnio komponentai generuojami vienu metu, gaunama amplitudė yra didelė, o tai papildomai apkrauna žadinimo elektroniką ir ultragarso keitiklius. Dėl šaltinio vidaus varžos ir elektronikos apribojimų, energijos kiekis, impulsiniam žadinimo signalui irgi yra ribotas. CMUT veikimui taip pat reikalinga aukšta pastovi (100 V ir daugiau) įtampa tarp membranos ir pagrindo, tiek priimant, tiek perduodant signalus.

Kad būtų pasiektas priimtinas efektyvumas, pjezoelektrinių keitiklių apkrovoms valdyti, siūstuvuose paprastai naudojami aukštos įtampos linijiniai stiprintuvai. Tačiau CMUT apkrovai linijiniai stiprintuvai būtų naudojami neoptimaliai. Be stiprintuvo energijos sąnaudų, didelės galios praradimo priežastys yra susijusios su CMUT elemento parazitinės talpos įkrovimu ir iškrovimu, mažinančiu bendrą siūstuvo veikimo efektyvumą. CMUT elementas iškreipia stiprintuvo išėjimo bangos formą per netiesinį ryšį tarp elektros įvesties signalo ir elektrostatinės jėgos, veikiančios elemento membraną.

Pjezoelektrinis keitiklis generuoja mechaninę energiją, reaguodamas į taikomą elektrinį žadinimą. Keitiklis taip pat gali generuoti elektros energiją atsakydamas į taikomą mechaninį įtempį. Šis grįžtamasis reiškinys žinomas kaip pjezoelektrinis efektas. Kai pjezoelektrinį keitiklį sužadina elektros energija, jo medžiagos (kristalo ar keramikos) fizinis matmuo pradeda keistis proporcingai naudojamai elektros energijai. Vidinės medžiagos formos pokyčiai lemia ultragarso bangų (mechaninės energijos) susidarymą [30].

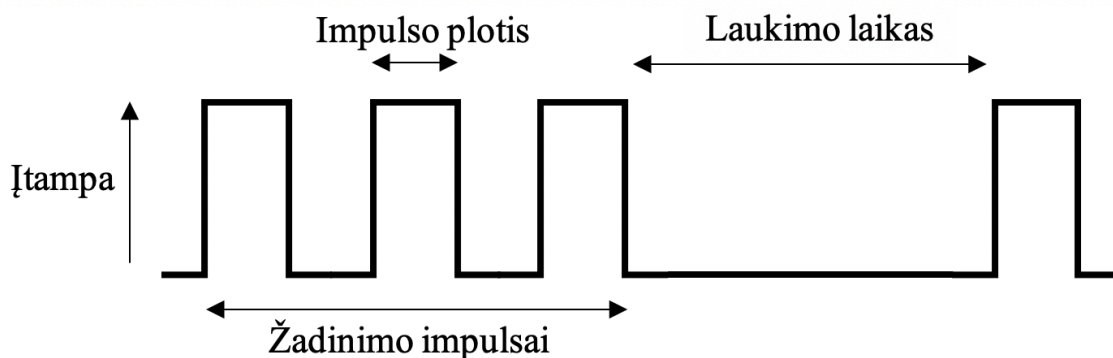
CMUT žadinimo sistemos veikimui reikalingas priešįtampio, aukštos DC įtampos šaltinis (100 ir daugiau voltų) membranų įlinkiui suformuoti. Šio šaltinio įtampa priklausomai nuo CMUT membranų konstrukcijos gali svyruoti 30÷100V diapazone. Šis šaltinis skirtas elektrostatinio lauko formavimui. Jo galia maža. Kitas svarbus komponentas, reikiamo dažnio valdomas impulsų generatorius. Šis generatorius, priklausomai nuo įrenginio paskirties gali generuoti sinchronizuotus pavienius impulsus, riboto skaičiaus ar nenutrūkstamas impulsų sekas. Impulsų stiprintuvas sustiprina impulsus iki reikiamos amplitudės ir galios. Impulsų generatoriui ir stiprintuvui reikalingi atskiri maitinimo šaltiniai. Galiniame CMUT žadinimo įrenginyje taip pat naudojama aukštos įtampos šaltinio srovės ribojimo varža ir skiriamasis kondensatorius, blokuojantis aukštą DC įtampą (žr. 1.3 pav.).



1.3 pav. CMUT keitiklių žadinimo grandinės blokinė schema

Keitikliai gali dirbti dviem režimais – nepertraukiamuoju ir impulsiniu. Nepertraukiamasis režimas gaunamas tada, kai ultragarsas nuolat generuojamas. Ultragarsiniuose skeneriuose dažniausiai naudojamas impulsinis režimas. Jo esmė ta, kad ultragarsas generuojamas 1–5  $\mu$ s trunkančiomis impulsų sekomis, pasikartojančiomis kelių milisekundžių intervalais. Pauzės metu tas pats jutiklis priima grįžusius nuo objekto atsispindėjusius ultragarso virpesius. Dėl tokio režimo tas pats kristalas gali dirbti kaip ultragarso bangų siūstuvus ir imtuvus.

Kaip matyti 1.4 paveiksle, paprasti standartiniai impulsų generatoriai leidžia valdyti impulsų pasikartojimo dažnį, impulsų plotį, vėlavimą vidinio / išorinio trigerio ir aukštosios / žemosios įtampos lygius.



1.4pav. Impulsų pločio moduliacija

Impulsų generatoriai naudoja skaitmeninius metodus, analoginius metodus bei abiejų metodų derinį išėjimo impulsams suformuoti. Sudėtingesni impulsų generatoriai leidžia valdyti impulsų kilimo ir kritimo laiką. Dauguma eksperimentų atliekama su *Agilent* firmos įtaisais, kurie gali pasiekti net iki 5 GHz dažnį. Šie impulsų generatoriai naudojami įvairiems tikslams, tačiau dažniausiai kaip bandymo stendo įranga, kuriant įvairių formų logines grandines. Impulsų generatoriai gali būti naudojami generuoti impulsus, kurie gali imituoti loginę grandinę. Prietaisai teikia patikimą ir platų signalų spektrą. Tokių įrenginių kaina svyruoja nuo tūkstančio iki kelių tūkstančių eurų.

Siūstuvus konvertuoja elektros energiją į mechaninę energiją, o imtuvus atlieka atvirkštinę energijos konversiją – mechaninę energiją paverčia elektros energija. Siekiant pagerinti šio signalo kokybę, naudojami įvairūs metodai, tokie kaip PWM technika. Tačiau, dažnio požiūriu, didelis iššūkis naudoti perjungimo režimo galios keitiklį su PWM metodu aukšto dažnio taikomiosiose programose (bazinė juosta yra didesnė nei 20 kHz). Siekiant sukurti didelės galios aukšto dažnio signalą naudojant perjungimo režimo galios keitiklį su PWM metodu, perjungimo dažnis turėtų būti kelis kartus didesnis už bazinį dažnį. Įtampos šaltinio arba srovės šaltinio galios keitikliai, veikiantys su impulso pločio moduliavimo (PWM) technika, plačiai naudojami, kuriant didelės galios signalą su mažu iškraipymu. Šių tipų konverterių galios ir dažnio veikimo ribos apsiriboja komponentų galia ir dažniu.

### 1.3.1. Programuojama loginė matrica

Ultragarsinių skenerių veikimas pagrįstas kryptingų ultragarsinių bangų perdavimu ir priėmimu iš objekto. Naudojant atspindėto garso bangos stiprumo skirtumus ir vėlavimą, biologinio audinio vaizdai gali būti atvaizduoti monitoriaus ekrane [17]. Tai dažniausiai atliekama su pjezoelektriniu keitikliu, esančiu zondo modulyje, kuris prispaudžiamas prie tos kūno dalies, kurią norima atvaizduoti. Pjezoelektriniai keitiklio elementai stimuliuojami aukštos įtampos (5–300 V<sub>pp</sub>)

impulsais, todėl jie vibruoja, o tai savo ruožtu generuoja perduodamas akustines bangas. Masyvo elementai fazėje suderinti vienas su kitu, norint sukurti fokusuotą akustinių bangų spindulį iš anksto nustatytoje vietoje ir atstumą iki organizmo dalies. Kadangi šio proceso bangos prasiskverbia per objektą, akustiniai impedanso skirtumai tarp audinio sluoksnių sukelia atspindžius atgal į jutiklį. Po akustinių bangų perdavimo jutiklio elementai tampa detektoriais, atsiunčiančiais atspindėtus signalus. Vaizdas formuojamas nukreipiant siųstiną spindulį į šimtus nuskaitymo linijų analizuojamoje srityje, norint sudaryti 2D vaizdą. Galimi 3D ultragarso įrenginiai, mechaniniu būdu perkeliant keitiklio bloką arba elektroniniu būdu valdant spindulio kryptį išilgai antrinės ašies. Ultragarasinė technologija naudojama įvairiose srityse – objektams aptikti, atstumui matuoti ir daugelyje medicinos įrenginių. Medicinoje ultragaras yra paprastas, dinamiškas vaizdavimo modulis, naudojamas kūno struktūroms ir įvairiems vidaus organams vizualizuoti [34].

Daugelis šiuolaikinių ultragarsinių vaizdavimo sistemų susideda iš ultragarso perdavimo ir priėmimo modulio, vadinamo šviesos transformatoriumi, kurį sudaro skaitmeninis siųstuvas (Tx) ir imtuvas (Rx). Perdavimo modulis yra atsakingas už loginių impulsų generavimą su reikiamu laiku ir faze, kad elektroninis spinduliavimas ir fokusavimas sukurtų 3D vaizdus. O šviesos transformatorius atsako už aido gavimą (akustinių bangų) iš audinio. Reguluojant kiekvieno elemento generuojamų impulsų laiką, garso bangos gali būti pritaikytos tam tikram kampui ir gyliui. Tačiau šie moduliai dažniausiai turi architektūros stilių, kuris riboja prieigą prie ultragarso modulio, ir taip apriboja modifikacijas bei patobulinimus, kad jie atitiktų programą. [34].

Siekiant sumažinti patį aparatą ir sąnaudas bei užtikrinti ilgesnį akumuliatoriaus tarnavimo laiką, nešiojamieji ultragarsiniai aparatai turi būti tobulinami, taikomos naujos technologijos, kaip taikomųjų integrinių grandinių (angl. *Application specific integrated circuits* – ASIC) technologija [34]. Tačiau ASIC metodas dažniausiai pritaikytas konkrečiam metodui ar taikymui ir tai apriboja jo naudingumą. Taigi, siekiant pagerinti naudojimąsi ir bendrą taikymą, programuojama loginė matrica (angl. *Field-programmable gate array* – FPGA) gali būti naudojama ultragarso vaizdavimo sistemos įrenginio sumažinimui, taupant sistemos resursus. Naudojant FPGA sistemą konstrukcijose atsiranda geresnis funkcinis lankstumas – įvairios vaizdo sistemos gali greitai prisitaikyti prie nuolat besikeičiančių klinikinių reikalavimų [17].

Tradiciniuose ultragarsiniuose skeneriuose, siunčiamiems signalams formuoti ir priimamiems analizuoti, naudojami dideli keitiklių masyvai ir programuojami logine matrica paremti elektronikos grandynai. FPGA tai perprogramuojama silicio mikroschema, kuri naudoja iš anksto integruotus loginius blokus ir programuojamus nukreipimo resursus. Būtent šis funkcionalumas leidžia sukongfigūruoti FPGA taip, kad būtų galima implementuoti pritaikytos techninės įrangos funkcionalumą, nepanaudojant elektroninės schemos maketo [18].

Tokie prietaisai sudėtingi ir naudojami dideliems keitiklių masyvams. Tačiau tokių jutiklių kaip pvz., SAW žadinimui pakanka vieno ar kelių kanalų.

#### **1.4. Laikmačio signalai skaitmeninėse grandinėse**

Kiekvieną dieną susiduriame su įvairiausiai elektroniniais įrenginiais, prietaisais, kurie apdoroja, valdo ir perduoda didelį kiekį informacijos. Visų jų pagrindas – elektrinės grandinės. Elektrinėse grandinėse visa informacija (komandos, skaičiai, garsai, vaizdai) perduodama elektriniais signalais, elektros srovės ar įtampos pokyčiais, impulsais. Pagal elektrinio signalo apdorojimo pobūdį grandinės yra skirstomos į analogines, skaitmenines ir mišraus signalo apdorojimo. Skaitmeninis signalas turi

tik dvi reikšmes, kurias atitinka du elektrinės įtampos lygmenys – aukštasis ir žemasis. Analoginis signalas tarp aukštosios ir žemosios įtampos lygmenų turi be galo daug reikšmių.

Laikmačio signalą galima apibrėžti kaip tam tikro tipo signalą, kuris svyruoja tarp aukštos ir žemos būsenos. Signalas veikia kaip metronomas, kurį skaitmeninė grandinė seka laiku, kad galėtų suderinti savo veiksmų seką. Skaitmeninės grandinės priklauso nuo laikmačio signalų, kad būtų galima sužinoti, kada ir kaip atlikti užprogramuotas funkcijas.

Galima sulyginti laikmatį su žmogaus širdimi, o laikrodžio signalai yra kaip širdies dūžiai, kurie palaiko sistemos judėjimą.

Kvarciniai rezonatoriai naudojami taktinio dažnio generavimui. Kvarciniai generatoriai turi dvi naudingas bei skirtingas savybes: dažnio stabilumą ir mažą fazės triukšmo lygį. Pagrindinis jų trūkumas tai mažas darbo dažnis ir maža išėjimo galia. Kvarcinio generatoriaus pagrindinis elementas yra kvarcinis rezonatorius, dėl kurio mechaninių virpesių tam tikruose dažniuose gaunami rezonansai. Kvarco mechaniniai rezonansai priklauso nuo to, kaip ir koku kampu išpjautas kristalas kristalinės gardelės atžvilgiu.

Kvarcinius generatorius galima suskirstyti į dvi dalis: klasikinius ir dirbančius aukštesnėmis harmonikoms. Aukštesnėmis harmonikomis generatorius generuoja naudojantis kvarcinio rezonatoriaus parazitiniiais rezonansais arba lygiagrečia talpa.

Kvarcinis rezonatorius, kuris naudojamas stabiliam mikrovaldiklio taktinio generatoriaus generuojamo impulsinio signalo dažniui gauti, turi būti patalpintas kuo arčiau mikrovaldiklio išvadų, skirtų jam pajungti. Labai svarbus yra kvarco dažnio stabilumas keičiantis aplinkos temperatūrai.

Skaitmeninės informacijos perdavimo laikas skirstomas į trumpus laiko intervalus vadinamus taktiais. Taktinius impulsus formuoja taktinių impulsų generatorius, tai dažniausiai yra labai stabilaus dažnio kvarcinis generatorius. Šio generatoriaus dažnis yra dalijamas į žemesnio dažnio signalus ir naudojamas įtaiso įvairių sudėtinių dalių valdymui. Asmeniniuose kompiuteriuose taktų pasikartojimo dažnis t. y. taktinis dažnis siekia tūkstančius megahercų, o telekomunikacijų ir kituose skaitmeniniuose įtaisuose ir didesnis [12].

## 1.5. Apibendrinimas

CMUT gali būti taikomas ir tokiose srityse, kuriose reikalingas masės pokyčiu paremtas matavimas. Tradiciniuose ultragarsiniuose skaneriuose naudojami dideli keitiklių masyvai ir FPGA paremti elektronikos grandynai, kurie reikalingi siunčiamiems signalams formuoti ir priimamiems signalams analizuoti. CMUT dėl didelio jautrumo mechaninei apkrovai gali būti naudojami kaip jutikliai. Šiuo atveju dažnai didelis kanalų skaičius nėra reikalingas, todėl FPGA loginiai blokai tampa per daug sudėtingu ir brangiu sprendimu. Pavyzdžiui, SAW žadinimui pakanka vieno ar kelių kanalų. SAW keitiklių perdavimo grandinės perdavimo dažnis gali būti iki 1 MHz. Tradicinio ultragarsinio valdymo grandinės perdavimo dažnis dažniausiai yra 40 kHz. Tačiau aukšto dažnio perdavimo grandinė užtikrina gerą stabilumą ir tikslumą. Taigi, atsiranda galimybė naudoti standartinius mikroprocesorių įrenginius talpinių keitiklių žadinimo grandinių elektronikai valdyti.

Šiame darbe tyrinėjamos tik impulsų generatoriaus realizavimo galimybės, nes skaitmeninis perdavimo spindulio keitiklis dažniausiai generuoja reikiamus skaitmeninius perdavimo signalus tinkamu laiku ir faze, kad gautų tikslinį perdavimo signalą. Aukštos įtampos impulsų generatoriai

greitai perjungia keitiklio elementą į atitinkamus programuojamus aukštos įtampos šaltinius, siekiant generuoti perdavimo bangą. Norint sukurti paprastą dvipolę perdavimo bangos formą, perdavimo komutatorius pakaitomis sujungia elementą prie teigiamos ir neigiamos perdavimo įtampos, valdomos skaitmeninio keitiklio.

## 2. Metodinė dalis

Ultragarsiniuose skaneriuose naudojami dideli keitiklių masyvai ir FPGA paremti elektronikos grandynai, kurie reikalingi siunčiamiems signalams formuoti ir priimamiems signalams analizuoti. CMUT dėl didelio jautrumo mechaninei apkrovai gali būti naudojami kaip jutikliai. Šiuo atveju dažnai didelis kanalų skaičius nėra reikalingas, todėl FPGA loginiai blokai yra per daug sudėtingas ir brangus sprendimas.

Šioje darbo dalyje analizuojamos standartinio mikroprocesorinio įrenginio naudojimo galimybės CMUT žadinimo impulsų suformavimui. Atliekamas keitiklių žadinimo galinių stiprintuvų parinkimas ir tyrimas.

### 2.1. Aukštos įtampos keitiklis

CMUT keitiklių žadinimui reikalingi aukštos įtampos (30–100 V) ir aukšto dažnio (2–20 MHz) impulsai. Aukštos įtampos pulsatorius turi būti atjungtas atspindėto signalo iš objekto priėmimo metu.

Tyrimams pasirinkta aštuonių kanalų, trijų lygių Maxim Integrated impulsinė IC (angl. *Integrated Circuit* – Integrinis grandynas) MAX14808 (žr. 1.5 pav.), leidžianti gauti aukštos įtampos (iki 105 V), aukšto 20 MHz dažnio impulsus. IC gali būti valdoma per loginius įėjimus FPGA ar mikroprocesoriaus pagalba. MAX14808 aukštos įtampos keitiklis išsiskiria tuo, kad gali suformuoti tiek bipolinius, tiek vienpolinius stačiakampius impulsus (dauguma pramoninių ultragarsinių aparatų naudoja vienpolius impulsus).

MAX14808 keitiklyje yra aštuoni kanalai, kuriuose įmontuota apsauga (diodai) nuo viršįtampių ir integruotas aktyvus jungimas į žemės laidininką. MAX14808 keitiklyje taip pat yra aštuoni integruoti perdavimo / priėmimo (T / R) jungikliai.

Įrenginiai gali veikti tiek su laikmačiu, tiek paprastu režimu. Laikmačio režimu duomenų įvestis gali būti sinchronizuota su diferenciniu arba vienpusiu laikmačiu, kad būtų sumažintas fazinis triukšmas, susijęs su FPGA išvesties signalais, kurie kenkia Doplerio efektui (atsispindėjusių nuo judančio objekto bangų dažnis pakinta priklausomai nuo judėjimo greičio ir krypties daviklio atžvilgiu: objektui artėjant, atsispindėjusių bangų dažnis didėja, objektui tolstant – mažėja). Paprastame režime sinchronizacijos funkcija yra išjungta, o išvestis atspindi duomenų įvestį po 18 ns delsos. Abu prietaisai turi reguliuojamą maksimalią srovę (nuo 0,5 A iki 2 A), naudojamą sumažinti energijos suvartojimą, kai nereikalinga maksimali srovė.

Vienas pagrindinių ultragarsinio impulsinio įrenginio reikalavimų – maža išėjimo talpa. Iš MAX14808 techninės specifikacijos matyti, kad išėjimo talpa yra maža apie 80 pF. Didesnės apkrovos talpos gali žymiai sumažinti išėjimo signalo amplitudę ir smarkiai pabloginti keitiklių elementų jautrumą. Keitiklis gali komutuoti aukštą įtampą, apie  $\pm 105$  V, kai maksimali apkrovos srovė yra 2 A. Įrenginyje sumontuoti diodai apsaugo elektronikos grandines nuo viršįtampių. Mikroprocesorinis įrenginys valdo 8 kanalų siūstuvą, tai sutaupo daug vietos, vartotojui suteikia kompaktiško įrenginio realizavimo galimybę bei sumažina projektavimo laiką ir bendras sistemos sąnaudas [24].

Tiriamajame darbe analizuojamos galimybės adaptuoti valdiklį MAX14808 keitiklio valdymui (žr. 1.5 pav.).





1.5 pav. MAX14808 aukštos įtampos keitiklis ir jo valdiklis

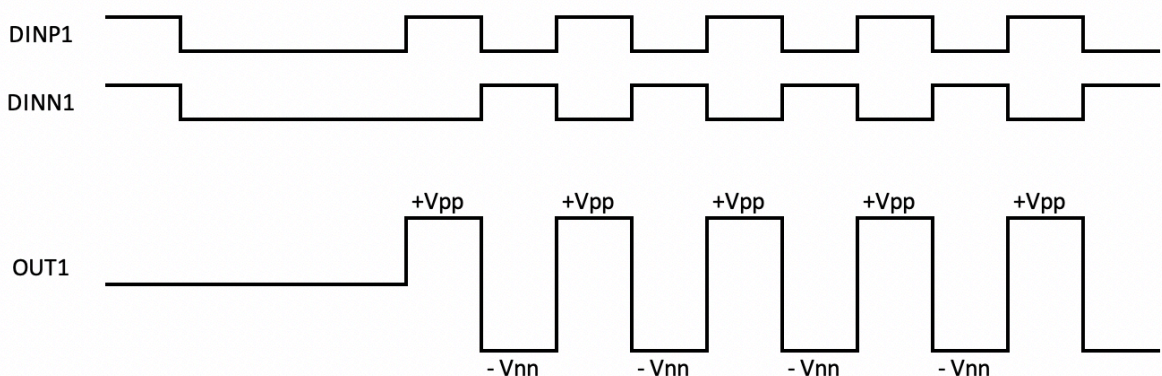
Turima MAX14808 valdiklio versija, realizuota FPGA pagrindu, veikia tik su Windows 7 ir senesnėmis Windows operacinės sistemos versijomis ir nėra suderinama su naujomis šios operacinės sistemos modifikacijomis. Pats sistemos valdymas turi ribotas galimybes, pavyzdžiui, nėra galimybės pasirinkti impulsų sekos skaičiaus, daugiau kaip keturi impulsai, ribotas dažnio generavimo pasirinkimas, laikas tarp impulsų sekų fiksuotas, trukmė tik 100  $\mu$ s.

## 2.2. Žemos įtampos impulsų generatorius

Impulsų generatoriai generuoja periodinius artimus stačiakampiui formos impulsus.

Sekos generuojami impulsai gali būti vieno poliarumo (teigiamieji arba neigiamieji) arba dvipoliniai (bipoliniai), tam tikro atskaitos lygio atžvilgiu – vienpusiai ir dvipusiai.

1.6 paveiksle parodytos, žemos įtampos FPGA impulsų generatoriaus sugeneruotos dvi impulsų sekos (DINP1 ir DINN1), kurias keitiklis paverčia į bipolinį impulsą (OUT1).



1.6 pav. Bipolinio impulso pločio moduliacija

MAX14808 keitiklyje yra galimybė iš dviejų impulsų su vieno impulso uždelsimu laiku lygiu pusei periodo, gauti bipolinius impulsus.

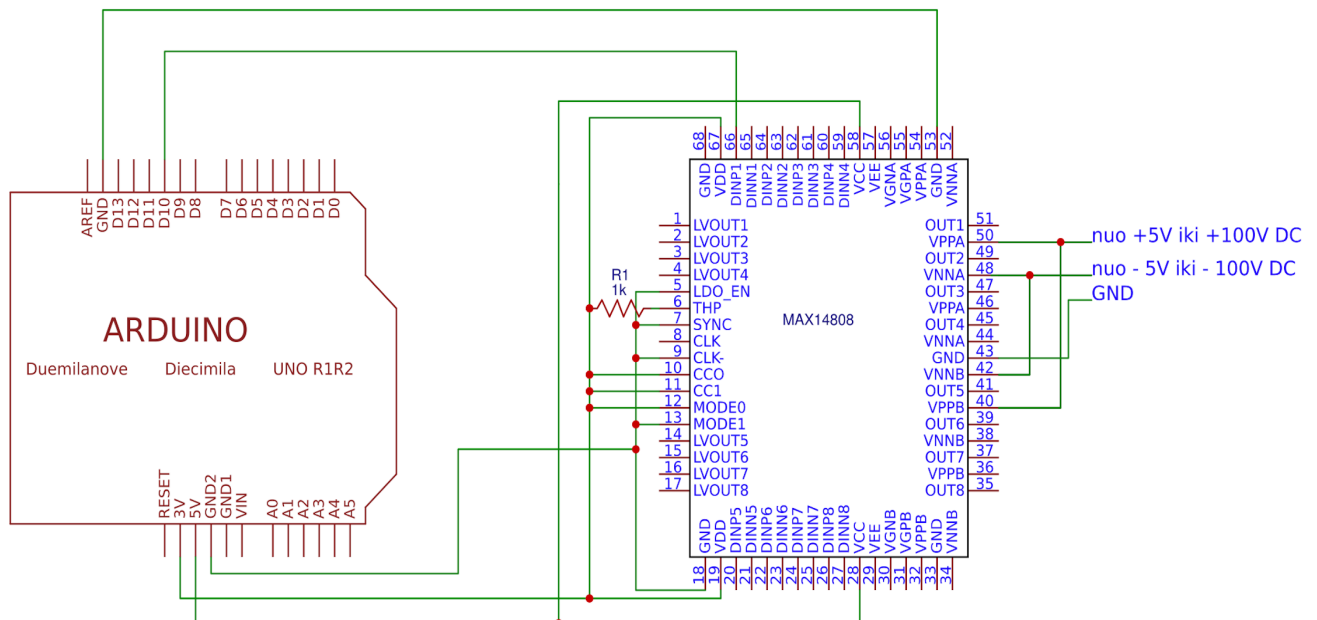
Toliau tiriamajame darbe buvo bandoma pritaikyti vieną iš dviejų sistemų – Arduino Uno R3 arba Raspberry Pi 4 B, kaip žemos įtampos generatorių. Sistemos pasirinktos, nes turi vidinius maitinimo šaltinius su + 5 V ir + 3 V įtampa ir gali generuoti impulsų sekas reikalingas keitiklio valdymui.

### 2.2.1. Arduino mikrovaldiklio pritaikymas

Arduino – atviro kodo platforma, naudojama elektronikos gaminiuose. Ją sudaro elektroninis mikrovaldiklis ir programinė įranga. Arduino skirtas tiek mokomųjų, tiek profesionalių tikslų siekimui. Ši platforma išsiskiria tuo, kad jai nereikia atskiros techninės įrangos. Komunikacija palaikoma per USB kabelį. Tai pilnavertis minikompiuteris, galintis valdyti jutiklius, ekranėlius, variklius, duomenų perdavimą bei daugelį kitų elementų. Tam, kad būtų valdomi visi prijungti priedėliai ir patobulinimai, reikia į kompiuterį įdiegti Arduino programinę įrangą. Naudojama programavimo kalbos C++ adaptuota versija [2].

Arduino Uno R3 yra spausdintinio montažo plokštė, kurioje naudojamas ATmega328P mikrovaldiklis. Ši mikrovaldiklio plokštė turi 14 skaitmeninių įvesties / išvesties prievadų, iš kurių 6 gali būti panaudoti kaip išvestys, palaikančios impulso pločio moduliaciją (PWM), 6 analoginius įvesties prievadus, 16 MHz taktinio dažnio generatorių, vieną USB prievadą, maitinimo lizdą, ICSP3 jungtį ir perkrovimo mygtuką. Plokštėje yra visi elektronikos komponentai, reikalingi užtikrinti mikrovaldiklio darbą – užtenka prijungti maitinimo įtampą per tam skirtą lizdą arba prijungti USB prievado laidą prie kompiuterio.

MAX14809 ir Arduino Uno jungimo schema parodyta 1.7 paveiksle.



1.7 pav. MAX14809 ir Arduino Uno jungimo schema

Arduino sistema maitina MAX14809 keitiklį + 5 ir + 3 V įtampa. Arduino Uno per išvadą D10 generuoja impulsus seką į keitiklio DINP1 išvadą. Prie + VPPA ir – VNNA prijungiamas aukštos

įtampos mitinimo šaltinis (iki  $\pm 105$  V). Prie MAX14809 kietikio OUT1 kanalo jungiamas osciloskopas aukštos įtampos impulsų stebėjimui.

Arduino programavimo kalba leidžia gauti reikalingą PWM signalą, naudojant komandos „*analogWrite*“ („*pin*“, „*dutyCycle*“) iškvietimą, kur „*dutyCycle*“ vertė nuo 0 iki 255, o išvadas „*pin*“ yra vienas iš galimų PWM išvadų (3, 5, 6, 9, 10 arba 11). Funkcija „*analogWrite*“ suteikia paprastą aparatinės įrangos PWM sąsają, tačiau ji nekontroliuoja dažnio.

Šios technologijos pranašumas tas, kad ji gali naudoti bet kokį skaitmeninį išvesties kontaktą. Be to, galima visiškai kontroliuoti darbo ciklą ir dažnį. Pagrindinis trūkumas tas, kad bet kokie pertraukimai turės įtakos laiko skaičiavimui, o tai, jei pertraukimai nebus išjungti, gali sukelti valdomos sistemos netinkamą režimą. Kitas trūkumas, kad negalima palikti veikiančios išvesties, kai procesorius atlieką kitą procesą.

Tiesiogiai manipuliuojant, mikrokontrolerio laikmačio registrais galima gauti daugiau valdymo galimybių nei numatyta „*analogWrite*“ funkcijoje.

Numatytasis Arduino PWM išvadų dažnis yra apie 490 Hz (išvadai: 9, 10, 3 ir 11) ir apie 980 Hz (išvadai: 5 ir 6), tačiau MAX14809 valdymui, reikia aukštesnių dažnių. Arduino gali generuoti PWM kontaktų dažnius iki 8 MHz. Norint pakeisti šias vertes, reikia dirbti su laikmačiais, kuriuose yra registrai.

Laikmatis arba, laikmatis / skaitiklis yra Arduino valdiklyje įmontuotos aparatūros dalis (kiti valdikliai taip pat turi laikmačio aparatūrą). Tai yra tarsi laikrodis, kuris gali būti naudojamas laiko įvykiams matuoti. Laikmatį galima užprogramuoti specialiais registrais. Galima sukonfigūruoti laikmačio nustatymą, veikimo režimą ir daugelį kitų dalykų. Visi laikmačiai priklauso nuo Arduino sistemos taktinio dažnio. Arduino sistema veikia 16 MHz taktiniu dažniu.

Arduino Uno mikrokontroleris ATmega328P turi tris PWM laikmačius, žinomus kaip laikmatis 0, laikmatis 1 ir laikmatis 2. Kiekviename laikmatyje yra du išvesties palyginimo registrai, kurie valdo dviejų laikmačio išėjimų PWM plotį: kai laikmatis pasiekia palyginimo registro vertę, perjungiamas atitinkamas išėjimas. Du kiekvieno laikmačio išėjimai dažniausiai bus to paties dažnio, tačiau gali turėti skirtingus darbo ciklus (atsižvelgiant į atitinkamą išvesties palyginimo registrą).

Paprasčiausiame PWM režime laikmatis pakartotinai skaičiuojamas nuo 0 iki 255. Išėjimas įjungiamas, kai laikmatis yra 0, ir išsijungia, kai laikmatis sutampa su išėjimo palyginimo registru. Kuo didesnė išvesties palyginimo registro vertė, tuo didesnis darbo ciklas. Šis režimas žinomas kaip greitis PWM režimas. Šioje diagramoje parodyti dviejų konkrečių OCRnA ir OCRnB verčių išėjimai. Abu išėjimai turi tą patį dažnį, atitinkantį viso laikmačio ciklo dažnį.

Šis programos kodo fragmentas nustato greitį PWM 9 ir 10 išvadose (0 laikmatis) (žr. 1.8 pav.).

```

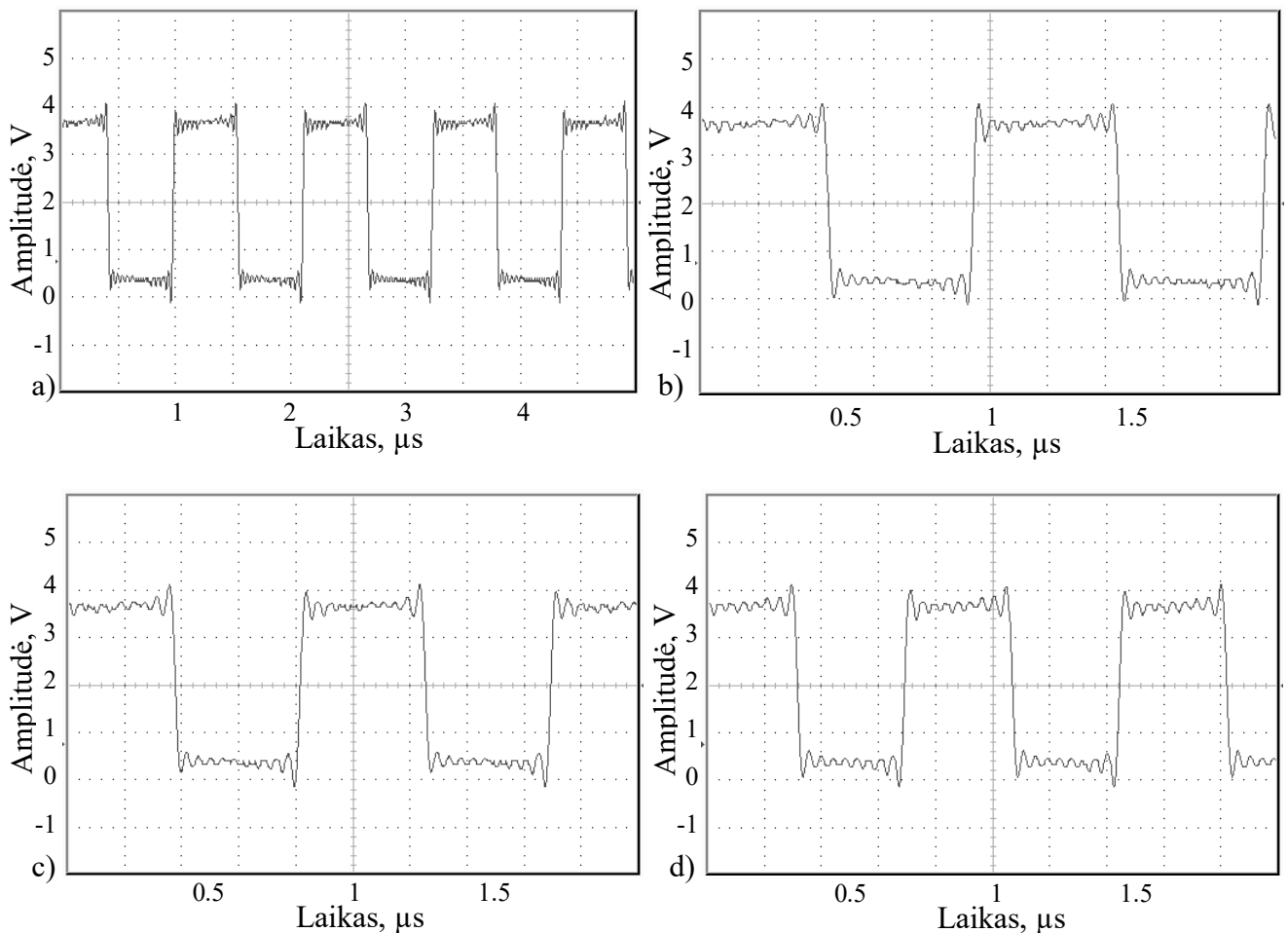
void setup ()
{
  TCCR1A = bit (COM1A0);
  TCCR1B = bit (WGM12) | bit (CS10);
  OCR1A = 0; //0 – 8MHz, 1 – 4MHz
  OCR1B = 1;
  pinMode (10, OUTPUT);
}
void loop ()
{
}

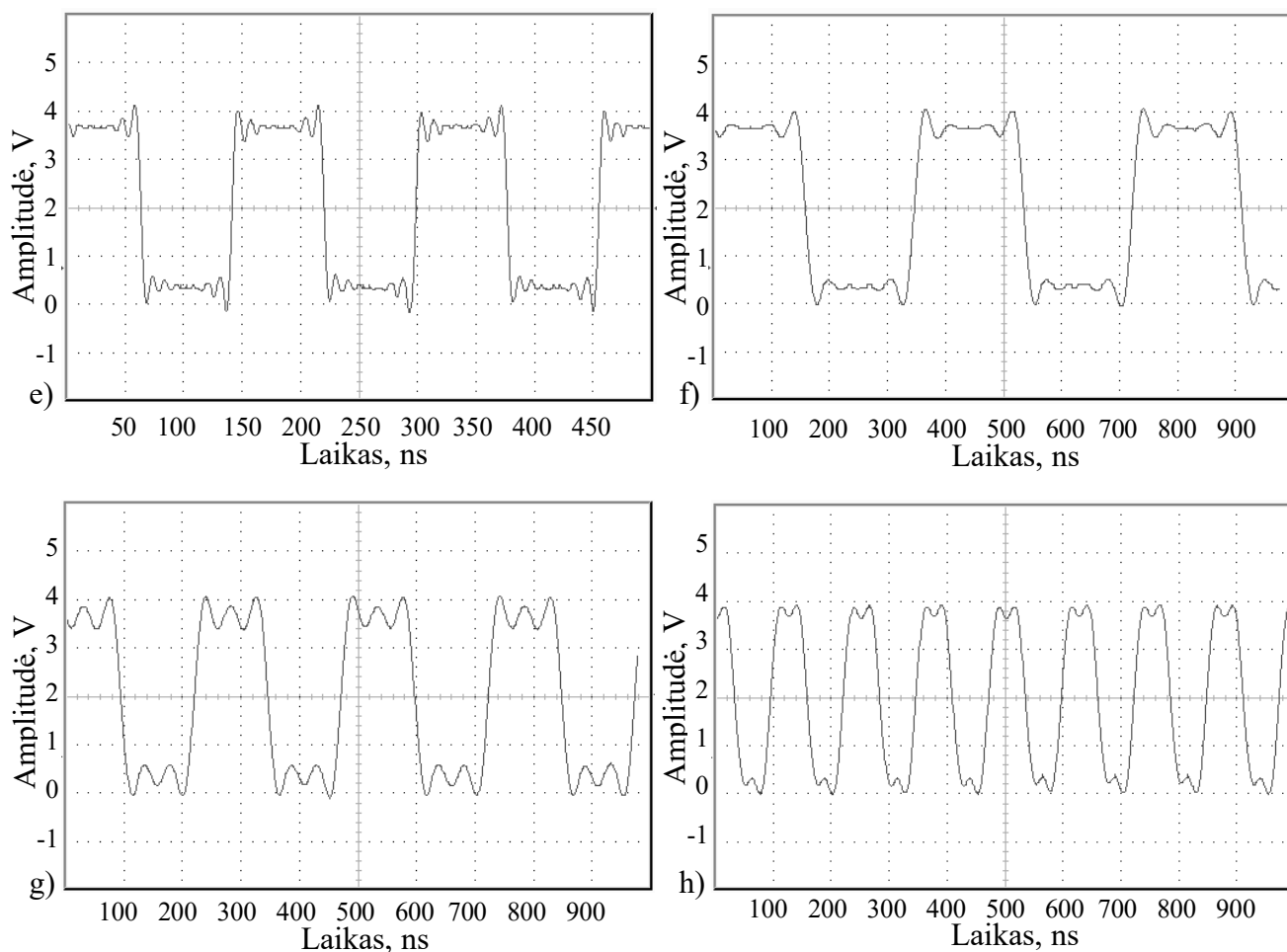
```

1.8 pav. Arduino programos kodas impulsų sekai sugeneruoti – 8 MHz

Apibendrinant registro parametrus, nustatant bangos formos generavimo režimo bitus WGM į 011, pasirenkamas greitas PWM. Nustačius COM1A bitus ir COM1B bitus į 10, A ir B išvestims suteikiamas neinvertuotas PWM. Kuo didesnė OCR0A, tuo mažesnis dažnis, bet tuo didesnė PWM darbo ciklo skiriamoji geba.

Arduino Uno valdikliu pavyko sugeneruoti maksimalią 8 MHz impulsų seką, bet negauti idealūs stačiakampių impulsai (žr. 1. 9 pav.).





**1.9 pav.** Arduino Uno sugeneruotos impulsų sekos (a – 888,9 kHz, b – 1 MHz, c – 1,143 MHz, d – 1,333 MHz, e – 1,6 MHz, f – 2,667 MHz, g – 4 MHz, h – 8 MHz)

Kaip matyti iš 1.9 pav., generuojant aukštesnius dažnius gaunami impulsai panašėja į sinusoidinį signalą.

## 2.2.2. Mikrokompiuteris Raspberry Pi pritaikymas

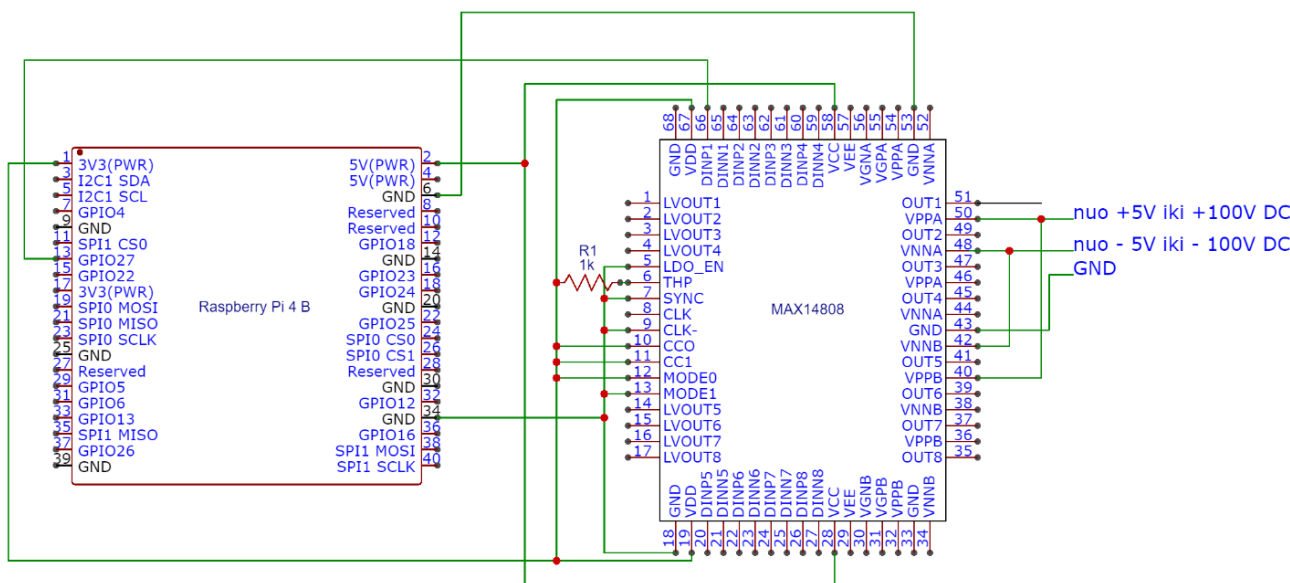
Raspberry Pi – ypač mažų matmenų kompiuteris, kuris, prijungtas prie kitų technikos prietaisų, atlieka įprastam kompiuteriui skirtas funkcijas. Raspberry Pi galima prijungti prie televizoriaus ar monitoriaus ir klaviatūros.

Raspberry Pi 4 modelis B yra naujausias produktas populiariame Raspberry Pi kompiuterių asortimente. Lyginant su ankstesniu Raspberry Pi 3 modeliu B+, techniniai parametrai yra pranašesni lyginant – procesoriaus greičio, multimedijos našumo, laikinosios atminties bei ryšio modulių parametrus. Nors mikrokompiuteris tapo galingesniu, energijos suvartojimas liko panašus. Visi moduliai, priedėliai bei ekranai yra suderinami su naująja versija.

Pagrindiniai mikrokompiuterio Raspberry Pi bruožai yra aukštos kokybės 64 bitų keturių branduolių procesorius, dviejų 4K skiriamosios gebos ekranų palaikymas per mikro – HDMI lizdus, kurie gali dekoduoti vaizdą iki 60 FPS. Raspberry Pi 4 taip pat pasižymi dviejų dažnių bevieliniu internetu ryšiu 2.4 / 5.0GHz, Bluetooth 5.0, Gigabit Ethernet, 1 GB RAM, USB 3.0 ir „PoE“ atsarginio maitinimo galimybe (naudojant atskirą „PoE HAT“ priedėlį). Mini kompiuterio maitinimo prievadas pasikeitė iš USB B Micro jungties į USB – C maitinimo jungtį. Dviejų dažnių bevielis ryšys ir „Bluetooth“

tinklas turi atitiktis sertifikata, leidžiantį plokštę naudoti, kuriant galutinius produktus. Tai leidžia gerokai sumažinti galutinio produkto testavimo apimtį ir tuo pačiu sumažina naujo produkto projektavimo ir gamybos kaštus.

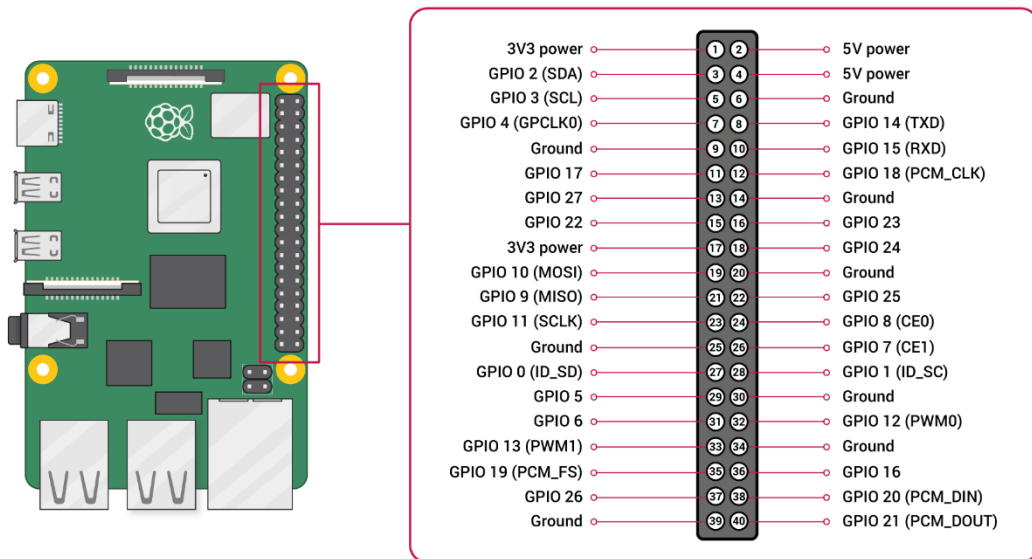
MAX14809 ir Raspberry Pi 4 B jungimo schema parodyta 1.10 paveiksle. Raspberry Pi 4 B sistema maitina MAX14809 keitiklį + 5 ir + 3 V įtampa. Raspberry Pi 4 B per išvadą GPIO27 generuoja impulsų seką į keitiklio DINP1 išvadą. Prie + VPPA ir – VNNA prijungiamas aukštos įtampos mitinimo šaltinis (iki  $\pm 105$  V). Prie MAX14809 keitiklio OUT1 kanalo jungiamas osciloskopas aukštos įtampos impulsų stebėjimui.



1.10 pav. MAX14809 ir Raspberry Pi 4 jungimo schema

Norint, kad Raspberry Pi veiktų, reikalinga kompiuterinė operacinė sistema. Raspbian yra Debian pagrindu sukurta atviro kodo operacinė sistema. Šis Linux platinamasis paketas sudarytas tik iš atviro kodo programų su galimybe atsisiųsti programas iš interneto saugyklų.

Svarbiausias Raspberry Pi pranašumas prieš kitus panašaus tipo kompiuterius yra bendrosios paskirties įvesties / išvesties (GPIO) išvadai. Raspberry Pi turi 40 GPIO kontroliuojamų išvadų, kurie valdo signalų ir magistralių rinkinį (žr. 1.11 pav.), iš kurių 4 (GPIO12, GPIO13, GPIO18, GPIO19) gali būti panaudoti kaip išvestys, palaikančios impulso pločio moduliaciją (PWM). GPIO išvadai gali būti sukonfigūruoti įvedimui arba išėjimui bei įjungimui / išjungimui. Įvesties reikšmės yra nuskaitomos (paprastai aukštos = 1, žemos = 0). Išvesties reikšmės yra įrašomos / nuskaitomos.



1.11 pav. Raspberry Pi 4 išvadai (GPIO)

Raspberry Pi palaiko daugumą populiarių programavimo kalbų. Tyrimui bus naudojama standartinė Python ir C programavimo kalba.

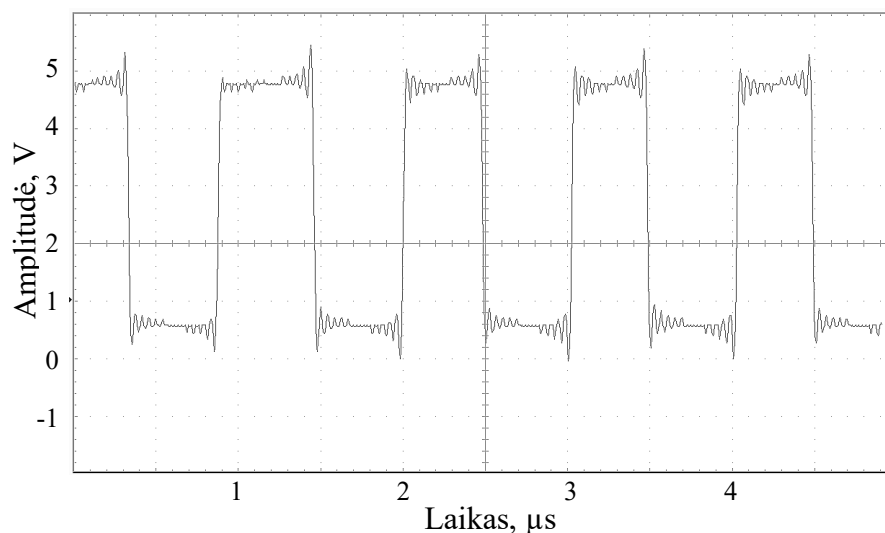
1.12 paveiksle pateiktas Raspberry Pi 4 B išvado GPIO18 įjungimo ir išjungimo pasikartojantis programavimo kalbos Python kodas.

```
#!/usr/bin/python
import RPi.GPIO as GPIO
GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GPIO.setup(18, GPIO.OUT)
while True:
    GPIO.output(18, True)
    GPIO.output(18, False)
```

1.12 pav. Python programos kodas sugeneruoti impulsų sekai

Python kalboje yra du išvadų numeravimo būdai. Pirmasis būdas naudojant *BOARD* numeravimo sistemą. Šios numeracijos naudojimo pranašumas yra tas, kad aparatinė įranga veiks visada, nepaisant kokia Raspberry Pi versija naudojama. Nereikės perjungti jungties ar pakeisti savo programos kodo. Antroji numeravimo sistema yra *BCM*. Tai yra žemesnio lygio numeravimo būdas – jis nurodo kanalų numerius procesoriaus Broadcom. Naudojant šį būdą visada reikia atsižvelgti į Raspberry Pi sistemos schemą, kuris kanalo numeris turi sąsają su valdymo išvadu. Sukurtos programos gali būti nesuderinamos su kitomis Raspberry Pi versijomis.

1.13 paveiksle pavaizduotas gautas 1 MHz dažnis, sugeneruotas su Python programavimo kalba, įjungiant ir išjungiant įtampą. Python programavimo kalba neturi prieigos prie sistemos laikmačių valdymo, todėl negali generuoti maksimalaus leidžiamo laikmačio dažnio.



**1.13 pav.** Python programavimo kalba sugeneruota impulsų seka – 1 MHz

Raspberry Pi turi galimybę naudoti įvairias populiariausias programavimo kalbas (C, C++, PHP, Ruby, Perl, Python, Pascal ir kt.) ir jų bibliotekas.

WiringPi ir BCM2835 bibliotekos naudojamos C programavimo kalbai ir suteikia prieigą prie GPIO ir kitų įvesties / išvesties funkcijų, esančių Broadcom BCM lustuose, kur leidžia prieiti prie laikmačio nustatymų. Raspberry Pi 4 naudoja naujausią Broadcom BCM2711 lustą, o biblioteka pavadinta BCM2835 pirmojo Raspberry Pi versijoje naudojamo lusto, tad bibliotekos pavadinimas nepakeistas, bet leidžia naudotis prieiga prie laikmačio su naujais lustais.

1.14 paveiksle pateiktas Raspberry Pi 4 B išvado GPIO18 įjungimo ir išjungimo pasikartojantis C programavimo kalbos kodas, naudojant WiringPi ir BCM2835 bibliotekas, generuojantis impulsų seką.

```

#include <wiringPi.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
int main() {
    if (wiringPiSetup () == -1)
        exit (1) ;
    pinMode(1, OUTPUT);
    while(1) {
        digitalWrite(1, 0);
        digitalWrite(1, 1);
    }
    return 0;
}
a)

```



```

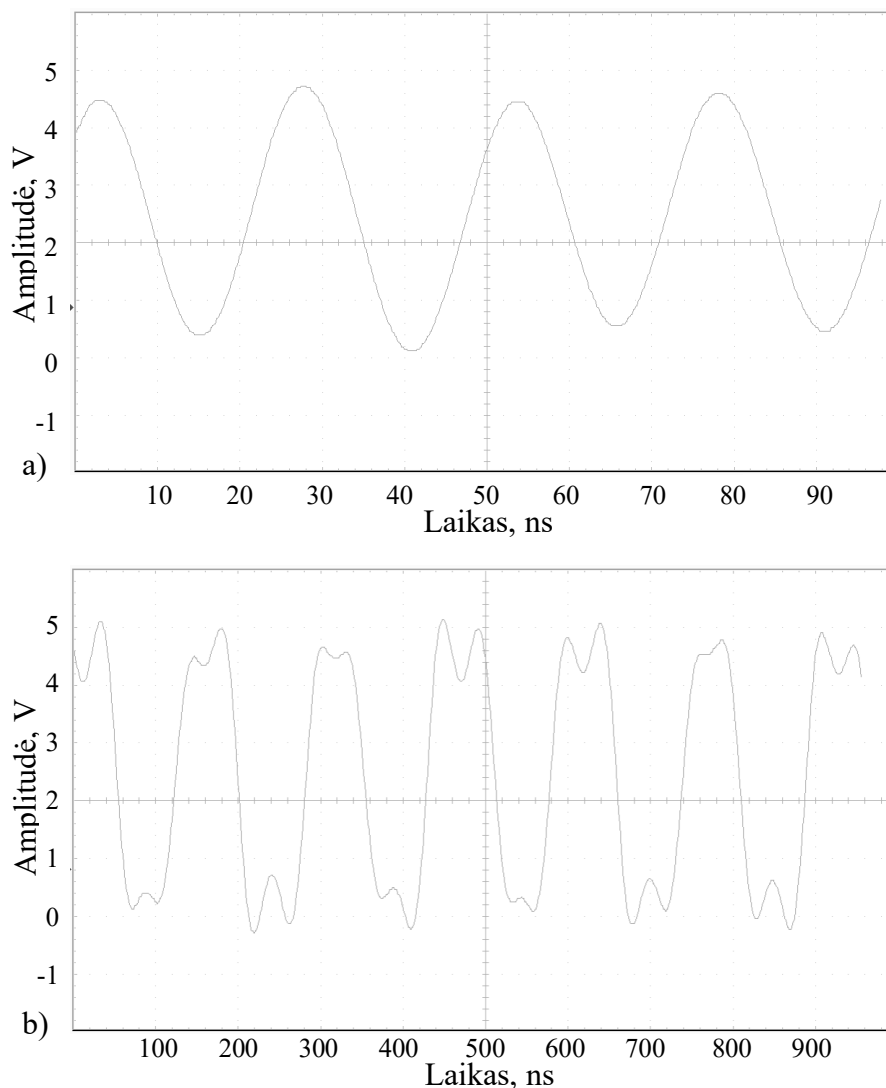
#include <bcm2835.h>
#define PIN RPI_GPIO_P1_18
int main(int argc, char *argv[]) {
    if(!bcm2835_init())
        return 1;
    bcm2835_gpio_fsel(PIN, BCM2835_GPIO_FSEL_OUTP);
    while(1) {
        bcm2835_gpio_write(PIN, HIGH);
        bcm2835_gpio_write(PIN, LOW);
    }
    return 0;
}

```

b)

**1.14 pav.** C programavimo kalbos kodas, naudojant a) WiringPi ir b) BCM2835 bibliotekas skirtas impulsų sekos generavimui

Pritaikius C programavimo kalbą ir WiringPi biblioteką, kuri turi prieigą prie Raspbery Pi sistemos laikmačio, galima generuoti maksimalų 28 MHz dažnį. Su BCM2835 biblioteka sugeneruotas maksimalus dažnis – 6.5 MHz (žr. 1.15 pav.).



**1.15 pav.** Sugeneruoti dažniai a – WiringPi (28 MHz) ir b – BCM2835 (6,5 MHz) bibliotekomis

### 2.3. Apibendrinimas

Tiek Arduino, tiek Raspberry Pi 4 turi pranašumų ir trūkumų. Dažniausiai Arduino yra naudojamas pradedantiesiems projektams, o kai kuriuos sudėtingus projektus galima lengvai valdyti Raspberry Pi.

Arduino Uno lengviau palaiko sąsają su analoginiais jutikliais, varikliu ar kitais komponentais, o Raspberry Pi 4 turi sudėtingesnę kelią jutiklių rodmenims gauti (pvz., tenka diegti bibliotekas, programinę įrangą, prisijungti prie monitoriaus / klaviatūros / pelės).

Kita vertus, Raspberry Pi gali pakeisti asmeninį kompiuterį bei supaprastina projektus, kai reikia valdyti didelį kiekį operacijų, gali prisijungti prie Bluetooth įrenginių ir interneto, naudodamiesi eternetu arba prisijungus prie Wi-Fi. Kitaip nei Raspberry Pi, Arduino Uno negali naudoti interneto ar Bluetooth ryšio be papildomo priedo.

Raspberry Pi 4 taip pat yra daug greitesnis nei Arduino (1,5 GHz, palyginti su 16 MHz). Raspberry Pi suteikia galimybę atlikti kasdienes užduotis, kurias paprastai atlieka asmeniniai kompiuteriai – žaisti vaizdo žaidimus, naršyti internete, klausytis muzikos ir t. t.

FPGA programavimui reikalingos VHDL / Verilog programavimo kalbų žinios, taip pat reikia būti susipažinus su skaitmeninės sistemos pagrindais. Programavimas yra sudėtingesnis lyginant su C programavimo kalba. Naudojama speciali procesoriaus aparatinė įranga.

Pagrindinis valdymo įrenginio pasirinkimo kriterijus - impulsų dažnis ir išorinės komunikacijos galimybės. Kadangi sistemos realizacijai FPGA nėra būtinas, dėl geresnio suderinamumo, platesnio sistemos valdymo galimybių, aukštesnio dažnio pasirinktas Raspberry Pi 4 B mikrovaldiklis (žr. 2 lentelę).

**2 lentelė.** MAX14808 valdymui naudoti įrenginiai

Specifikacija	Arduino Uno R3	Raspberry Pi 3 B+	Raspberry Pi 4 B	FPGA MAX14808
CPU	8 bitų	32 / 64 bitų	32 / 64 bitų	–
Lustas	ATmega328P	Broadcom BCM2837B0	Broadcom BCM2711	MAX14808ETK+
Operacine sistema	–	Linux, Windows, ...	Linux, Windows, ...	–
Atmintis	32 KB	Priklausomai nuo įdėtos microSD atminties kortelės	Priklausomai nuo įdėtos microSD atminties kortelės	–
Taktinis dažnis	16 MHz	4 x 1,4 GHz	4 x 1,5 GHz	–
Operatyvioji atmintis	2 KB	1 GB, LPDDR2	1, 2, 3, 4 GB, LPDDR2	–
Išorine komunikacija	–	LAN, Wi-Fi, Bluetooth	LAN, Wi-Fi, Bluetooth	–
GPIO išvadai	16	40	40	40
Maitinimo įtampa	7–12 V	3,3–5 V	3,3–5 V	3–5 V
Matmenys	7,6 x 1,9 x 6,4 cm	8,6 x 5,4 x 1,7 cm	8,6 x 5,4 x 1,7 cm	13,2 x 11,1 x 1,2 cm
Kaina	20 €	35 €	50 €	70 €

Maksimalus PWM dažnis	8 MHz	16 MHz	28 MHz	20 MHz
PWM kanalų valdymas	2	4	4	16 / 8 (bipoliniai)

### 3. Tiriamoji dalis

#### 3.1. Aukšto dažnio valdymo tyrimas

Tyrime programavimui naudota WiringPi biblioteka, kuri leidžia prieiti prie BCM2711 lusto laikmačio nustatymų.

Raspberry Pi procesoriuje galima nustatyti aukštą arba žemą GPIO linijų išvesties funkciją. Nustatymo greitis priklauso nuo procesoriaus greičio.

Didesnis impulsų pasikartojimo dažnis gaunamas todėl, kad GPIO yra prijungti prie impulsų generatoriaus, kuris nustatytas generuoti konkretaus tipo impulsus. Impulsų generatorius tiesiog įsijungia su maitinimo įtampos įjungimu, nereikalaudamas jokios GPIO linijos ar procesoriaus intervencijos. Faktiškai impulso išvestis gali tęstis pasibaigus programai, jei nebus nustatyta iš naujo.

Pagrindinis PWM dažnis nustatomas:

```
pwmSetClock (daliklis);
```

Nėra galimybės tiesiogiai valdyti kompiuterio laikmačio greičio. Vietoj to, reikia nurodyti daliklį, norint sumažinti laikmatį. Bibliotekoje nurodyti standartiniai parametrai (žr. 3 lentelę).

**3 lentelė.** Lustų BCM2835 ir CM2711 palyginimas

Laikmačio greičių nustatymai	BCM2835	BCM2711
pwmSetClock(2048)	9,375 kHz	13,2 kHz
pwmSetClock(1024)	18,75 kHz	26,4 kHz
pwmSetClock(512)	37,5 kHz	52,6 kHz
pwmSetClock(256)	75,0 kHz	105,7 kHz
pwmSetClock(128)	150,0 kHz	210,5 kHz
pwmSetClock(64)	300,0 kHz	421,1 kHz
pwmSetClock(32)	600,0 kHz	842,1 kHz
pwmSetClock(16)	1,2 MHz	1,7 MHz
pwmSetClock(8)	2,4 MHz	3,4 MHz
pwmSetClock(4)	4,8 MHz	6,8 MHz
pwmSetClock(2)	9,6 MHz	13,6 MHz
pwmSetClock(1)	4,6875 MHz	6,5 MHz

3 lentelėje pateikiami Broadcom BCM2835 ir BCM2711 lustų laikmačio greičių palyginimai. Lustas BCM2835 buvo naudojamas pirmoje Raspberry Pi versijoje, o lustas BCM2711 naudojamas jau ketvirtoje Raspberry Pi versijoje. Iš 3 lentelės matyti, kad maksimalus dažnis nuo 9,6 MHz pakilo iki 13,6 MHz, tai iliustruoja realų lusto spartos padidėjimą.

Didžiausias daliklis, kurį galima nurodyti, yra 0xFFF arba 4096, kuris suteikia tokį patį dažnį, kaip nurodant 1, t. y. 6,5 kHz. Svarbu, kad laikrodžio sparta nėra PWM pakartojimo sparta.

Kaip sukuriami PWM impulsai, priklauso nuo pasirinkto režimo:

```
bcm2835_pwm_set_mode(kanalas, tarpas, įjungimas);
```

Kanalas turi būti 0 arba 1, žymėjimo tarpas yra 1, kai reikia pažymėti tarpo režimą ir 0, jei reikalingas subalansuotas režimas. Kad būtų galima pradėti PWM impulsų generavimą, įjungimo bitas turi būti 1.

Diapazoną galima nustatyti naudojant komandą:

```
pwmSetRange (diapazonas);
```

Didžiausia diapazono, kuris veikia praktiškai, vertė yra 0xFF FFFF arba 16777215, kuris yra daugiau nei 268 milijonai takto impulsų, o didžiausias takto dažnis yra maždaug 30 sekundžių per pakartojimą.

Viena iš pagrindinių Raspberry Pi PWM naudojimo problemų - laikrodžio daliklio ir diapazono vertės pasirinkimas..

Geriausias būdas sukonfigūruoti tam tikrą pasikartojimo dažnį - pradėti nuo didžiausio laikmačio dažnio, t. y. 13,6 MHz padalinant iš 2 ir nustatyti reikiamą diapazoną. Jei reikalingas tam tikras pakartojimo dažnis, nurodytas sekundėmis, tuomet: maksimalus diapazonas = kartojimo laikas \* laikmačio dažnio = kartojimo laikas \* 13,6 \* 1000.

Panašiai, jei pakartojimo dažnis nurodomas kaip dažnis, tuomet didžiausias diapazonas yra: maksimalus diapazonas = laikrodžio dažnis / kartojimo dažnis = 13,6 / kartojimo dažnis. Tai suteikia maksimalų diapazoną, kurį galima naudoti. Jei norima mažesnio diapazono, laikmatį galima sumažinti iki mažesnio dažnio. Reikalingas daliklis: daliklis = 2 \* maksimalus diapazonas / norimas diapazonas. Mažiausias daliklis kurį galima naudoti yra 2.

Jei, suapvalinus daliklį ir diapazoną, negaunama pakankamai tikslaus signalo, reikia išbandyti kartotinius pasirinktam intervalui daliklius, t. y. išbandyti diapazoną \* 2, diapazoną \* 3 su atitinkamais dalikliais, t. y. dalikliu / 2, dalytuvu / 3 ir t.t. Žinoma, tai reiškia, kad reikia dirbti ir su duomenimis \* 2, duomenimis \* 3 ir pan.

Taip pat reikia nustatyti GPIO išvado režimą, kuris būtų naudojamas ALT režimu. PWM išvadai nustatomi: GPIO 18 į ALT5 ir GPIO 13 į ALT0:

```
pwmWrite (18, 5);
```

```
pwmWrite (13, 0);
```

Paprasčiausia PWM programa C programavimo kalboje:

```
#include <wiringPi.h>
```

```
#include <stdio.h>
```

```
#include <stdlib.h>
```

```
#include <stdint.h>
```

```
int main (void)
```

```
{
```

```

if (wiringPiSetupGpio() == -1)
    exit (1) ;
pinMode (18, PWM_OUTPUT);
pwmSetClock (2);
pwmSetRange (10) ;
pwmWrite (18, 5);
for (;;) ;
}

```

Laikmatis yra nustatytas kaip greičiausias 13,6 MHz, o PWM 18 yra nustatytas kaip žymėjimo / tarpo režimas su 2 diapazonu.

### 3.2. Valdymo programos projektavimas

Valdymo programos kūrimas prasideda nuo reikalavimų analizės ir aprašymo. Daugiausia problemų, kuriant programinę įrangą, kyla būtent iš prastai dokumentuotų, nepilnai aprašytų, skirtingai suprantamų bei projekto eigoje besikeičiančių reikalavimų. Labai svarbu suprasti, kad programinės įrangos projektų reikalavimai turi būti nuosekliai analizuojami keliuose lygiuose – nuo vizijos ir realizacijos funkcijų aprašymo.

PHP (angl. *Hypertext Preprocessor*) yra programavimo kalba, skirta internetinių puslapių kūrimui. Didžioji dauguma pasaulio puslapių yra sukurti būtent su PHP kalba. PHP programavimo kalba yra serverio dalis, tai reiškia, kad jai reikia būtinai turėti serverį, kuris gali suprasti PHP ir atiduoti vartotojui informaciją kokia nors tekstone kalba – HTML, CSS, JavaScript, XML ar kt.

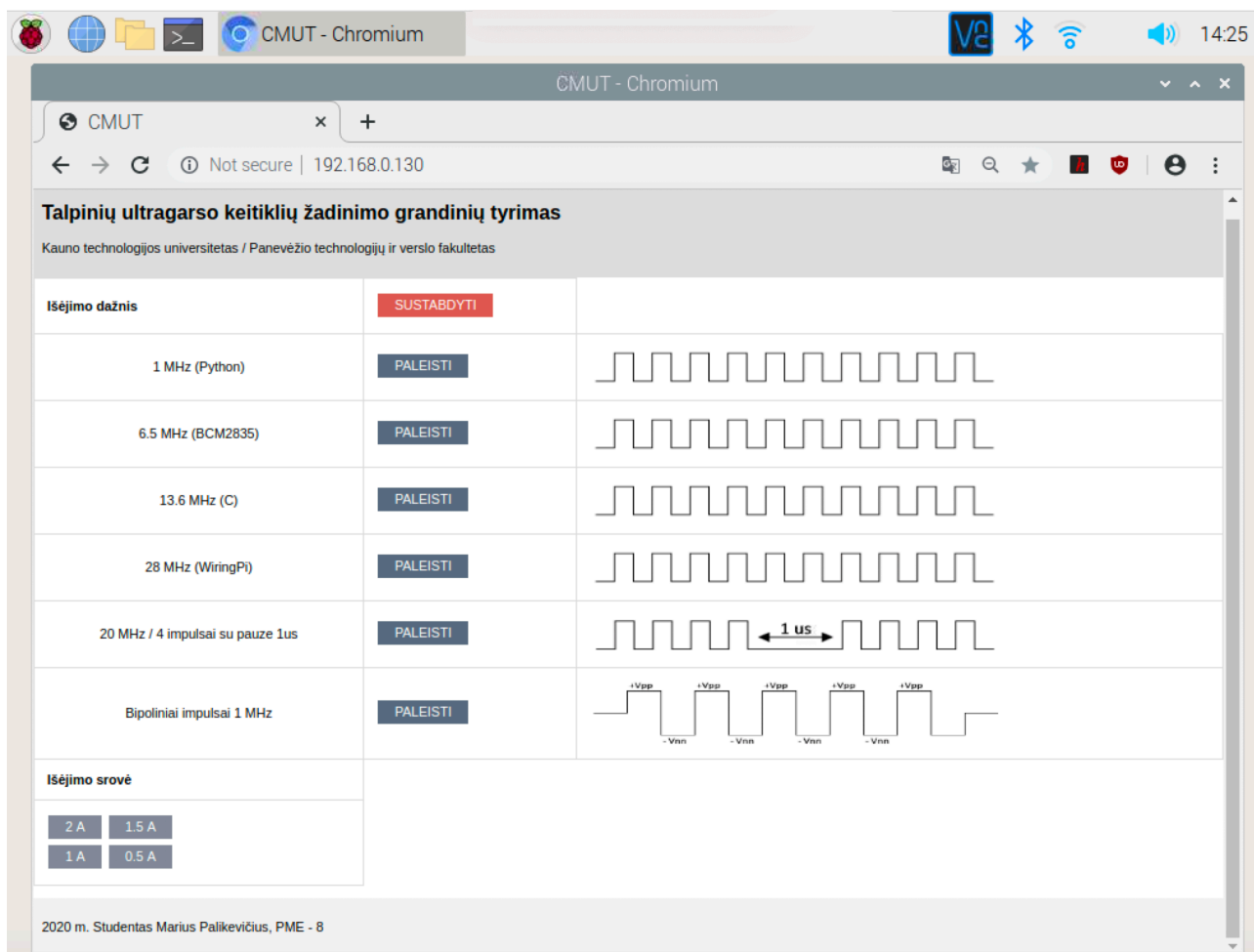
PHP sintaksė panaši į daugelį struktūrinių kalbų, ypač į C bei Perl. PHP kalba yra atviro kodo ir tai yra viena priežasčių, dėl ko kalba yra nors ir nesudėtinga, bet gana lanksti – veikia daugumoje operacinių sistemų, palaiko nemažai reliacinių duomenų bazių bei veikia su dauguma interneto serverių. Nors PHP yra dažniausiai naudojama interneto puslapių kūrimui, bet tai labai galingas įrankis, padedantis atlikti kitas funkcijas komandinėje eilutėje.

PHP į internetą orientuota skriptų kalba, kurią galima įterpti į HTML tarp specialių žymių, pvz.: `<?php /* PHP instrukcijos*/ ?>`, `<? /* PHP instrukcijos */ ?>`. PHP skriptas yra interpretuojamas ir vykdomas serverio pusėje, todėl vartotojas gauna rezultatą (HTML ar XML formatu) savo naršyklėje, nežinodamas koks kodas buvo įvykdytas.

Apache – tai atvirojo kodo HTTP serveris, naudojamas Unix ir Windows aplinkose, kuris aptarnauja daugiau nei pusę pasaulio internetinių svetainių. Apache serveris naudojamas statinio ir dinaminio turinio svetainėms publikuoti.

Yra nemažai mokamų ir nemokamų programų skirtų PHP kodui rašyti. PHP failus galima redaguoti ir paprastuose teksto redaktoriuose.

1.16 paveiksle pavaizduotas programos valdymo langas. Valdymo lange paspaudus mygtuką PHP kodas nukreipia į Python / C sugeneruotą kodą, kur atliekamas tam tikro to dažnio generavimas (žr. 1 priedas).



1.16 pav. MAX14808 valdymo programos lango grafinė sąsaja

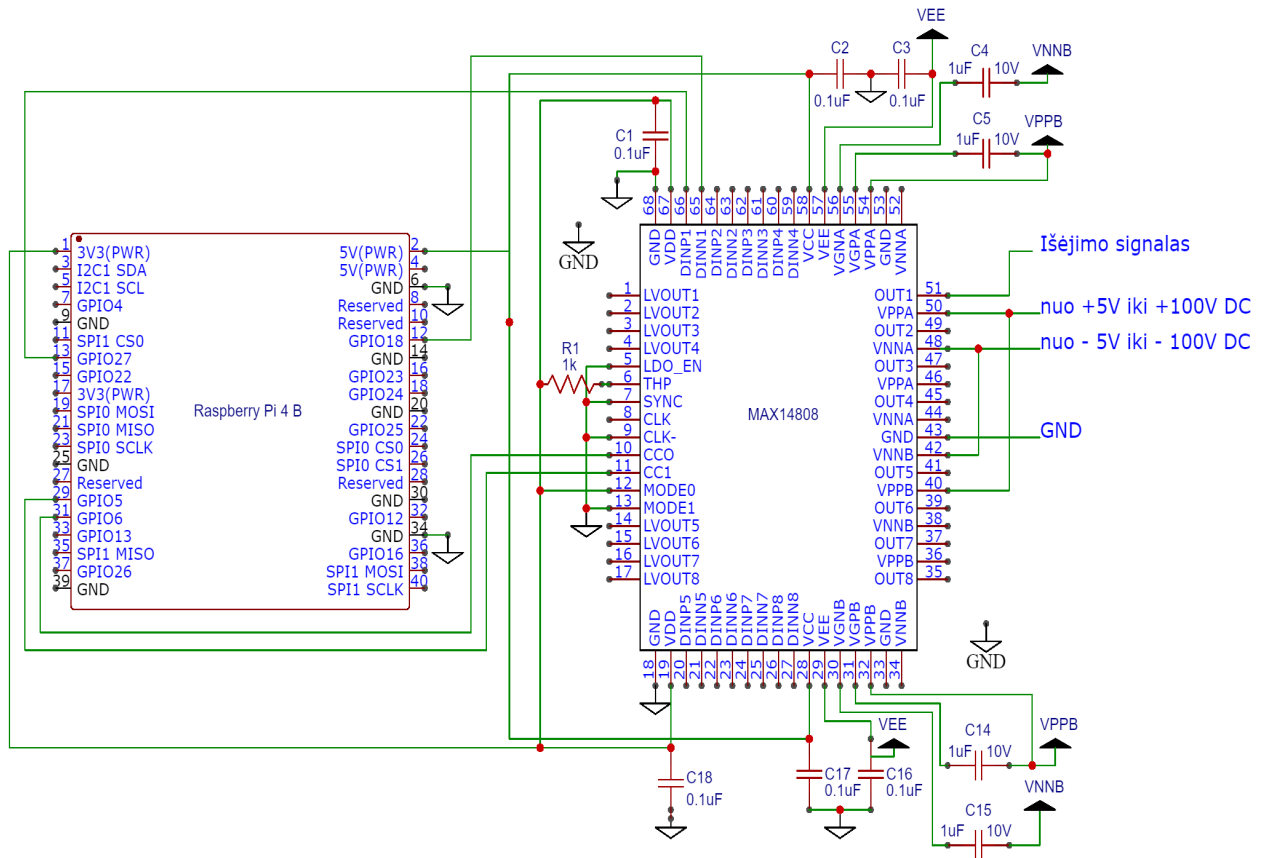
Įrenginyje yra galimybė pasirinkti maksimalią impulsinės srovės reikšmę. Du MAX14809 keitiklio valdymo įėjimai (CC0, CC1) kontroliuoja šią funkciją (žr. 4 lentelė).

4 lentelė. Darbinės srovės pasirinkimas

Įvestis		Pasirinkta srovė
CC0	CC1	
0	0	2 A
1	0	1,5 A
0	1	1 A
1	1	0,5 A

Valdymas vyksta per Raspberry Pi išvadus GPIO5 ir GPIO6 (žr. 1.16 pav.). Įtampos buvimą nustato loginis – 1, nesant įtampai – 0.

1.17 paveiksle pavaizduota MAX14809 keitiklio ir Raspberry Pi 4 B jungimo schema.



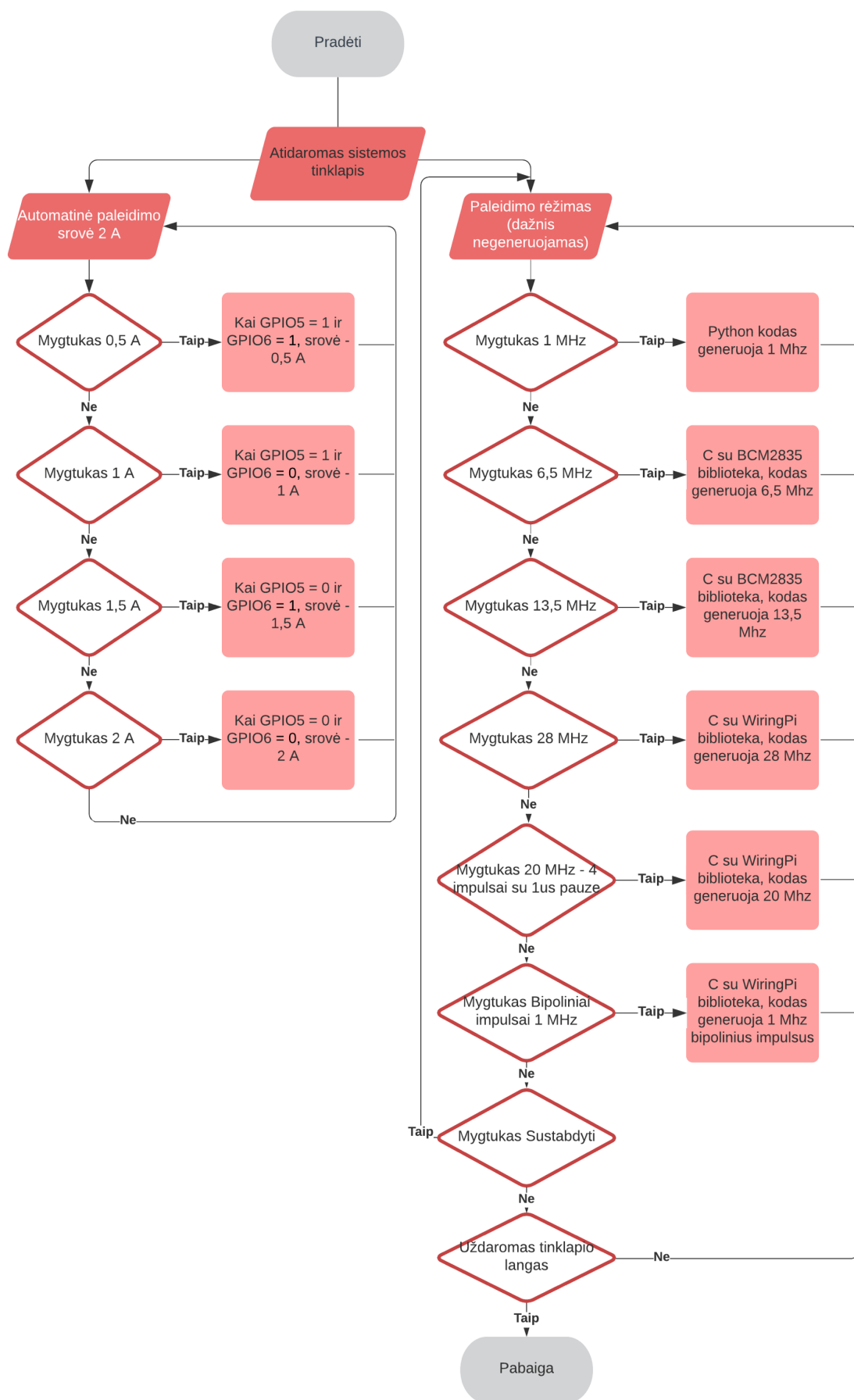
1.17 pav. MAX14809 ir Raspberry Pi 4 B jungimo schema

Visos programinės įrangos kūrimo veiklos (analizė, projektavimas, programavimas ir testavimas bei projekto ir kokybės valdymas) yra svarbios, siekiant efektyviai kurti kokybišką programinę įrangą. Projektų užbaigimas yra labai svarbus akcentas, kada įvertinami rezultatai ir klaidos.

Sukurta sistema leidžia vartotojui suprogramuoti reikalingus sistemos nustatymus. Sudaryto vartotojo interfeiso pagalba, atlikdamas programinius pakeitimus, vartotojas galės nustatyti tyrimams reikalingas impulsų sekas su užduotu dažniu ir pauzėmis.

Sistemos valdymas prasideda, kai atveriamas tinklapio langas ir suvedamas arba adresas <http://localhost/> naršyklėje, arba vidinis mini kompiuterio IP adresas. Sistemoje automatiškai generuojama 2 A keitiklio srovė, kadangi suprogramuota taip, kad paleidimo metu Raspberry Pi nepaduoūtų įtampos į patį keitiklį (žr. 4 lentelę). Atsivėrusiame lange mygtuko paspaudimu galima pasirinkti norimą generuojamą dažnį bei keitiklio srovę. Pasirinkus norimą dažnį ir paspaudus mygtuką *Paleisti* PHP kodas nukreipia į C / Python sugeneruotą skriptą, kur paleidžiamas dažnis į keitiklį MAX14808. Procesas vyksta tol, kol nepaspaudžiamas mygtukas *Sustabdyti* (žr. 1.17 pav.). Uždarius programos tinklapį automatiškai nutraukiamos visos vykdomos funkcijos.

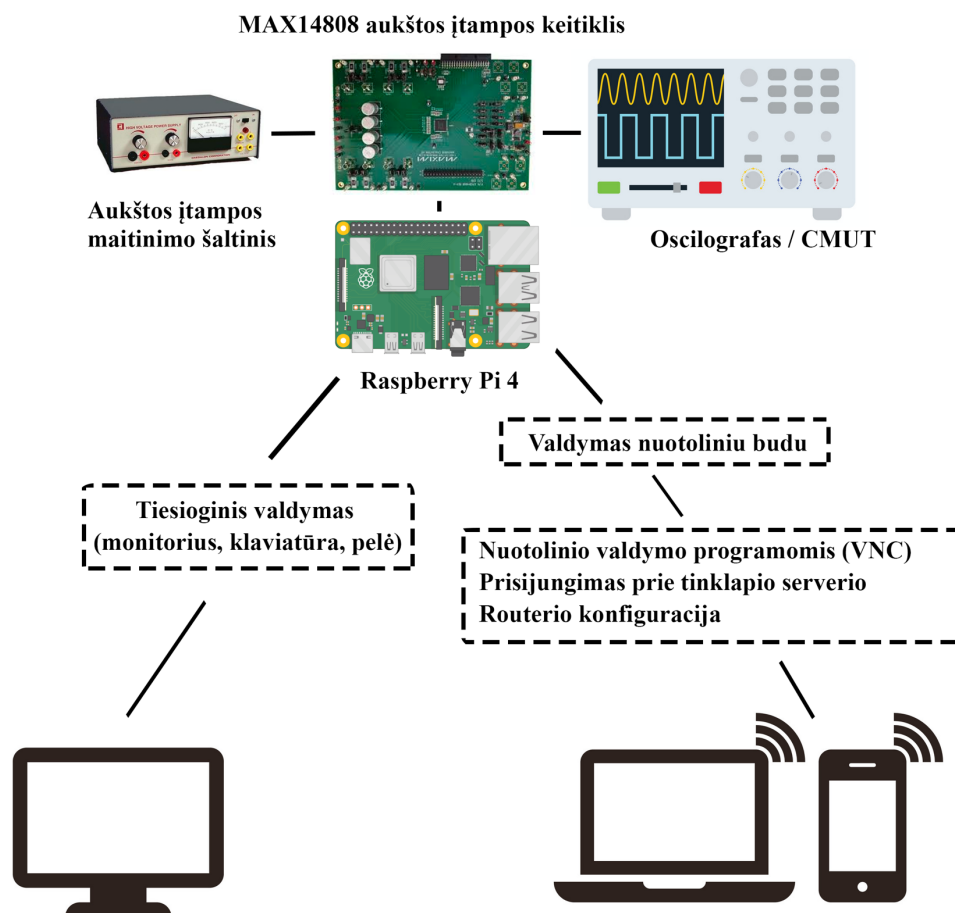




1.18 pav. Sistemos valdymo algoritmas

### 3.3. MAX14808 valdymo programa

Sukurtą programą galima valdyti keliais būdais (žr. 1.19 pav.).



1.19 pav. CMUT žadinimo sistemos valdymo galimybės.

Sukurtą sistemos programą galima valdyti keliais būdais. Prie sistemos galima prisijungti tiesiogiai. Tam reikalingas monitorius, klaviatūra ir pelė. Kitas būdas – valdyti sistemą nuotoliniu būdu su specialiomis nuotolinio valdymo programomis (VNC). Sistema, šiuo atveju, turi būti prijungta prie interneto. Pastarasis būdas leidžia prisijungti prie visos Raspberry Pi valdymo sistemos. Šiame tyrime naudojamas prisijungimas tik prie valdymo tinklapiu. Tai padaryti galima routeryje sukonfigūravus išorinį IP. Tokiu būdu galima prisijungti mobiliu telefonu iš bet kurios vietos, kur yra pasiekiamas internetas. Numatyta galimybė sukonfigūravus įrenginį kaip maršrutizatorių, prisijungti iš mobilusio įrenginio, suvedus naršyklėje vidinį IP adresą. Tokiu atveju interneto ryšys nereikalingas.

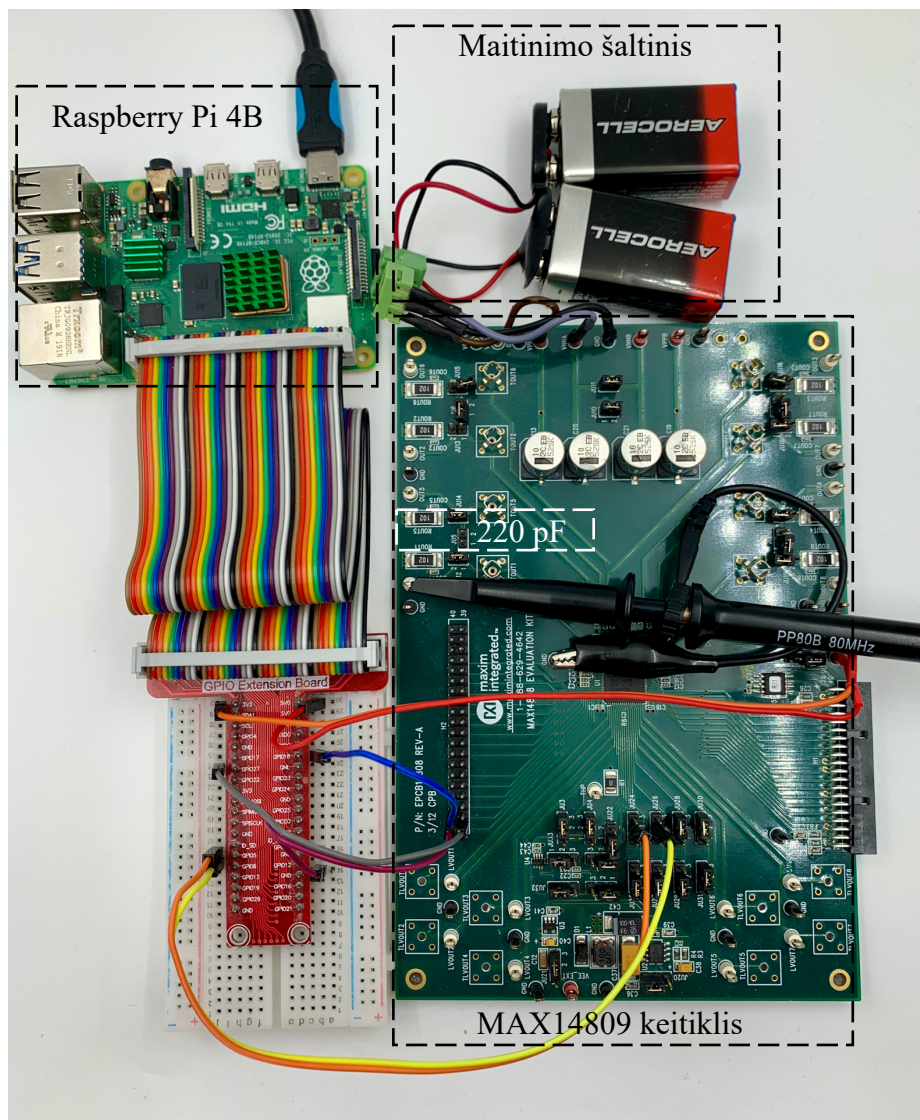
Sistemos valdymas sukurtas taip, kad būtų patogus vartotojui. Sistemos lankstumas leis vartotojui greičiau atlikti bandymus.

### 3.4. Eksperimentinis tyrimas

MAX14808 kanalo apkrova parinkta atsižvelgiant į [31] ir kitose publikacijose pateikiamus CMUT elementų masyvų testavimo rezultatus. Vienas iš pagrindinių parametrų, aprašančių CMUT elektrostatinio keitiklio veikimą, yra kolapso įtampa. Įvykus kolapsui membrana priglunda prie pagrindo paviršiaus. Aukštais dažniais toks CMUT keitiklių veikimas nėra naudojamas, nes tam, kad membrana atsitrauktų nuo pagrindo, reikia ne tik didelės amplitudės impulsinio signalo, bet ir stipriai

sumažinti prieštampį (histerezės efektas). Praktikoje dažniausiai naudojamas prieštampis, sudarantis 80% kolapso įtampos.

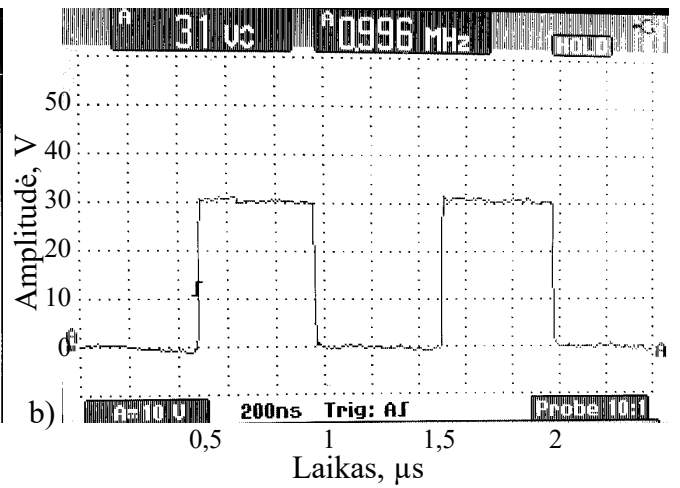
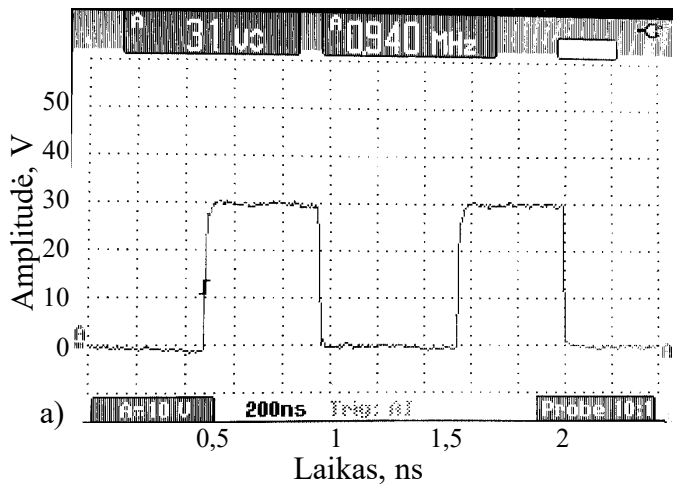
1.20 paveiksle pavaizduota MAX14809 ir Raspberry Pi 4B sistema, naudojama eksperimentui.



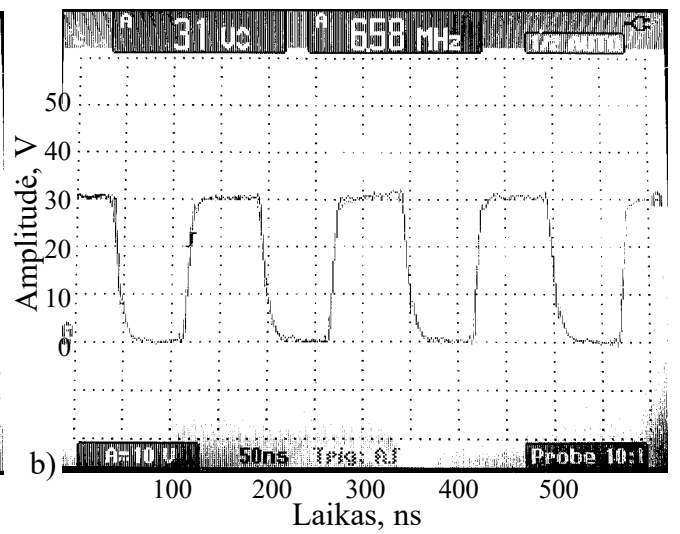
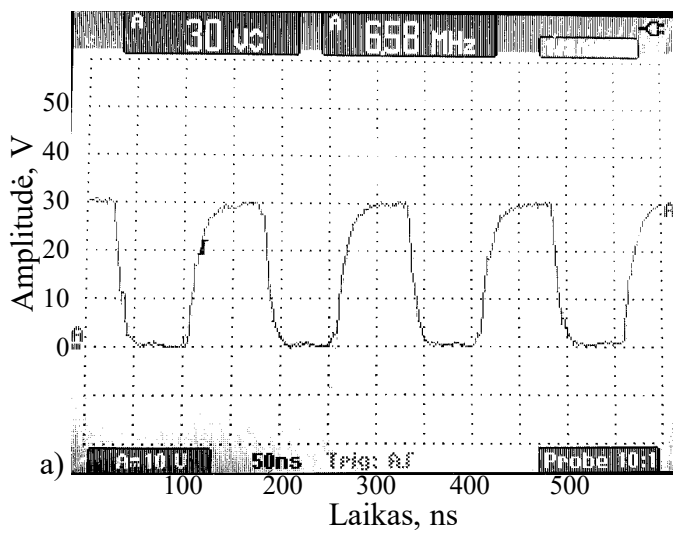
1.20 pav. MAX14809 ir Raspberry Pi 4B sistema

MAX14809 keitiklis bandymų metu buvo apkrautas 220 pF kondensatoriumi. Matavimo duomenų surinkimui buvo naudotas prie keitiklio išėjimo prijungtas osciloskopas.

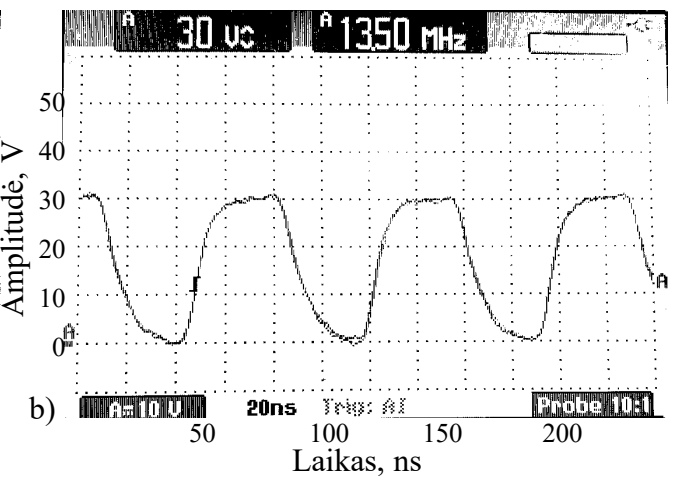
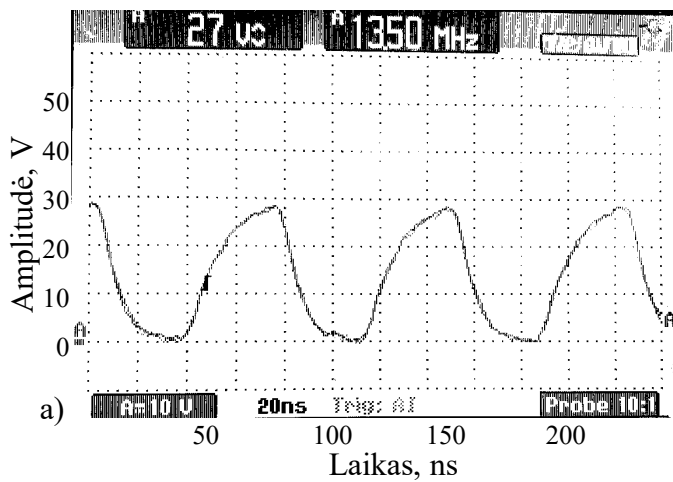
CMUT elementui su 1,5  $\mu\text{m}$  storio, silicio, 19,5  $\mu\text{m}$  spindulio disko formos membranomis, kurio vakuomo tarpelis 0,15  $\mu\text{m}$ , SiO<sub>2</sub> izoliacinis sluoksnis 0,3  $\mu\text{m}$ , kolapso įtampa yra apie 120V. Prieštampio reikšmė optimaliam CMUT darbo režimui sudaranti 80 % kolapso įtampos yra 96V. Keitiklio elemento, kurio matmenys 0,3 x 3 mm, sudaryto iš 360 lygiagrečiai sujungtų membranų, talpa keitikliui, dirbančiam aprašytu režimu, yra 60 pF. Ši reikšmė toliau buvo naudojama MAX14808 kanalo apkrovos įvertinimui. 1.21 – 1.24 pav. pateikta MAX14808 kanalo apkrauto 220 pF kondensatoriumi, veikiančiu (1 MHz, 6,5 MHz, 13,5 MHz, 28 MHz) dažniu, prie 30 V įtampos oscilogramos.



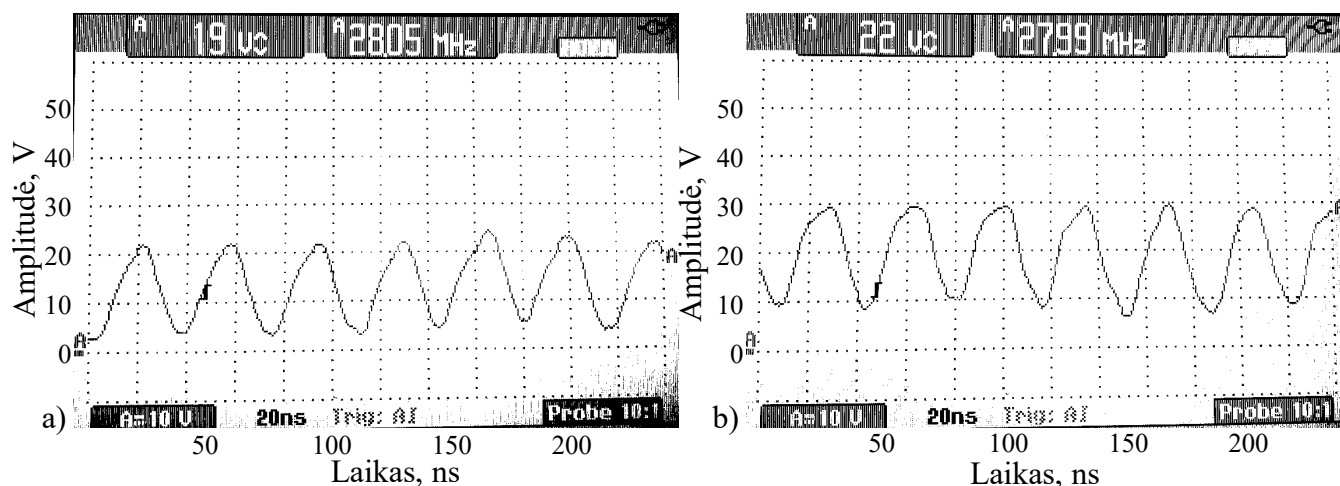
1.21 pav. MAX14808 kanalas apkrautas 220 pF kondensatoriumi (1 MHz, 30 V) kai: a) 0,5 A, b) 2 A



1.22 pav. MAX14808 kanalas apkrautas 220 pF kondensatoriumi (6,57 MHz, 30 V) kai: a) 0,5 A, b) 2 A

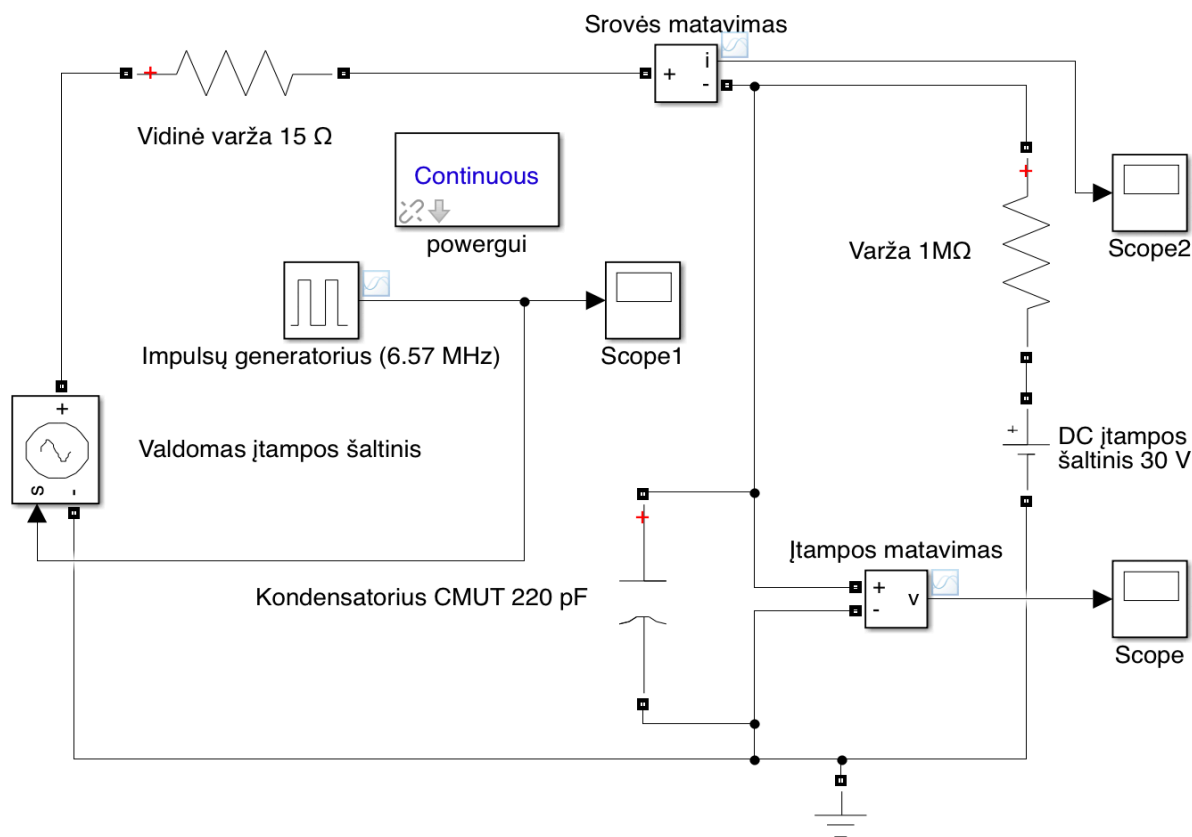


1.23 pav. MAX14808 kanalas apkrautas 220 pF kondensatoriumi (13,5 MHz, 30 V) kai: a) 0,5 A, b) 2 A



1.24 pav. MAX14808 kanalas apkrautas 220 pF kondensatoriumi (28 MHz, 30 V) kai: a) 0,5 A, b) 2 A

Norint įvertinti MAX14808 veikimą prie skirtingų apkrovų, atsižvelgiant į matavimų rezultatus ir IC technines specifikacijas MATLAB aplinkoje, sudarytas matematinis modelis (žr. 1.25 pav.).

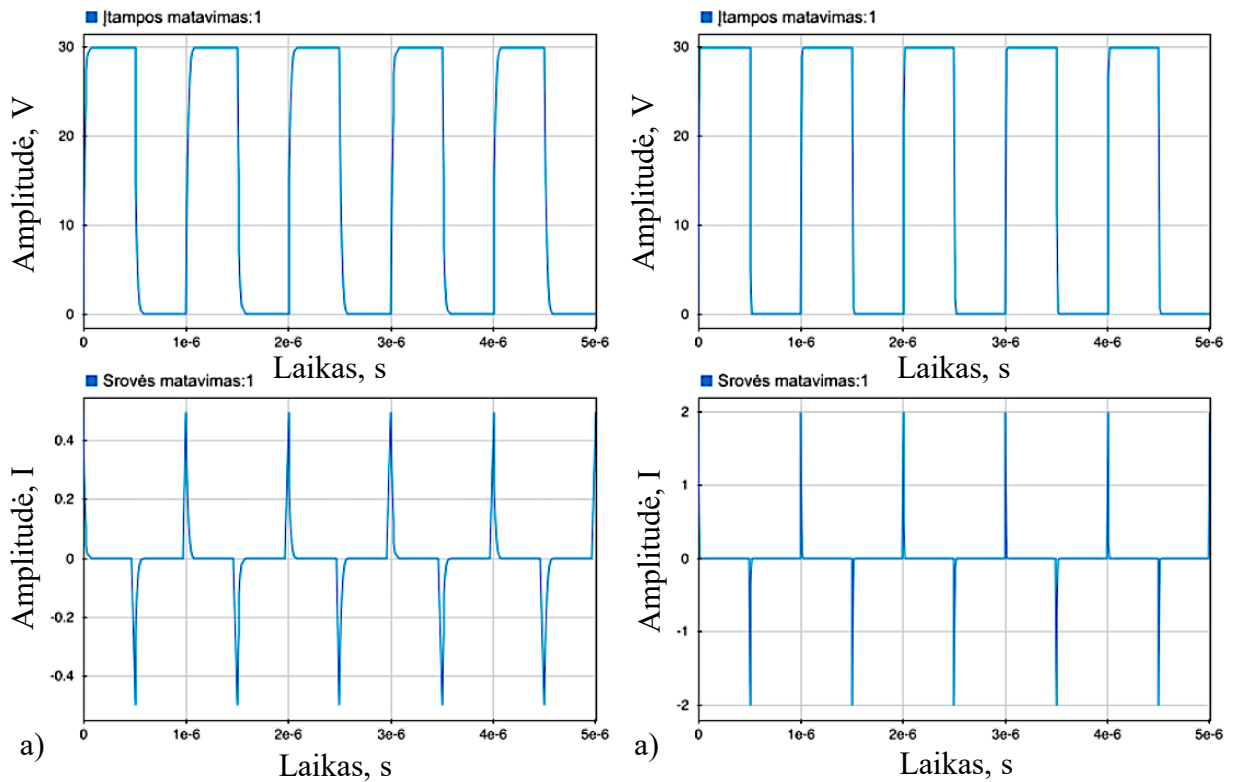


1.25 pav. Matlab / Simulink modelis

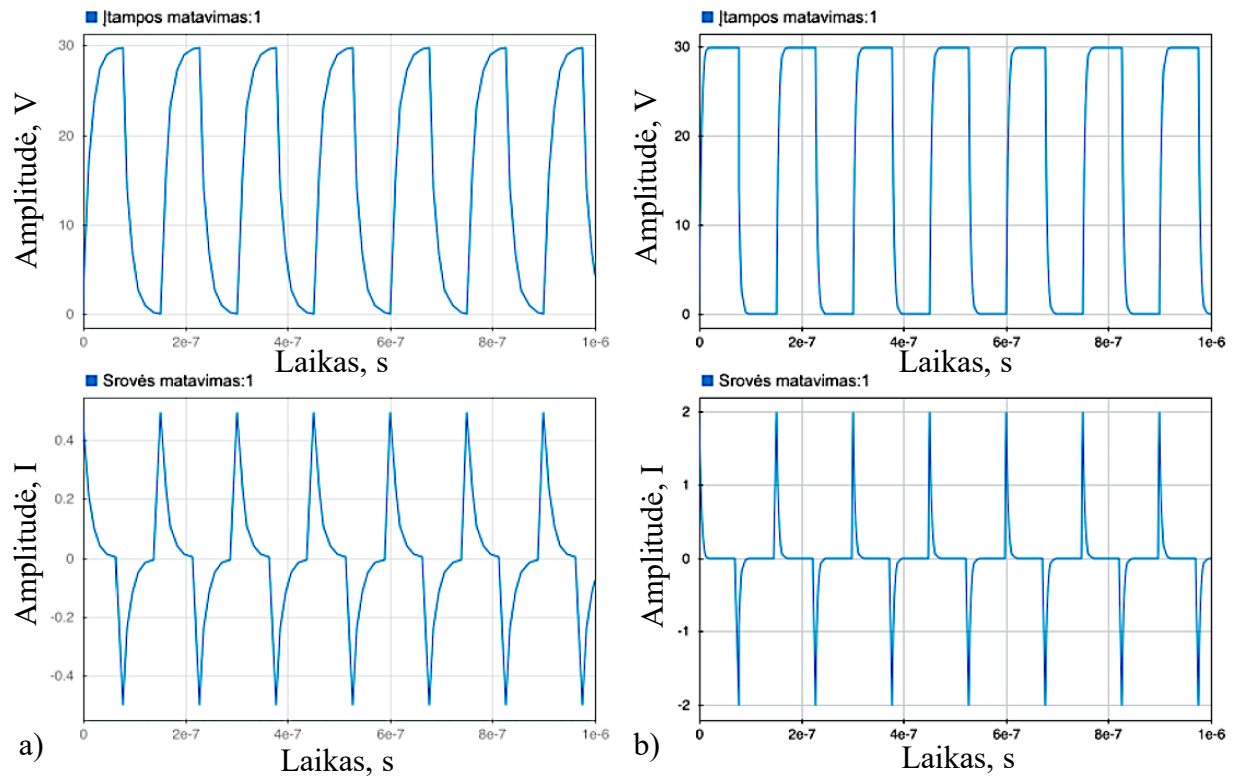
Simulink yra MATLAB pagrindu sukurta grafinio programavimo aplinka, skirta modeliuoti, imituoti ir analizuoti dinamines sistemas. Programos pagrindinė sąsaja su vartotoju yra grafinio blokų diagramų sudarymo įrankis ir tinkinamas blokų bibliotekų rinkinys.

Apkrovos įvertinimui buvo naudojami kondensatoriai, imituojantys CMUT keitiklius. Modelyje buvo naudojamos skirtingos apkrovos (kondensatoriais), keičiamas impulsų dažnis ir amplitudė. Modelio

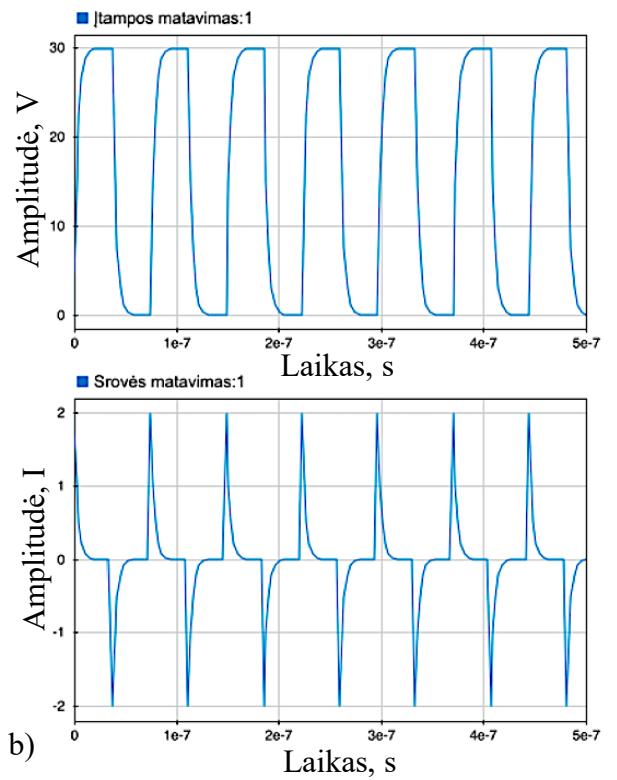
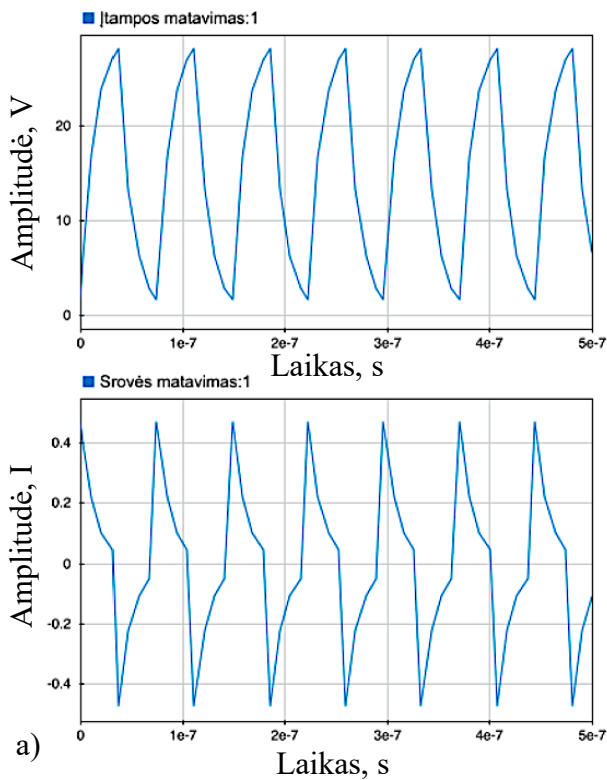
išėjime buvo stebimi impulso formos pokyčiai. Atliktas modeliavimo ir eksperimentinių tyrimų sulyginimas..



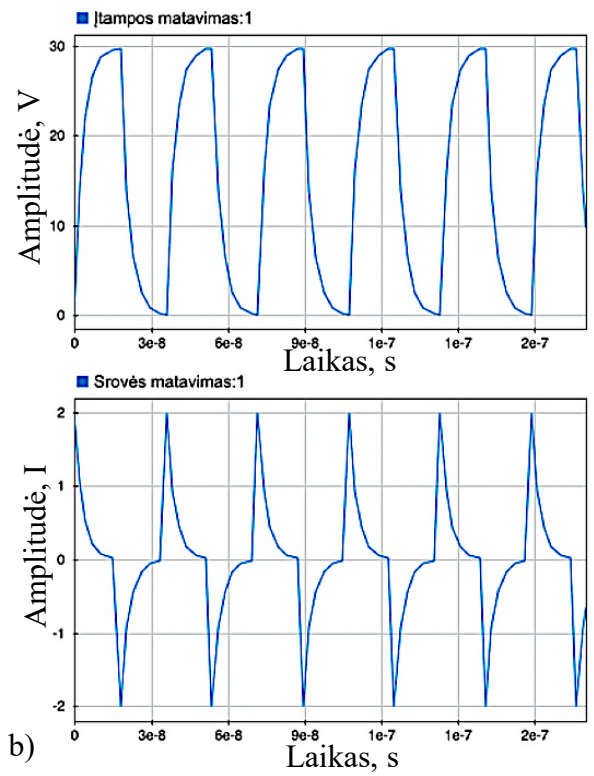
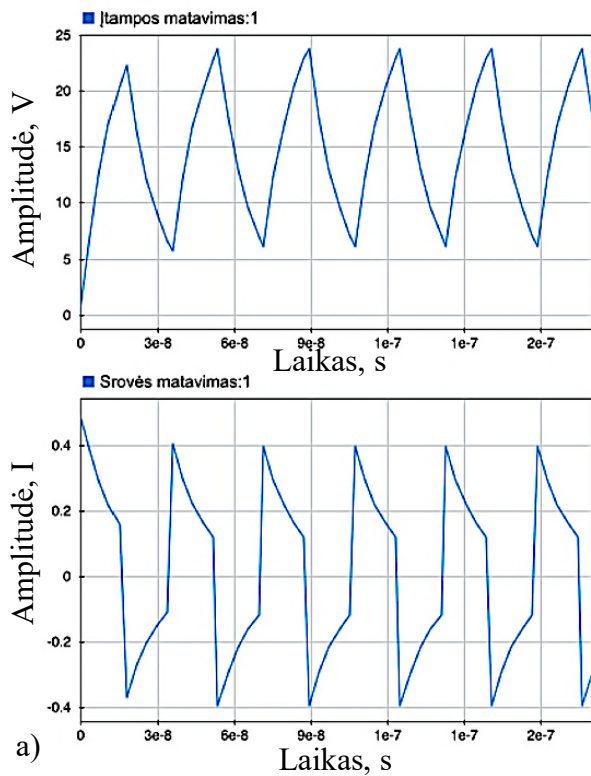
1.26 pav. MAX14808 kanalas apkrautas 220 pF kondensatoriumi (1 MHz, 30 V) kai: a) 0,5 A, b) 2 A



1.27 pav. MAX14808 kanalas apkrautas 220 pF kondensatoriumi (6,57 MHz, 30 V) kai: a) 0,5 A, b) 2 A



1.28 pav. MAX14808 kanalas apkrautas 220 pF kondensatoriumi (13,5 MHz, 30 V) kai: a) 0,5 A, b) 2 A



1.29 pav. MAX14808 kanalas apkrautas 220 pF kondensatoriumi (28 MHz, 30 V) kai: a) 0,5 A, b) 2 A

1.26 – 1.29 pav. pateiktus matematinio sistemos modeliavimo rezultatus lyginant su 1.20 – 1.23 pav. pateikiamais eksperimento rezultatais, matome, kad modelis tiksliai įvertina sistemos išėjimo signalo priklausomybę nuo apkrovos, dažnio amplitudės ir srovės ribojimo parinkimo.

Kad įvertinti ribinius sistemos parametrus, buvo atliktas laiko pastoviųjų skaičiavimas. Tam buvo keičiama vidinė šaltinio varža ir keitiklio talpa. Remiantis Omo dėsniumi, apskaičiuota maitinimo šaltinio vidinė varža, kai srovės ribojimas – 2 A, 1,5 A, 1 A, 0,5 A.

$$R = \frac{U}{I} \quad (1)$$

RC grandinės laiko pastoviąją, kuri nusako kondensatoriaus įkrovimo trukmę galima apskaičiuoti pagal lygtį:

$$\tau = RC = \frac{1}{2\pi f_c} \quad (2)$$

Laiko pastovioji  $\tau$  yra susijusi su ribiniu dažniu  $f_c$ :

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi\tau} \quad (3)$$

Čia: R – suminė, vidinė maitinimo šaltinio ir ekvivalentinė MAX14808 srovės ribojimo varža.  $f_c$  – ribinis dažnis.

**5 lentelė.** Skaičiavimo rezultatai kai C = 1 nF

U / V	I / A	R / $\Omega$	C / nF	$f_c$ / MHz	t / ns
30	0,5	60	1	2,65	60
	1	30	1	5,31	30
	1,5	20	1	7,96	20
	2	15	1	10,61	15

**6 lentelė.** Skaičiavimo rezultatai kai C = 2 nF

U / V	I / A	R / $\Omega$	C / nF	$f_c$ / MHz	t / ns
30	0,5	60	2	1,33	120
	1	30	2	2,65	60
	1,5	20	2	3,98	40
	2	15	2	5,31	30

**7 lentelė.** Skaičiavimo rezultatai kai C = 100 pF

U / V	I / A	R / $\Omega$	C / nF	$f_c$ / MHz	t / ns
30	0,5	60	0,1	26,53	6
	1	30	0,1	53,05	3
	1,5	20	0,1	79,58	2
	2	15	0,1	106,10	1,5

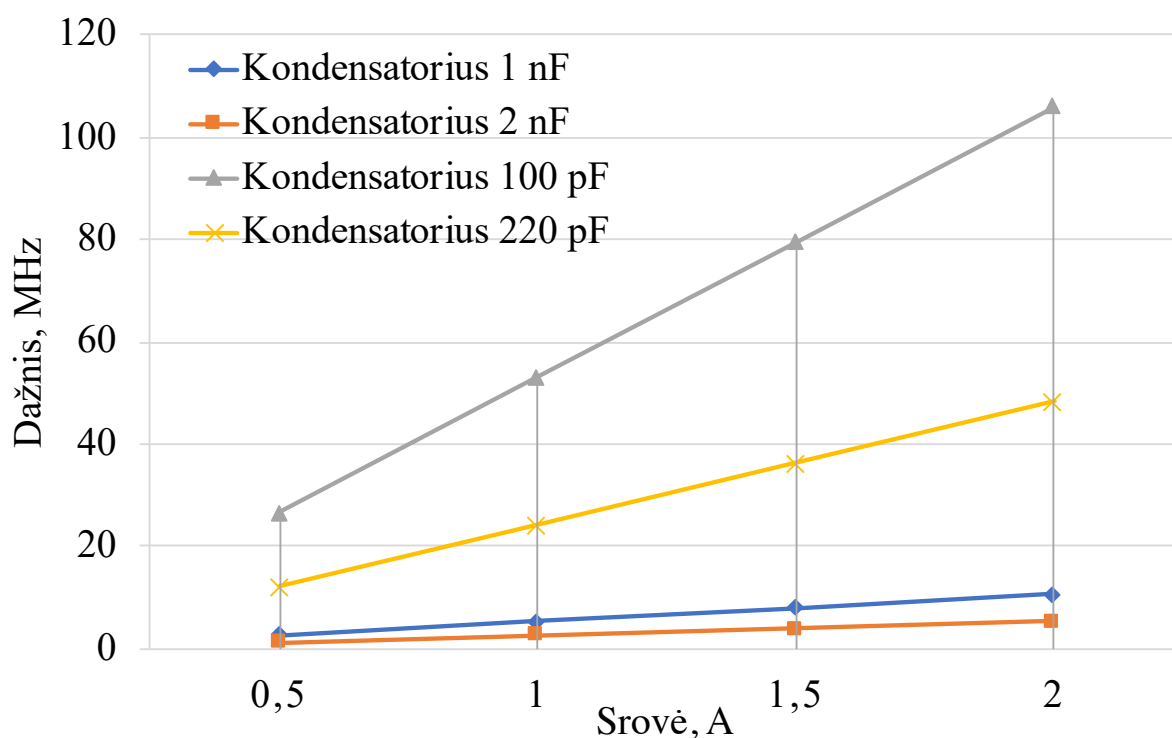


**8 lentelė.** Skaičiavimo rezultatai kai  $C = 220 \text{ pF}$

U / V	I / A	R / $\Omega$	C / nF	fc / MHz	t / ns
30	0,5	60	0,22	12,06	13,2
	1	30	0,22	24,11	6,6
	1,5	20	0,22	36,17	4,4
	2	15	0,22	48,23	3,3

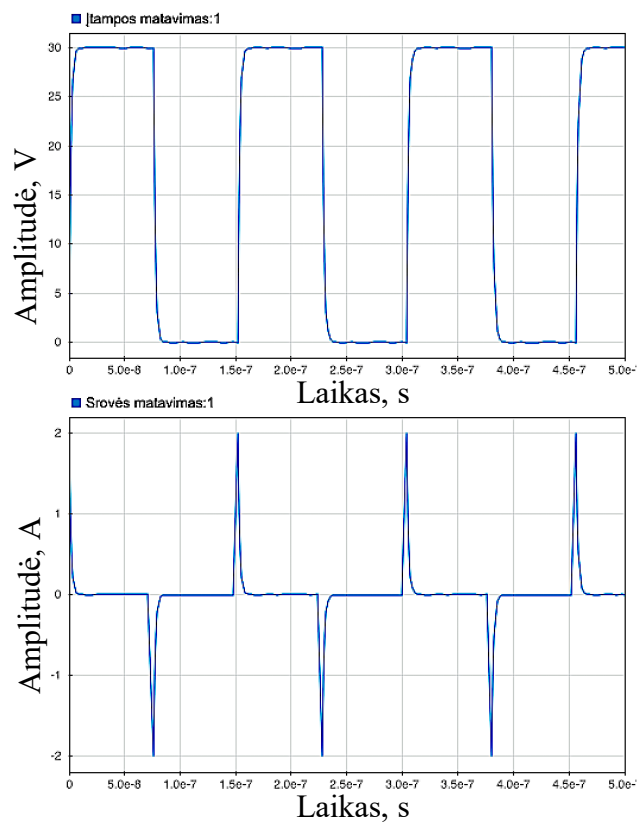
5 – 8 lentelėje pateikti ekvivalentinės keitiklio grandinės apkrautos kondensatoriais ( $C = 1 \text{ nF}$ ,  $C = 2 \text{ nF}$ ,  $220 \text{ pF}$ ,  $100 \text{ pF}$ ) ribinės varžos ir laiko pastoviosios skaičiavimai.

Rezultatai iliustruoti 1.30 paveiksle. Kaip matyti ribinis sistemos dažnis priklauso nuo keitiklyje išstatyto srovės ribojimo.

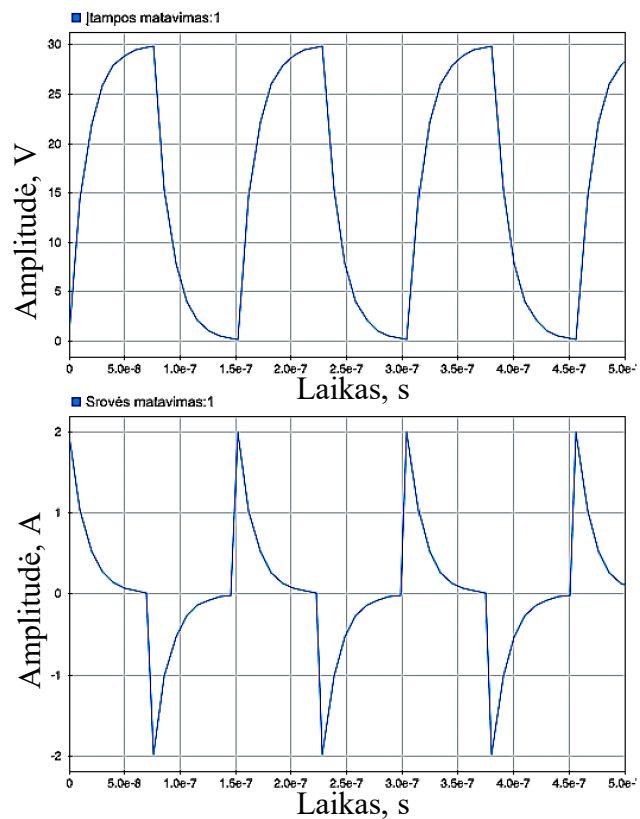


**1.30 pav.** Ribinio dažnio priklausomybė nuo srovės

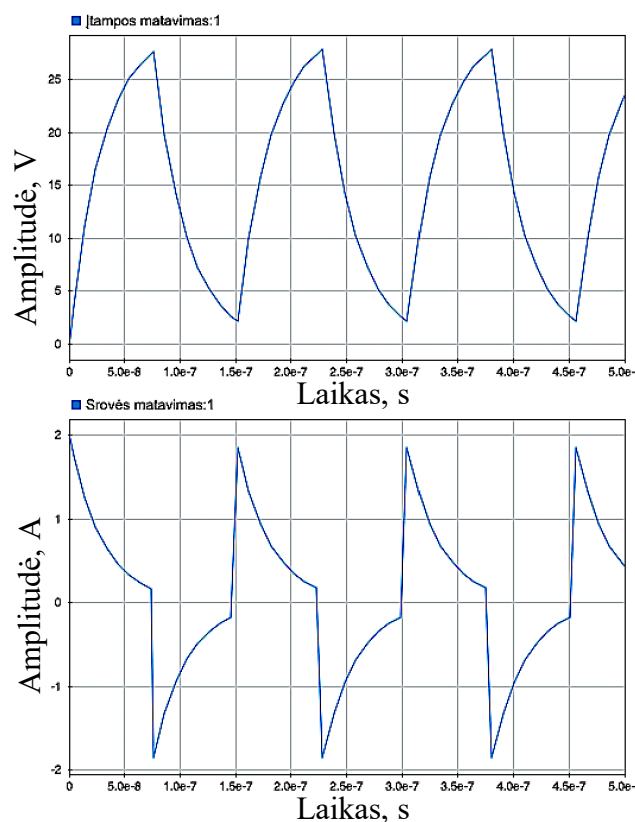
Modeliavimo rezultatai iliustruojantys impulso formos kitimą nuo talpuminės apkrovos pateikiami 1.31 – 1.33 pav. MAX14808 srovės ribojimas 2 A.



1.31 pav. Simulink modeliavimo rezultatai.  $f = 6,57 \text{ MHz}$ ,  $C = 0,1 \text{ nF}$



1.32 pav. Simulink modeliavimo rezultatai.  $f = 6,57 \text{ MHz}$ ,  $C = 1 \text{ nF}$



1.33 pav. Simulink modeliavimo rezultatai.  $f = 6,57 \text{ MHz}$ ,  $C = 2 \text{ nF}$

Naudojant 6,57 MHz impulsų dažnį ir 0,1 nF talpuminę apkrovą kondensatorius persikrauna, gaunami užduotos 30 V amplitudės impulsai (žr. 1.31 pav.), 1nF apkrova yra ribinė (žr. 1.32 pav.). Toliau didinant apkrovą, MAX14808 srovės 2 A ribojimas yra per didelis ir išėjime impulsų amplitudė mažėja (žr. 1.33 pav.). Srovė naudojama tik įtampos perjungimo momentu.

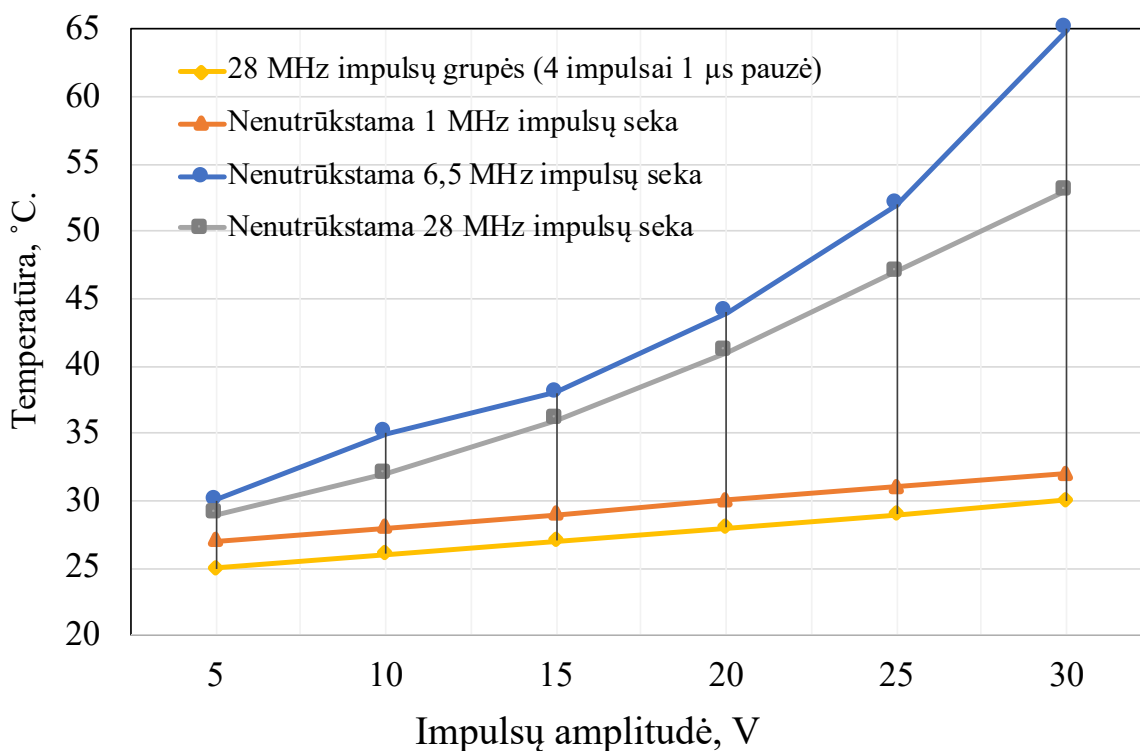
Atlikus Simulink modeliavimą, matome, kad pakankamai tiksliai atkartojama eksperimento metu gaunama impulsų forma. Impulsų forma ir amplitudė priklauso nuo apkrovos. Kad tinkamai veiktų žadinimo grandinė, reikalingas precizinis dažnio ir apkrovos parinkimas, atsižvelgiant į vidinę maitinimo šaltinio varžą.

### 3.5. Keitiklio temperatūros matavimas

Norint gauti gerą santykį signalas triukšmas ir pakankamą skiriamąją gebą, reikalingos aukštos įtampos ir didelio dažnio impulsų sekos, todėl žadinimo elektronikai ir keitikliams tenka didelė apkrova, sąlygojanti nepageidaujamus komponentų aukštos temperatūros darbo režimus. Situacija dar labiau komplikuojasi, kai norima gauti terapinius, pumpavimo ar panašius efektus ir yra reikalingas nepertraukiamas darbo režimas.

MAX14808 keitiklio duomenų lape nurodyta darbinės temperatūros diapazonas nuo  $-40 \text{ }^{\circ}\text{C}$  iki  $+85 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , o maksimalios temperatūros diapazonas  $-65 \text{ }^{\circ}\text{C}$  iki  $+150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Palaikoma įtampa nuo  $\pm 0,3\text{V}$  iki  $\pm 105 \text{ V}$  [24].

Tyrimas atliktas prie pasikartojančių impulsų sekų 1 MHz, 6,5 MHz, 28 MHz ir 28 MHz su 4 impulsų 1  $\mu\text{s}$  pauzės dažniu, didinant impulsų amplitudę nuo 5 iki 30V 5V intervalu. Temperatūra matuota bekontaktiu nuotoliniu termometru.



1.34 pav. MAX14808 keitiklio temperatūros priklausomybė nuo generuojamo dažnio ir įtampos

Kaip matyti iš 1.34 paveikslo, didėjant impulsų pasikartojimo dažniui ir amplitudei, MAX14808 temperatūra auga. Prie 6,5 MHz įtampos, gauta aukštesnė temperatūra negu naudojant 28 MHz dažnį. Šį efektą galima paaiškinti didesniais įtampos švytavimais perjungimų metu. Norint sumažinti švytavimų įtaką, reikėtų apkrovą papildyti elementais, slopinančiais rezonansinius reiškinius. Generuojant impulsų seką 28 MHz su 1 μs pauzė, temperatūra ženkliai sumažėja – 23 °C lyginant su nenutrūkstanta 28 MHz impulsų seka, pauzė tarp impulsų leidžia keitikliui atvėsti. Keitikliui viršijus darbinės temperatūros ribą 85 °C, gali padidėti klaidingo suveikimo tikimybė, o viršijus maksimalią leistiną 150 °C ribą, keitiklis gali būti sugadintas. Todėl eksploatuojant sistemą prie didelių dažnių ir amplitudžių reikėtų naudoti papildomus aušinimo ir apkrovos suderinimo elementus. Sistemai veikiant perdavimo – priėmimo režime (žr. 1.34 pav.), kada tarp žadinimo impulsų sekų reikalingos pauzės, temperatūriniai režimai kritinių reikšmių nepasiekia.

## Išvados

1. Mokslinės literatūros analizė parodė, kad CMUT veikimui tiek priimant, tiek perduodant signalus reikalinga aukšta ( $30 \div 100$  V) įtampa tarp membranos ir pagrindo. Tradiciniuose ultragarsiniuose skaneriuose naudojami dideli keitiklių masyvai ir programuojama loginė matrica (FPGA) paremti elektronikos grandynai. IDT ar SAW šukų tipo struktūrą turintiems keitikliams, siunčiamų signalų formavimui ir priimamų analizei, užtenka dviejų žadinimo ir dviejų priėmimo kanalų. Žadinimo grandinėms reikalingas priešįtampio (aukštos 100 ir daugiau voltų DC įtampos šaltinis) ir impulsinių signalų generatorius
2. Sukurta MAX14808 valdymo programa mini kompiuterio Raspberry Pi 4B pagrindu. Atlikti techninės įrangos bandymai parodė, kad tokia sistema tinkama  $2 \div 4$  kanalų talpinių mikromontuojamų ultragarso keitiklių žadinimo grandinių valdymui.
3. Atliktas realizuotos sistemos eksperimentinis tyrimas ir nustatyta, kad siekiant gauti reikiamos formos signalą prie aukštesnių dažnių maitinimo šaltinio ir ekvivalentinė MAX14808 srovės ribojimo, varža turi būti kuo mažesnė. Tikslinga, esant galimybei, išskaidyti apkrovą tarp atskirų kanalų. Kad žadinimo grandinė veiktų tinkamai, reikia mažinti dažnį arba mažinti šaltinio vidinę varžą.
4. Didėjant impulsų pasikartojimo dažniui ir amplitudei, MAX14808 temperatūra auga tiesiogiai proporcingai amplitudei ir dažniui. Naudojant ribinius (20 MHz ir didesnius) dažnius ir artimas 100 V impulsų amplitudes būtų reikalingi papildomi aušinimo elementai.

## Literatūros sąrašas

1. Afzal, A., Iqbal, N., Mujahid, A. & Schirhagl, R. (2013). Advanced vapor recognition materials for selective and fast responsive surface acoustic wave sensors: A review. *Analytica Chimica Acta*, 787, 36–49.
2. Arduino Uno duomenų lapas. [Žiūrėta 2020-01-10]. Prieiga per internetą: <https://www.arduino.cc/en/Guide/ArduinoUno>.
3. Ballantine, D. S., White, R. M., Martin, S. J., Ricco, A. J., Frye, G. C., Zellers, E. T. & Wholtjen, H. (1997). *Acoustic Wave Sensors: Theory, Design and Physico – Chemical Applications*. New York: Academic Press.
4. Bjørn, A. J. A. (1996). Waves, Signals and Signal Processing in Medical Ultrasonics. *Department of Physiology and Biomedical Engineering*.
5. Brenner, K., Ergun, A., Firouzi, K., Rasmussen, M., Stedman, Q. & Khuri – Yakub, B. (2019). Advances in Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers. *Micromachines*, 10 (2), 152.
6. Caliano, G., Matrone, G. & Savoia, A. S. (2017). Biasing of Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers. *Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 64 (2), 402–413.
7. Chen, Y., Emanetoglu, N. W., Saraf, G., Wu, P., Lu, Y., Parekh, A., Merai, V., Udovich, E., Lu, D., Lee, D.S., Armour, E.A. & Pophristic, M. (2005). Analysis of SAW properties in ZnO/Al/sub x/Ga/sub 1–x/N/cAl/sub 2/O/sub 3/structures. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, 52(7), 1161–1169.
8. Chen, K., Lee, H. S., Chandrakasan, A. P. & Sodini, C. G. (2013) Ultrasonic Imaging Transceiver Design for CMUT: A Three – Level 30 – Vpp Pulse – Shaping Pulser With Improved Efficiency and a Noise–Optimized Receiver. *IEEE Journal of Solid – State Circuits*, 48 (11), 2734–2745.
9. Da Costa, L. and Mendes, P. (2003). Capacitive micromachined ultrasonic transducers (cMUTs), *J. Aerosp. Eng.*, vol. 16, no. 2, pp. 76–84.
10. Daft, C., Wagner, P., Bymaster, B., Panda, S., Patel, K. & Ladabaum, I. (2005). CMUTs and electronics for 2D and 3D imaging: monolithic integration, in – handle chip sets and system implications. *In Ultrasonics Symposium*. The Netherlands: Rotterdam, 463–474.
11. Erikson, K. R, Fry, F. J., & Jones, J. P. (1974). Ultrasound in medicine – a review. *Sonics and Ultrasonics. IEEE Transactions on*, 21(3), 144–170.
12. Grout, I. (2008). *Digital Systems Design with FPGAs and CPLDs*. University of Limerick, Ireland, 217–331.
13. Haller, M. I. & Khuri – Yakub, B. T. (1994). A surface micromachined electrostatic ultrasonic air transducer. In *Ultrasonics Symposium. Proceedings*, 31 (2), 1241–1244.
14. Hongbin, Y., Liang, L. & Yuandong, A. G. (2016). Capacitive micromachined ultrasonic transducer (CMUT) based micro viscosity sensor. *Sensors Actuators*, 227, 346–351.
15. Hribsek, M. (2008). Surface acoustic wave devices in communications. *Scientific Technical Review*, 58 (2), 44–50.
16. I-Hsiang Chen, A., Wong, L. L. P., Na, S., Li, Z., Macecek, M. & Yeow, J. T. W. (2016). Fabrication of a Curved Row – Column Addressed Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer Array. *Journal of microelectromechanical systems*, 25 (4), 675–682.

17. Keenan C., Marcus Lloyd G. (2016). Analysis of Existing Designs for FPGA–Based Ultrasound Imaging Systems, *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition* Vol.9, No.7, 13–24.
18. Kim, G. D., Yoon, C., Kye, S. B., Lee, Y., Kang, J., Yoo, Y. and Song, T. K. (2012). A single FPGA – based portable ultrasound imaging system for point of care applications, *Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, IEEE Transactions on*, vol. 59, no. 7, 1386–1394.
19. Ladabaum, I., Jin, X., Soh, H. T., Atalar, A. & Khuri-Yakub, B. T. (1998). Surface micromachined capacitive ultrasonic transducers. *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 45(3), 678–690.
20. Leondes, C. T. (Ed.). (2006). *MEMS/NEMS techniques and applications*. Los Angeles: Springer.
21. Liang, L. L. & Yuandong, A. G. (2016). Capacitive micromachined ultrasonic transducer (CMUT) based micro viscosity sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 227, 346–351.
22. Maity, R., Maity, N. P., Srinivasa Rao, K., Guha, K. & Baishya, S. (2018). A new compact analytical model of nanoelectromechanical systems – based capacitive micromachined ultrasonic transducers for pulse echo imaging. *J. Comput. Electron.*, 17 (3), 1334–1342.
23. Manh, T., Hoff, L., Eggen, T., Johansen, T. F., Lanteri, F., Gelly, J. F. (2016). Dual Frequency Hybrid Ultrasonic Transducers – Design and Simulations. *IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), 18–21 September*, Tours, France.
24. MAX14808 duomenų lapas. [Žiūrėta 2020-01-10]. Prieiga per internetą: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX14808–MAX14809.pdf>.
25. Midtbø, K., Rønnekleiv, A., & Wang, D. T. (2006). Fabrication and characterization of CMUTs realized by wafer bonding. *In Ultrasonics Symposium*. Canada: Vancouver, 938–941.
26. Munir, J., Ain, Q. & Lee, H. J. (2018). Reliability issue related to dielectric charging in capacitive micromachined ultrasonic transducers: A review. *Microelectronics Reliability*, 155–167.
27. Muhammed Sabri Salim, M. F. Abd Malek, R. B. W.Heng, K. M. Juni, Naseer Sabri. (2012). Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers: Technology and Applicati, *Journal of Medical Ultrasound*, Volume 20, 8–31.
28. Neudeck, G. W. & Pierret, F. R. (Eds.). (2002). *Introduction to Microelectronic Fabrication*. New Jersey: Prentice Hall.
29. Roohi, E. (2014). *Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics*. Los Angeles: Springer.
30. Salazar, J, Turo, A., Chavez, J. A., Ortega, J. A. & Garcia, M. J. (2002). High – power high – resolution pulser for air–coupled ultrasonic NDE applications. *Proceedings of the 18th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Rediscovering Measurement in the Age of Informatics*, 07 August, Budapest, Hungary.
31. Sapeliauskas, E., Barauskas, D., Vanagas, G., Pelenis, D., Viržonis, D. (2016). Design, Fabrication and Testing of Surface Micromachined CMUTs for Surface and Interface Waves. *Elektronika ir Elektrotechnika*, 22, 69–73.
32. Soh, H. T., Ladabaum, I., Atalar, A., Quate, C. F. & Khuri-Yakub, B. T. (1996). Silicon micromachined ultrasonic immersion transducers. *Applied Physics Letters*, 69 (24), 3674–3676.
33. Svilainis, L., Chaziachmetovas, A. ir Dumbrava, V. (2015). Half bridge topology 500 V pulser for ultrasonic transducer excitation. *Ultrasonics*, 59, 79–85.
34. Tsakalakis, M. and Bourbakis, N. A Wearable Ultrasound Multi–Transducer Array System for Abdominal Organs Monitoring. *Paper presented at the Bioinformatics and Bioengineering (BIBE), 2013 IEEE 13th International Conference on*, (2013), November 10–13.

35. Voiculescu, I. & Nordin, A. N. (2012). Acoustic wave based MEMS devices for biosensing applications. *Biosensors & Bioelectronics*, 33 (1), 1–9 [Žiūrėta 2019-05-02]. Prieiga per internetą: <http://dx.doi.org/10.1016/j.bios.2011.12.041>
36. White, R. M. & Voltmer, F. W. (1965). Direct piezoelectric coupling to surface elastic waves. *Applied Physics Letters*, 7 (12), 314–316.



## Priedai

### 1 priedas. PHP valdymo kodas

```
<html>
<head>
<link rel="stylesheet" type="text/css" href="sstyle.css">
<?php
if (isset($_POST['204PINON']))
{
exec('sudo /var/www/valdymas/20mhz4');
}
if (isset($_POST['4PINON']))
{
exec('sudo /var/www/valdymas/6mhz');
}
if (isset($_POST['13PINON']))
{
exec('sudo /var/www/valdymas/13mhz');
}
if (isset($_POST['17PINON']))
{
exec('sudo /var/www/valdymas/20mhz');
}
if (isset($_POST['27PINON']))
{
exec('sudo python /var/www/valdymas/1mhz.py');
}
if (isset($_POST['PINOFF']))
{
exec('sudo killall python');
exec('sudo killall /var/www/valdymas/20mhz');
exec('sudo killall /var/www/valdymas/6mhz');
exec('sudo killall /var/www/valdymas/13mhz');
exec('sudo killall /var/www/valdymas/20mhz4');
}
if (isset($_POST['56PINOFF']))
{
exec('sudo python /var/www/valdymas/old/pin5_off.py');
exec('sudo python /var/www/valdymas/old/pin6_off.py');
}
if (isset($_POST['5PINON']))
{
exec('sudo python /var/www/valdymas/old/pin6_off.py');
exec('sudo python /var/www/valdymas/old/pin5_on.py');
}
if (isset($_POST['6PINON']))
{
exec('sudo python /var/www/valdymas/old/pin5_off.py');
exec('sudo python /var/www/valdymas/old/pin6_on.py');
}
if (isset($_POST['56PINON']))
{
```

```

exec('sudo python /var/www/valdymas/old/pin5_on.py');
exec('sudo python /var/www/valdymas/old/pin6_on.py');
}
?>
<title>CMUT</title>
</head>
<body>

<div class="content">
  <h2>Talpiųjų ultragarso keitiklių žadinimo grandinių tyrimas</h2>
  <p>Kauno technologijos universitetas / Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas</p>
</div>
<form method="post">
  <table>
    <tbody>
      <tr>
        <td><b>Išėjimo dažnis</b></td>
        <td><button class="buttonstop" name="PINOFF">SUSTABDYTI</button></td>
      </tr>
      <tr>
        <td><center>1 MHz (Python)</center></td>
        <td><button class="button" name="27PINON">PALEISTI</button></td>
        <td></td>
      </tr>
      <tr>
        <td><center>6.5 MHz (BCM2835)</center></td>
        <td><button class="button" name="4PINON">PALEISTI</button></td>
        <td></td>
      </tr>
      <tr>
        <td><center>13.6 MHz (C)</center></td>
        <td><button class="button" name="13PINON">PALEISTI</button></td>
        <td></td>
      </tr>
      <tr>
        <td><center>28 MHz (WiringPi)</center></td>
        <td><button class="button" name="17PINON">PALEISTI</button></td>
        <td></td>
      </tr>
      <tr>
        <td><center>20 MHz / 4 impulsai su pauze 1us</center></td>
        <td><button class="button" name="204PINON">PALEISTI</button></td>
        <td></td>
      </tr>
      <tr>
        <td><center>Bipoliniai impulsai 1 MHz</center></td>
        <td><button class="button" name="27PINON">PALEISTI</button></td>
        <td></td>
      </tr>
      <tr>
        <td><b>Išėjimo srovė</b></td>
      </tr>
    </tbody>
  </table>

```

```

<tr>
  <td><button class="buttona" name="56PINOFF">2 A</button>
  <button class="buttona" name="5PINON">1.5 A</button><br>
  <button class="buttona" name="6PINON">1 A</button>
  <button class="buttona active" name="56PINON">0.5 A</button></td>
</tr>
</tbody>
</table>
</form>
<div class="footer">
  <p>2020 m. Studentas Marius Palikevičius, PME - 8</p>
</div>
</body>
</html>

```

-----1mhz.py-----

```

#!/usr/bin/python

import RPi.GPIO as GPIO
from time import sleep

GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GPIO.setup(18,GPIO.OUT)

while True:
    GPIO.output(18, True)
    GPIO.output(18, False)

```

-----6mhz.c-----

```

#include <bcm2835.h>
#include <stdio.h>
#define PIN RPI_GPIO_P1_12
int main(int argc, char **argv)
{
    if (!bcm2835_init())
        return 1;
    bcm2835_gpio_fsel(PIN, BCM2835_GPIO_FSEL_OUTP);
    while (1)
    {
        bcm2835_gpio_write(PIN, HIGH);
        bcm2835_gpio_write(PIN, LOW);
    }
    bcm2835_close();
    return 0;
}

```

-----13mhz.c-----

```

#include <wiringPi.h>
#include <stdio.h>

```

```

#include <stdlib.h>
#include <stdint.h>
int main (void)

{
if (wiringPiSetupGpio() == -1)
    exit (1) ;

pinMode(18,PWM_OUTPUT);
pwmSetClock(2);
pwmSetRange (10) ;
pwmWrite (18,5);

for (;;) ;
}

```

```

-----20mhz.c -----
#include <wiringPi.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <stdint.h>

int main() {
if (wiringPiSetup () == -1)
    exit (1) ;

pinMode(1, OUTPUT);

while(1) {
    digitalWrite(1, 0);
    digitalWrite(1, 1);
}
return 0 ;
}

```

```

-----20mhz4.c -----

#include <wiringPi.h>
int main(int argc, char *argv[])
{
wiringPiSetup();
const int pinNumber = 1;

pinMode(pinNumber, OUTPUT);

for (;;)
{
digitalWrite(pinNumber, HIGH);
digitalWrite(pinNumber, LOW);
digitalWrite(pinNumber, HIGH);
digitalWrite(pinNumber, LOW);
digitalWrite(pinNumber, HIGH);
}
}

```

```
digitalWrite(pinNumber, LOW);  
digitalWrite(pinNumber, HIGH);  
digitalWrite(pinNumber, LOW);  
    delayMicroseconds (1); //1 mikrosekunde  
}  
return 0;  
}
```