



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS**

Marius Simėnas

**TALPINIŲ KEITIKLIŲ PRITAIKYMO PAVIRŠINIŲ
AKUSTINIŲ BANGŲ FILTRAMS TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Lekt. dr. Gailius Vanagas

PANEVĖŽYS, 2015

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(parašas) Doc. Arūnas Tautkus

(data)

TALPINIŲ KEITIKLIŲ PRITAIKYMO PAVIRŠINIŲ
AKUSTINIŲ BANGŲ FILTRAMS TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas

Valdymo technologijos (kodas 621H66001)

Vadovas

(parašas) Lekt. dr. Gailius Vanagas

(data)

Recenzentas

(parašas)

(data)

Projektą atliko

(parašas) Marius Simėnas

(data)

PANEVĖŽYS, 2015



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS

(Fakultetas)

MARIUS SIMĖNAS

(Studento vardas, pavardė)

VALDYMO TECHNOLOGIJOS (KODAS 621H66001)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Talpinių keitiklių pritaikymo paviršinių akustinių bangų filtrams tyrimas“
AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 m. d.

Panevėžys

Patvirtinu, kad mano **Mariaus Simėno** baigiamasis projektas tema „Talpinių keitiklių pritaikymo paviršinių akustinių bangų filtrams tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

2015-02-02

BAIGIAMOJO PROJEKTO UŽDUOTIS

Išduota studentui: Mariui Simėnui Grupė PME-3

1. Darbo tema:

Lietuvių kalba: Talpinių keitiklių pritaikymo paviršinių akustinių bangų filtrams tyrimas

Anglų kalba: Studyoftheapplicabilityofcapacitvetransducersforsurfaceacousticwavefilters

Patvirtinta 2015 m. vasario mėn. 13 d. dekanu potvarkiu Nr.ST17-F-13-11;

2. Darbo tikslas:

Parinkti ir išanalizuoti žemo triukšmingumo stiprintuvą, pritaikytą signalų priėmimui paviršinių akustinių bangų įtaisuose, realizuotuose talpinių ultragarsinių keitiklių pagrindu. Išanalizuoti galimybes, praplėsti stiprintuvo dažnių juostą, nekeičiant elementinės bazės, bei pritaikyti darbui su skirtingų dažnių keitikliais.

3. Reikalavimai ir sąlygos:

Stiprintuvas turi būti žemo triukšmingo, pritaikytas darbui su talpiniais ultragarsiniais keitikliais veikiančiais paviršinių akustinių bangų prietaisuose. Išanalizuoti dviejų kanalų signalo stiprinimo galimybę.

4. Projekto struktūra.

1. Literatūros apžvalga ir analizė

Atlikti literatūros susijusios su paviršinėmis akustinėmis bangomis, MEMS, CMUT konstravimu ir pritaikymu apžvalgą. Susipažinti su virpesių fazės pasukimo būdais, bei jų pritaikymo galimybėmis dviejų kanalų sistemose.

2. Metodika.

Sudaryti paviršinių akustinių bangų stiprintuvo testavimo ir modeliavimo metodiką. Pasirinkti prietaisus testavimui.

3. Modeliavimas ir tyrimai.

Atlikti paviršinių ultragarsinių bangų stiprintuvo testavimą ir parametrų modeliavimą. Palyginti kelių stiprintuvų konstrukcijų parametrus. Apskaičiuoti ir išmatuoti amplitudines dažnines charakteristikas, santykį signalas/triukšmas. Atlikti dviejų kanalų stiprintuvo su vieno kanalo fazės pasukimu parametrų tyrimą.

Parengti išvadas.

5. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo projekto dalis.

6. Projekto pateikimo gynimui kvalifikacinėje komisijoje terminas

Užduotį gavau: Marius Simėnas

(data)
2015-02-02

Vadovas: Gailius Vanagas

2015-02-02

Simėnas M. Talpinių keitiklių pritaikymo paviršinių akustinių bangų filtrams tyrimas / Vadovas Lec. Dr. G. Vanagas; Kauno technologijos universitetas, Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas, Technologijų katedra.

Panevėžys, 2015. - 49p.

SANTRAUKA

Darbo tikslas — išanalizuoti talpinius ultragarsinius keitiklius dirbančius paviršinių akustinių bangų filtrų principu. Šių keitiklių sistemas bei pritaikymo sritis. Parinkti ir išanalizuoti žemo triukšmingumo stiprintuvą, pritaikytą signalų priėmimui paviršinių akustinių bangų įtaisuose. Išanalizuoti galimybes, praplėsti stiprintuvo dažnių juostą, pritaikant darbui su skirtingų dažnių keitikliais.

Darbo uždaviniai — sumodeliuoti vieno ir dviejų kanalų žemo triukšmingumo stiprintuvus, skirtus darbui su talpiniais ultragarsiniais keitikliai dirbančiais kaip paviršinių akustinių bangų filtrai. Išanalizuoti sumodeliuotų sistemų charakteristikas bei pateikti grafikus.

Darbo rezultatai — Sumodeliuotas ir išanalizuotas vieno kanalo žemo triukšmingumo stiprintuvas ir palygintas su realiu stiprintuvu. Sumodeliuotas ir išanalizuotas dviejų kanalų stiprintuvas dviem atvejais: su rankiniu fazės postūmiu ir su automatiniu fazės postūmiu.

Simėnas / **M.**
Capacitive transducer applications of surface acoustic wave filters investigation /
supervisor/lector **Dr. G. Vanagas; Kaunas University of Technology,**
Panevezys Faculty of Technology and Business, Technology Department.
Panevezys, 2015. – 49p.

SUMMARY

The aim - to analyze capacitive ultrasonic transducers, working as surface acoustic wave filter. Analyze systems and application areas of transducer. Analyze low-noise amplifier adapted for signal reception of surface acoustic wave devices. Analyze opportunities to expand the amplifier frequency band, adapting for work with a converters, working at different frequency.

The goals - simulated one and two-channel low-noise amplifiers, designed to work with capacitive ultrasonic transducers, working as surface acoustic wave filters. Analyze the characteristics of model systems and show graphics.

The results - modeled and analyzed single-channel low-noise amplifier and compared with the real amplifier. Modeled and analyzed two-channel amplifier in two cases: the manual phase shift and automatic phase shift.

TURINYS

Santrauka	5
SUMMARY	6
Turinys.....	7
Įvadas.....	9
1. talpinių Ultragarsinių keitiklių ir jų taikymo sričių apžvalga	11
1.1.1 Talpiniai ultragarsiniai keitikliai (CMUT)	11
1.2 Paviršinės akustinės bangos.....	14
1.3 Filtrai CMUT keitiklių pagrindu.....	15
1.3.1 CMUT filtro konstrukcija.....	15
1.3.2 Dujų jutiklio veikimo principas.....	16
1.3.3 Išeinantį dažnį stebinti grandinė.....	16
1.3.4 Fazės poslinkio stebėjimo grandinė.....	18
2. DARBO Metodika.....	20
2.1.1 Tiriamajame darbe naudotas CMUT paviršinių akustinių bangų keitiklis.....	22
3. Modeliavimo ir tyrimo rezultatai	23
3.1 Diskretinių elementų stiprintuvo analizė	23
3.2 Mažo triukšmingumo stiprintuvo ADA4898 mikroschemos pagrindu modeliavimas ir tyrimas	24
3.2.1 Modeliuojama sistema.....	24
3.2.2 Stiprintuvo amplitudinės dažninės charakteristikos modeliavimas.....	25
3.2.3 Dažnių pralaidumo juostos išplėtimo galimybių tyrimas.....	26
3.2.4 Stiprintuvo stabilumas	27
3.2.5 Eksperimentinis stiprintuvo ADA4898 tyrimas	27
3.3 Dviejų kanalų stiprintuvo modeliavimas	29
3.3.1 Dviejų kanalų stiprintuvo schemos veikimo principas.....	30
3.3.2 Fazės kampo postūmio skaičiavimas ir sistemos modeliavimas.....	30
3.4 Dviejų kanalų stiprintuvas su automatiniu fazės postūmiu	32
3.4.1 Pastovaus dažnio sistemos.....	32
3.4.2 Kintančio dažnio sistemos	33
3.4.3 Automatinio fazės postūmio pritaikymas dviejų kanalų stiprintuvui.....	34
3.4.4 Dviejų kanalų stiprintuvo su automatiniu fazės postūmiu modeliavimas.....	35
3.5 Dviejų kanalų stiprintuvo su automatiniu fazės postūmiu valdymas	36
3.5.1 Sistemos modelis	36

3.5.2	Valdymo sistemos darbas	37
3.5.3	Mikrovaldiklio valdymo algoritmai	37
	Išvados	39
	Literatūros sąrašas	40
	Priedai	42
	1 priedas	42
	2 priedas	44
	3 priedas	48
	4 priedas	49

IVADAS

Pastaraisiais dešimtmečiais pastebima stipri mikro irnanoelektromechaninių kontrolės, informatikos ir energetikos prietaisų gamybos ir jų naudojimo sričių plėtra. Mikroelektromechaninės sistemos gali būti naudojami tokiose srityse, kaip medicina, įvairių fizikinių reiškinių jutikliai, skysčių ir dujų analizės prietaisai ir panašiai.

Klasikinius pjezoelektrinius ultragarsinius keitiklius, keičia silicio technologijos pagrindu gaminami talpiniai ultragarsiniai keitikliai CMUT (CapacitiveMicromachinedUltrasoundTransducers – angl.). Dėl talpinių ultragarsinių keitiklių gamybos technologijos teigiamų ypatumų šie prietaisai jau kelėta dešimtmečių yra tyrinėjami visame pasaulyje, jiems surandant naujų taikymo sričių. Viena iš tokių sričių yra talpiniai ultragarsiniai keitikliai, naudojami paviršinių akustinių bangų principu kuriamuose prietaisuose. Taikomoju aspektu yra įdomūs keitikliai generuojantys ir priimantys paviršines akustines bangas sklindančias kieto kūno ir dujinės aplinkos sandūroje, bei Sholte bangassklindančias kieto kūno ir skysčio sandūroje.

Paviršinės bangos, sklidimo terpėje yra stipriai slopinamos, todėl jų amplitudė priėmimo taške yra maža. Norint išskirti signalą iš triukšmų naudojami specialūs algoritmai, daugkartinis signalo nuskaitymas, vidurkinimas. Tačiau tokių priemonių naudojimui reikalinga papildoma programinė įranga, ribojamos proceso stebėjimo realiaje laike galimybės. Kuo signalas yra stipresnis ir mažiau triukšmingas, tuo tikslesnius duomenis galime gauti apdorojant signalus.

Norint gauti stipresnę, didesnės amplitudės, signalą kurį būtų galima lengviau apdoroti reikalingi žemo triukšmingu stiprintuvai. Stiprintuvai pagal savo konstrukcijos charakteristikas dirba dažnių diapazone, kurį apibrėžia jų elementinė bazė ir konstrukcija. Stiprintuvų pralaidumo juosta riboja, jų universalų naudojimą su skirtingų konstrukcijų talpiniais ultragarsiniais keitikliais. Talpinio ultragarsinio keitiklio konstrukcija nustato jo darbinį dažnį.

Prietaisams naudojamiems skysčių ar dujų analizei, tuo pačiu metu gali būti reikalingi keli skirtingų konstrukcijų ultragarsiniai keitikliai. Naudojant komutatorius, užtenka vieno stiprintuvo, kuris adaptuojasi prie konkretaus keitiklio dažnio, sustiprindamas iki tinkamo signalo apdorojimui lygio.

Kadangi paviršinių akustinių bangų dažnis priklauso nuo kieto kūno ir skysčio arba dujų savybių ir šioje sandūroje negali sklisti kitokio dažnio bangos, negu apibrėžia šių medžiagų savybės, šie įtaisai gali būti pritaikyti filtrų ir jutiklių gamybai. Vienas pagrindinių tokių įtaisų komponentų yra mažo triukšmingumo stiprintuvas, kurio konstrukcijos ir parinkimo problemos nagrinėjamos šiame darbe.

Darbo tikslas:

1. Parinkti ir išanalizuoti žemo triukšmingumo stiprintuvą, pritaikytą signalų priėmimui paviršinių akustinių bangų įtaisuose, realizuotuose talpinių ultragarsinių keitiklių pagrindu.

2. Išanalizuoti galimybes, praplėsti stiprintuvo dažnių juostą, nekeičiant elementinės bazės, bei pritaikyti darbui su skirtingų dažnių keitikliais.

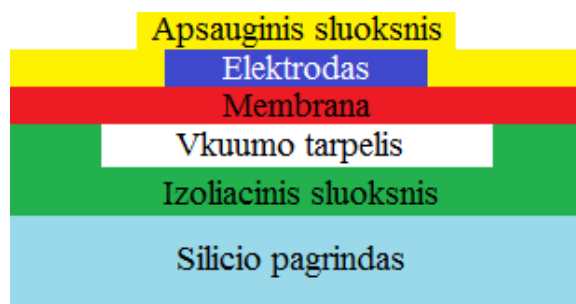
1. TALPINIŲ ULTRAGARSINIŲ KEITIKLIŲ IR JŲ TAIKYMO SRIČIŲ APŽVALGA

1.1.1 Talpiniai ultragarsiniai keitikliai (CMUT)

Viena iš perspektyvių mikroelektromechaninių (MEMS) įtaisų naudojimo sričių yra ultragarso keitikliai. Šiuo metu žinomi du pagrindiniai mechaninių virpesių siuntimo ir priėmimo principai, naudojami elektroniniuose ultragarsiniuose prietaisuose: pjezoelektrinis ir elektrostatinis.

Ultragarsiniai keitikliai yra naudojami mechaninių virpesių, turinčių ultragarsinį dažnį, priėmimui ir perdavimui. Kintamo stiprumo elektriniam laukui veikiant tokias medžiagas, jos keičia savo formą ir generuoja atitinkamo dažnio mechaninius virpesius. Priėmimo režime dėl medžiagos formos pokyčio, kurį sukelia aplinkos slėgio svyravimai, susiformuoja elektrinio lauko pokytis, proporcingas priimamos ultragarsinės bangos slėgiui [1].

Talpiniai mikromechaniniai ultragarsiniai keitikliai buvo sukurti 1994–1996 metais, Stanfordo universiteto mokslininkų [2]. Pagal veikimo principą CMUT yra kondensatoriai su viena judančia plokštele (membrana), nuo pagrindo atskirta vakuumo tarpeliu (1 pav.). Keitiklio formuojamas ant legiruoto silicio plokštelės, kuri veikia kaip apatinis elektrodas. Prie elektrodų prijungus įtampą, nepriklausomai nuo poliškumo, membrana dėl kuloninės sąveikos įlinksta į pagrindo pusę. Membranos vibravimas ir ultragarsinė banga sužadinama membranos įlinkį keičiant kintančiu elektros lauku. Priėmimo režime elektrinį signalą sukelia ultragarsinės bangos slėgio sukeltas membranos virpėjimas ir tuo pačiu talpos kitimas.



1 pav. Vienos CMUT celės skerspjūvio schema

Perduodamos/priimamos bangos galios padidimui CMUT celės yra jungiamos lygiagrečiai suformuojant elementų masyvus [3]. Elementų struktūra gali būti įvairi: vienmatė, dvimatė, žiedo forma ir panašiai. Keitiklių dydžiai, priklausomai nuo pritaikymo srities, gali būti nuo 100 μm iki 5 ÷ 6 cm [4]. Priklausomai nuo membranos konstrukcijų ir gamybai naudojamų

medžiagų, struktūrų generuojamas ultragarsinės bangos dažnis yra 10 kHz ÷ 60 MHz. CMUT ultragarsinės bangos sukiamas slėgis gali siekti iki 3 MPa [5].

Pjezoelektrinių keitiklių gamybos technologija labai riboja keitiklių dydį ir formą. Šio tipo keitiklių gamybos procesas prasideda nuo vientiso medžiagos ruošinio, kuris supjaustomas į reikalingo dydžio elementus. Pjūklo ašmenų matmenys riboja formą ir tarpelių dydį. Tipinis tarpelis yra apie 30 μm pločio, naudojant deimantinius pjūklus tarpeliai sumažinami iki 17 μm [6]. Tarpeliai mažina efektyvų keitiklio plotą ir išspinduliuojamą galią. Pjezoelektrinių keitiklių integravimas su elektronikos grandynais, norint slopinti parazitines ultragarsinės bangos dedamąsias, yra komplikotas. Paprastai keitiklio elementai jungiami per tarpines jungtis suvirinant arba prilituojant. Jungiant dvimates struktūras, dėl papildomos erdvės, naudojami daugiasluoksniai sujungimai [7]. Dėl greta esančių grandinių elektrinių signalų sąveikos tokių sujungimų naudojimas blogina santykį signalas/triukšmas.

CMUT membranos impedansas, lyginant su pjezoelektriniais keitikliais, yra mažas.

Naudojant CMUT pasiekiamas didesnis negu 100% [8] keitiklio darbo dažnių juostos plotis ir gaunami trumpesni (nerezonansiniai) priimami signalai lyginant su pjezoelektriniais keitikliais. Dažnių ruožo išplėtimas padidina ultragarsinės sistemos skiriamąją gebą.

CMUT keitikliai ir elektronikos grandinės suformuojamos ant tos pačios silicio plokštelės arba sujungimas atliekamas naudojant mikrolitavimo (flip-chipbonding – *angl.*) technologiją [9]. Elektronikos integravimas leidžia keitiklio zonoje sutankinti elementų valdymo kanalus, sumažinant valdymo linijų į pirminius elektronikos grandynus skaičių, sumažinti keitiklį ir elektronikos grandynus jungiančių laidų ilgį bei su tuo susijusius parazitinius efektus. Akustinių stiprintuvų ir galinių žadinimo impulsų stiprinimo bloką integravimas padidina jautrumą priėmimo režime ir padeda išvengti žadinimo impulsų nuostolių bei iškraipymo [10].

CMUT keitiklių potencialas gali būti išnaudotas jutiklių kūrimui. CMUT elementą apkraunant papildoma mase, dinaminiai keitiklio parametrai: rezonansinis dažnis ir mechaninis impedansas pasikeičia. Šie pokyčiai išnaudojami cheminių ir biologinių jutiklių kūrimui. Tam membranos padengiamos plonu aktyvios medžiagos sluoksniu su kuriuo sąveikauja, absorbuojamos iš aplinkos, molekulės. Dėl atsirandančių ryšių su aplinkos medžiaga, vibruojančios membranos masė pasikeičia, tuo pačiu pakeisdama sistemos rezonansinį dažnį. CMUT charakteringas didelis jautrumas ir greitas reakcijos laikas [11].

Vienas pagrindinių mikroelektromechaninių sistemų taikymas yra energijos keitikliai, konvertuojantys vieną fizikinį dydį į kitą. Daugeliu atvejų šie dydžiai yra skirtinguose energetiniuose domenuose [12]. Išskiriami šeši energetiniai arba signalų domenai:

- Spinduliavimo signalų domenai (elektromagnetinės, akustinės bangos);

- Mechaninių signalų domenas (poslinkis, rotacija, elastingumas, gravitacinė energija). Šiame domene taip pat klasifikuojama skysčių mechanika;
- Elektrinių signalų domenas;
- Magnetinių signalų domenas;
- Cheminių signalų domenas (molekulinė ir atominė energija);
- Temperatūrinių signalų domenas (molekulių ir atomų kinetinė energija).

Mikroelektromechaniniai keitikliai ir jutikliai keičia vieno domeno energiją į kito, sukurdami patogius matuoti signalus arba generuoja energiją reikalingame energetiniame domene.

Naudojantis mikroelektromechaninių sistemų (MEMS) gamyba, gaminamos spausdinimo įtaisų kasetės, įrašymo/nuskaitymo įtaisai, mikrodisplėjai, slėgio davikliai, aukšto dažnio įtaisai, mikrokanalinės skysčio sistemos, giroskopai, akselerometrai, mikrofonai, debito matuokliai, vaistų inektoriai, cheminės analizės sistemos, MEMS energijos generatoriai, mikropompos.

MEMS sistemos kuriamos trim etapais [13]: projektas, kuriame parodomas sistemos idėjos ir principai. Konstrukcijos detalizavimas. Prototipo gamyba. Prototipas gaminti pradedamas tuomet, kai nustatomi svarbiausi struktūrinių medžiagų parametrai.

Medžiagos kurios naudojamos MEMS gamybai, turi atitikti šiuos kriterijus [14]: suderinamumas su silicio technologija, pageidaujamos elektromechaninės savybės ir maži liekamieji įtempiai. 1 lentelėje pateikiama medžiagų, kurios gali būti naudojamos CMUT gamyboje parametrų santrauka.

1 lentelė

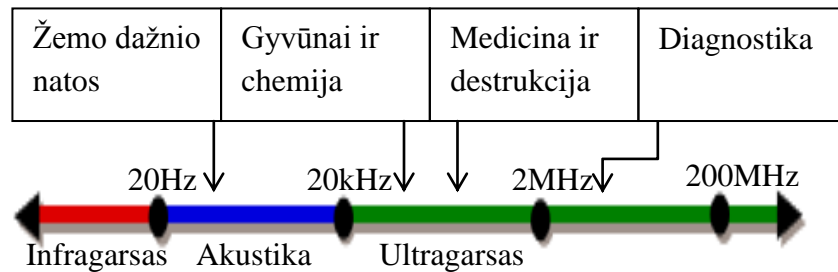
MEMS gamyboje naudojamų medžiagų savybės

	Dangos storis, μm	Jungo modulis E, GPa	Liekamieji įtempiai σ , GPa	Puasono koeficientas, ν	Tankis, ρ kg/m ³
Silicio nitridas	0,1÷3,0	86÷370	-0,124÷1,17	0,22÷0,263	3270 [137]
Kristalinis Si		130÷187,5		0,064÷0,279	2329 [170]
SiO ₂	0,15÷2,3	64÷75	-0,280÷-0,240	0,16÷0,17	2202[23]
Al	0,1÷2,11	24,2÷75	0÷0,137	0,345[79]	2699[23]
Au	0,5÷1,00	53÷133		0,44÷0,566	19320[23]
PMMA	1,7÷2,0	3,036÷7,6			1180÷1190[23]
PDMS		0,000036÷ 0,000087			918÷987[94]
PET		2,0÷4,0			1560[23]

1.2 Paviršinės akustinės bangos

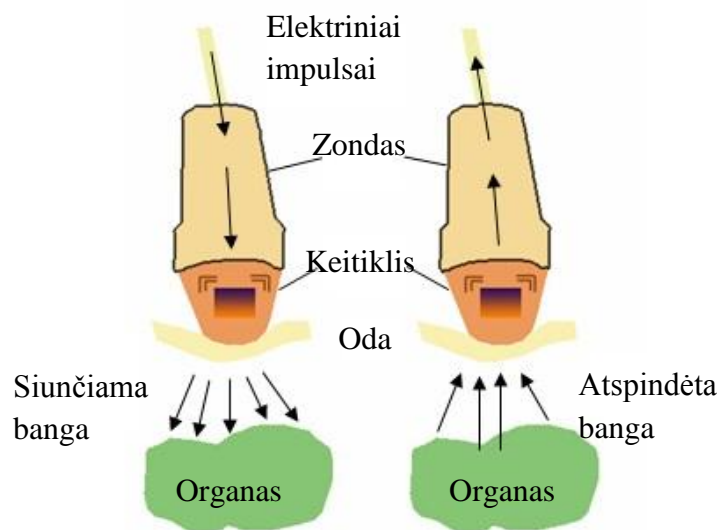
Paviršinės akustinės bangos — SAW (Surface Acoustic Waveang.) tai sąvoka apibudinanti seismines ir ultragarsines bangas. Šio bangos pirmą kartą buvo aprašytos XIX a. pabaigoje anglų mokslininko Reilėjaus (Rayleigh), kuris tyrinėjo žemės drebėjimo sukeltus žemės plutos judėjimus.

Paviršinių akustinių bangų pritaikymo sritis yra ne tik seismologija, bet ir ultragarsiniai reiškiniai. Ultragarso dažninis diapazonas (2pav.) prasideda nuo 20kHz dažnio. Ultragarso bangos yra naudojamos įvairiose srityse: medicininiais tyrimams, jutiklių kūrimui, struktūrų defektų identifikavimui ir pan.



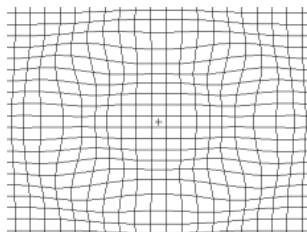
2 pav. Garso dažnių spektras ir jo panaudojimo sritys.

Medicinoje ultragarso metodu yra tiriami žmogaus vidaus organai. Atspindėtos ultragarsinės bangos impulsai yra paverčiami elektros impulsais, kurie specialios įrangos pagalba suformuoja vaizdą ekrane(3pav.). Tokiu neintervenciniu būdu (echoskopija) galima stebėti žmogaus vidaus organus nepažeidžiant kūno, diagnozuoti ligas, stebėti nėštumo būklę.



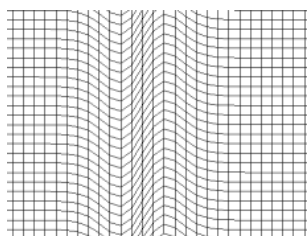
3 pav. Echoskopo veikimo principas.

Pagal bangos sklidimo pobūdį paviršines akustines bangas galima skirstyti į išilgines bangas (4pav.) ir skersines bangas (5pav.).



4 pav. Paviršinė išilginė banga.

Išilginė banga, vadinama banga kurioje fizikinio dydžio pokyčiai vyksta išilgai bangos sklidimo krypties. Išilginėje bangoje, terpės dalelės juda ta pačia kryptimi kaip ir banga.



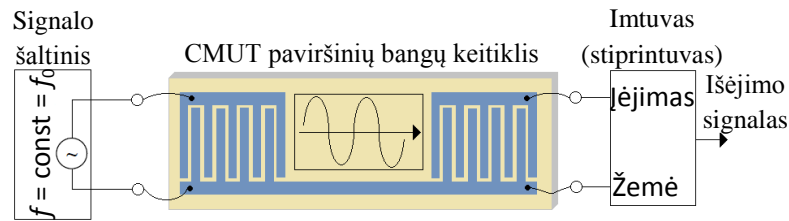
5 pav. Paviršinė skersinė banga.

Skersinė banga, vadinama banga kurioje fizikinio dydžio pokyčiai vyksta statmenai bangos sklidimo krypties. Jei skersinė banga juda teigiama x-ašies kryptimi, svyravimai joje vyksta yz — plokštumoje.

1.3 Filtrai CMUT keitiklių pagrindu

1.3.1 CMUT filtro konstrukcija

Mažai tirta sritis yra paviršinių akustinių bangų sklindančių kieto kūno ir dujinės aplinkos sandūroje, bei Sholte bangų sužadintam kieto kūno ir skysčio sandūroje įtaisai [15]. Tokios struktūros konstruojamos, kaip užlaikymo linijos su atskirais žadinančių ir priimančių ultragarsinę bangą keitiklių masyvais (6pav.). Keitiklių žadinimui dažniausiai naudojami harmoniniai virpesiai. CMUT keitikliams reikalingas tik vienas paviršinis elektrodas. Tai leidžia plokštumoje išdėstyti du „šukų“ formos keitiklius, taip kad tarp jų būtų 90° laipsnių fazės poslinkis ($1/4$ bangos ilgio), pasirinktam bangos sklidimo greičiui. Tai leidžia žadinti keitiklius dviem signalais tarp kurių yra 90° fazės poslinkis. Ši sąlyga tiek priimančiame, tiek perduodančiame keitiklyje leidžia gauti iki dviejų kartų didesnę signalo amplitudę ir geresnį signalo kryptingumą.



6 pav. Paviršinių bangų įtaiso struktūra

SAW prietaisai naudojami elektroninėse grandinėse kaip filtrai, osciliatoriai ir transformatoriai.

1.3.2 Dujų jutiklio veikimo principas

Dujų detektavimo prietaisų gamyboje yra naudojamos sistemos dirbančios paviršinių akustinių bangų principu. Paviršinių akustinių bangų principu dirbantis dujų jutiklis, gali būti sudarytas bent iš vienos akustinės uždelsimo juostos su jautriu plonu sluoksniu esančiu ant pjezoelektrinio pagrindo ir „šukų“ arba IDT (Interdigital Transducers ang.), kad galėtų sužadinti ir priimti susidarancias paviršines bangas.

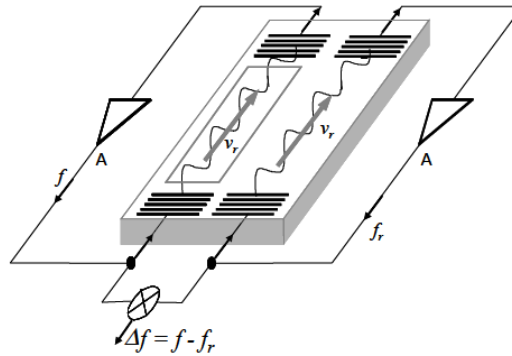
Sąveikaujant dujų molekulėms su jautriuoju sluoksniu, keičiasi bangos sklaidimo savybės — banga slopsta bei lėtėja. Ko pasekoje kinta įėjimo ir išėjimo signalų santykis tiek, kad būtų galima fiksuoti dujų buvimą arba pamatuoti dujų koncentraciją esančią aplink jutiklį. Tinkama elektroninė grandinė yra būtina, norint konvertuoti bangos sklaidimą paviršinių akustinių bangų keitiklyje į elektrinį signalą tinkamą matavimams.

Pirminės elektroninės grandinės gali būti įvairių tipų priklausomai nuo jų veikimo principo. Tokios kaip osciliatoriai su dažniniu išėjimo signalu arba grandinės su fazės postūmio išėjimu.

1.3.3 Išeinantį dažnį stebinti grandinė.

Elektroninis osciliatorius yra dažnai naudojamas kaip paviršinių akustinių bangų jutiklių, stebėjimo grandinė. Stiprintuvo grįžtamojo ryšio kilpoje yra patalpinamos uždelsimo linijos su paviršinių akustinių bangų keitikliu. Akustinė uždelsimo linija užtikrina virpesių fazę, kol stiprintuvas užtikrina amplitudę. Pagrindinis tokios sistemos trūkumas yra didelis išėjimo dažnio diapazonas (30 — 150MHz) ir mažas šiluminis stabilumas.

Žymiai patogesnis yra dvigubos uždelsimo linijos panaudojimas su aktyvia ir grįžtamojo ryšio linija (7 pav.).

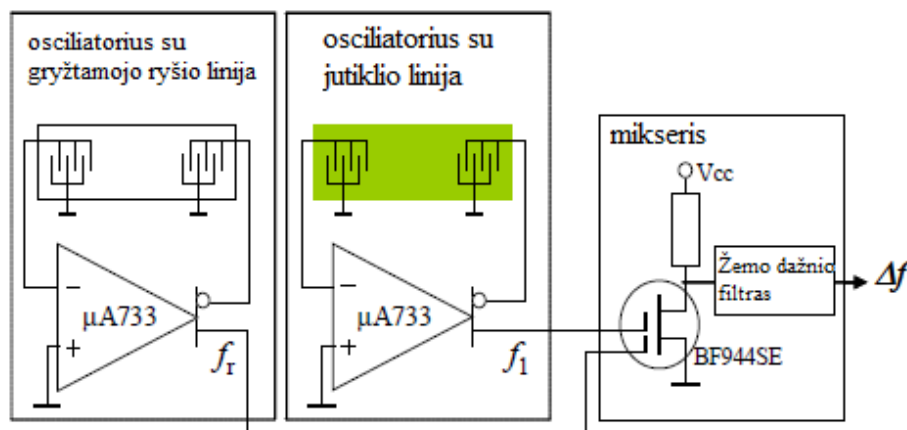


7 pav. Dujų jutiklis SAW pagrindu, su aktyviniu ir etaloniniu kanalais

Abejos uždelsimo linijos yra patalpinamos į osciliatoriaus grįžtamojo ryšio grandinę. Dujų įtaka jutikliui fiksuojama, kaip abiejų osciliatorių dažnių skirtumo pokytis Δf . Tokios konfigūracijos schemoje išėjimo signalo dažnis demoduliacijos pagalbos yra perstumiamas į žemų dažnių juostą, dažniausiai 10 — 500 kHz. Pastebimai pagerinamas šiluminis atsparumas, dėl antro laisvo kanalo kuris tarnauja kaip grįžtamasis ryšys ir kompensuoja temperatūros ir slėgio įtaką.

Tokiose schemose dažnio pokytis yra pakankamai mažas (500 Hz — 5 kHz), bet dažnio pokyčio suradimas, kai nešantysis dažnis yra iki 500 kHz nėra sudėtingas, taigi dujų stebėjimo sistemos tikslumas yra patenkinamas.

Dviejų kanalų, dujų jutiklio su paviršinių akustinių bangų keitikliu ir tikrinimo grandine schema pateikta 8 pav.



8 pav. Osciliatorius kaip pirminė SAW jutiklio elektroninė grandinė.

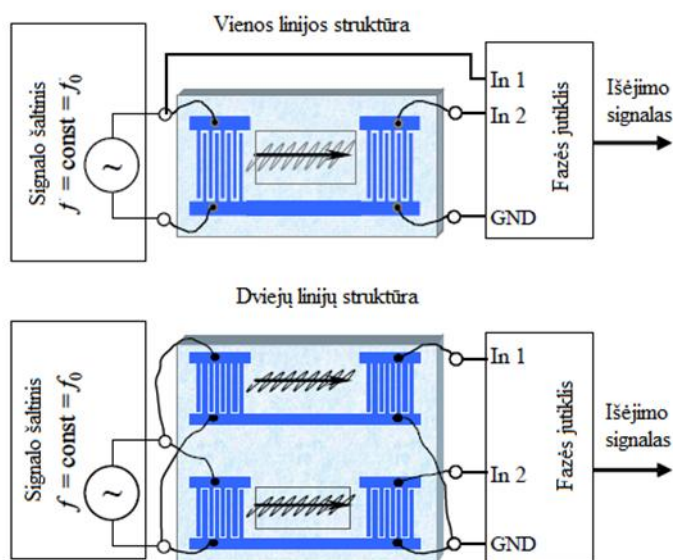
Dujų koncentracijos įtaka tiesiogiai stebima tokių jutiklių išeinančios signalo dažniui. Didžiausia tokios sistemos trūkumas yra, išeinančio signalo nestabilumas, atsirandantis dėl temperatūros poveikio ir ilgo laiko dreifo efekto [16].

Yra stebimas kitas, nepalankus efektas, kai kartojant eksperimentą osciliatoriaus dažnis sužadintas svyravimų yra ne toks pats koks buvo po maitinimo šaltinio įjungimo, nežiūrint, kad dujų koncentracija ir temperatūra yra tokie patys. Šitokios elgsenos paaiškinimas yra: specifinės paviršiniu akustiniu bangų principu veikiančių keitiklių, virpesių grandinių modalinės charakteristikos.

Siekiant pašalinti šią problemą, siūlomos įvairios modifikuotos elektroninės virpesių detektavimograndinės [17]. Vienas iš paprasčiausių būdų užtikrinti osciliatoriaus sužadimą tame pačiame dažnyje yra kiekvieną kartą po maitinimo įjungimo lėtai, nustatytu dėsniu, didinti maitinimo įtampą kiekvienai virpesių grandinei. Tačiau ir šiuo atveju išeinančio signalo dažnis atsitiktinai gali kisti, pakitus aplinkos ar keitiklio temperatūrai. Taip gali atsitikti dėl to, kad vienas iš osciliatorių gali pereiti į kita virpesių modą. Šio efekto eliminavimui rekomenduojamas jutiklio temperatūros stabilizavimas.

1.3.4 Fazės poslinkio stebėjimo grandinė

Kita SAW keitiklių panaudojimo dujų jutikliams koncepcija yra fazės postūmio pagrindu veikianti stebėjimo grandinė. Šio tipo grandinės yra SAW keitiklių modalinių virpesių problemos sprendimas. Kai SAW keitiklis dirba grandinėje be grįžtamojo ryšio, modaliniai virpesiai yra žymiai mažesni arba neegzistuoja. Šis efektas gali būti stebimas tik dėl akustinių bangų atspindžių nuo pagrindo, „šukų“ ir kitų aplinkoje esančių komponentų. Šiuo atveju IDT sužadinas iš išorinio signalo šaltinio su pastoviu dažniu, kuris lygus keitiklių savajam dažniui f_0 (9 pav.).



9 pav. Fazės postūmio principu veikiančio dujų SAW jutiklio, vieno ir dviejų kanalų versijos

Siekiant sumažinti temperatūros įtaką, naudojama kitokia paviršinių akustinių bangų dujų jutiklio struktūra su fazės postūmio konvertavimu. Tai yra realizuojama naudojant du paviršinių akustinių bangų keitiklius sujungtus lygiagrečiai: vienas su jautriu sluoksniu, kitas be jautraus sluoksniu (atraminis kanalas).

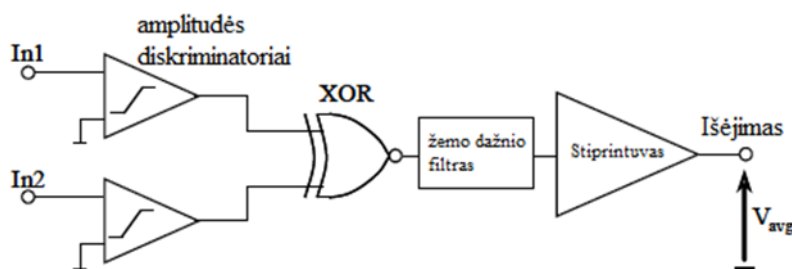
Fazės kitimas tarp sužadinimo ir išėjimo signalų priklauso nuo akustinio kanalo uždelsimo parametru, taip pat ir nuo dujų koncentracijos. Šis fazės kitimas matuojamas vienos linijos struktūroje. Kai naudojama dviejų linijų struktūra, pokytis $\Delta\varphi$ yra matuojamas tarp dviejų fazės pokyčių. Šis pokytis aprašomas lygtimi:

$$\varphi_1 = \frac{2\pi f L_1}{v_1}; \varphi_2 = \frac{2\pi f L_2}{v_2}; \Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2; \quad (1)$$

Čia L_1 ir $L_2 \approx L_1$ yra bangos sklidimo atstumas nuo sužadinimo taško iki akustinės bangos priėmimo vietos. $v_1 = \text{const.}$ ir $v_2 = \text{var.}$ Yra atitinkamai bangos sklidimo greitis atraminiame kanale ir kanale su jautriu sluoksniu, f yra sužadinimo signalo dažnis.

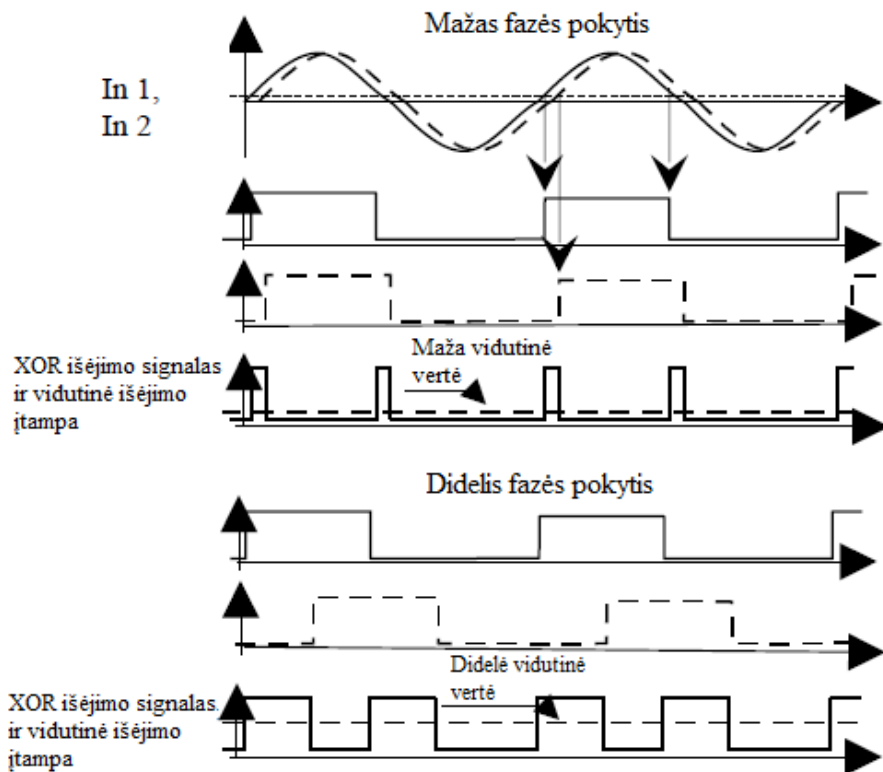
Sklindančios bangos fazės kitimas per vieną virpesio periodą, akustinio uždelsimo linijoje yra labai mažas. Bet atstumas tarp sužadinimo ir priėmimo vietos yra dažniausiai lygus šimtam bangų ilgių, taigi pilno fazės pokyčio užtenka, kad išmatuoti ir konvertuoti į įtampos signalą.

Fazės detektoriaus („fazės postūmio į įtampą“ konverterio) elektroninė schema pateikta 10 pav. Veikimo principas paašškintas 11 pav. Vidutinės išėjimo įtampos reikšmės yra proporcingos fazės kitimui tarp signalų įėjimuose In_1 ir In_2 .



10 pav. Fazės į įtampą keitiklio elektroninės grandinės schema

Diferenciniai stiprintuvai su dideliu stiprinimo koeficientu yra naudojami priėmimo trakto gale. Tai daroma dėl mažo fazės kampo pokyčio ir egzistuojančio pradinio fazės pokyčio sukeliama dviejų linijų asimetrijos. Labai svarbu geras ir stabilus signalo sužadinimo dažnis, kadangi, kadangi fazės pokytis yra proporcingas dažniui ir bet koks nestabilumas įveda papildomas matavimo paklaidas. Naudojantis dviejų linijų struktūra, dažnio pokyčio įtaką galima žymiai sumažinti, bet pilnas eliminavimas nėra galimas.



11 pav. Signalų fazės pakeitimo į įtampą diagrama

SAW keitiklių sistemose naudojami mažos amplitudės signalai, todėl naudojant netinkamus stiprintuvus arba jų nenaudojant, signalas gali būti per silpnas registravimui.

Išvados:

1. Skyriuje atlikta CMUT tipo keitiklių ir SAW prietaisų (jutiklių, filtrų) analizė parodė, kad vienas iš pagrindinių šių prietaisų elektroninių schemų elementas yra specializuotas, mažo triukšmingumo stiprintuvas.

2. Norint, kad tinkamai veiktų SAW pagrindu kuriami prietaisai ir sistemos, būtų galima priimti, analizuoti ir apdoroti signalus reikalingi, specializuoti stiprintuvai.

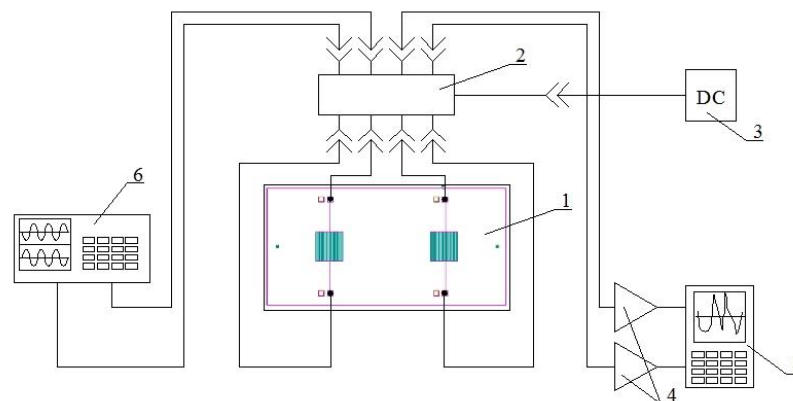
2. DARBO METODIKA

Darbe naudoti eksperimentiniai tyrimai ir sistemos parametrų modeliavimas naudojantis LTspiceIV programine įranga.

Modeliavimo rezultatų patikrinimui, eksperimentiniuose tyrimuose buvo naudojama įranga, leidžianti pasiekti signalo sužadavimo, filtravimo ir stiprinimo parametrus analogiškus sumodeliuotiems režimams. Matavimuose naudotos matavimo priemonės apjungtos į matavimo sistemą (12 pav.).

Stiprintuvo eksperimentinis tyrimas atliktas naudojantis:

1. VŠĮ “Panevėžio mechatronikos centras” pagamintu CMUT paviršinių bangų keitikliu (veikiančiu kaip užlaikymo linijos su atskirais žadinančių ir priimančių ultragarsinę bangą keitiklių masyvais). Tokio tipo keitikliai gali būti naudojami įvairių jutiklių ir analizatorių kūrimui.
2. Signalų atskyrimo įrenginys. Naudojamas pastovios įtampos (priešįtampio) ir kintamos dedamosios, reikalingos keitiklio membranų virpesio sužadanimui prijungimui prie CMUT keitiklių membranų masyvų.
3. Maitinimo šaltinis Agilent Technologies N5752A, CMUT keitiklio pastovios įtampos (priešįtampio) suformavimui.
4. Stiprintuvas, tyrimo objektas. Skirtas CMUT keitiklio priimamo signalo registravimui.
5. Oscilografas Fluke 196C, stiprintuvo signalo stebėjimui ir registravimui.
6. Dviejų kanalų generatorius Agilent 33500B, reikalingo dažnio (iki 30MHz) ir amplitudės (iki 5V) harmoninio žadinimo signalo CMUT suformavimui.



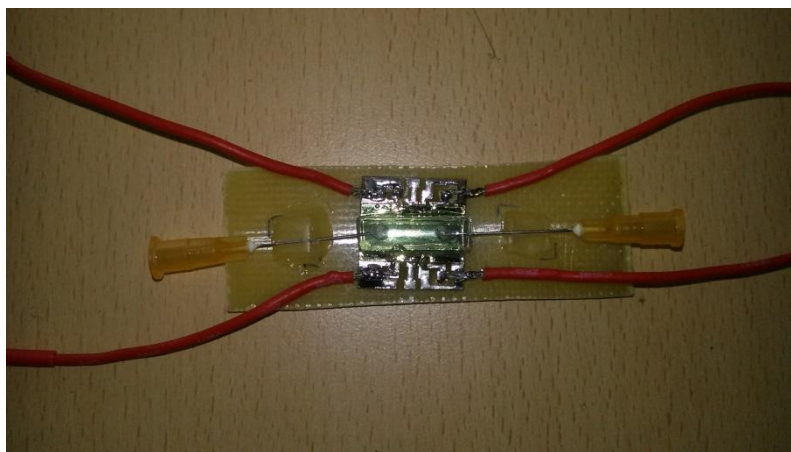
12 pav. Prietaisų sujungimo diagrama: 1 – CMUT paviršinių bangų keitiklis; 2 – signalų atskyrimo įrenginys; 3 – maitinimo šaltinis (Agilent Technologies N5752A); 4 – stiprintuvas (tyrimo objektas); 5 – oscilografas (Fluke 196C); 6 – signalo generatorius (Agilent 33500B)

Modeliavimas buvo atliekamas naudojantis, Amerikos kompanijos „LinearTechnology“ platinama programa LTspiceIV. Ši programa leidžia modeliuoti įvairias elektronines, elektrines ir logines schemas. Programa laisvai platinama, naudojama projektuoti įvairias elektronines grandis, jas testuoti su programoje pateikiamais įrankiais.

Spice programos yra patrauklios tuo atžvilgiu, kad daugelis gamintojų pateikia savo elektronikos komponentų charakteristikas (matematinis modelius), pritaikytas modeliavimui šioje aplinkoje.

2.1.1 Tiriamajame darbe naudotas CMUT paviršinių akustinių bangų keitiklis

Paviršinių bangų signalas būna slopinamas sklidimo terpėje, todėl jo amplitudė priėmimo taške yra maža. Kad išskirti signalą iš triukšmų naudojami specialūs algoritmai, daugkartinis signalo nuskaitymas, vidurkinimas. Tačiau tokių priemonių naudojimui reikalinga papildoma programinė įranga, ribojamos proceso stebėjimo realiaame laike galimybės. Kuo signalas yra stipresnis ir mažiau triukšmingas, tuo tikslesnius duomenis galime gauti apdorojant signalus. Vienas iš būdų gauti geros kokybės signalą yra mažo triukšmingumo stiprintuvų naudojimas. Šiame darbe toliau pateikiami stiprintuvų, skirtų akustinių bangų priėmimui, skaičiavimų ir eksperimentų rezultatai, kurių tikslas išanalizuoti ir parinkti tinkamą stiprintuvo variantą paviršinių akustinių bangų signalo priėmimui. Eksperimentuose buvo naudoti VŠĮ “Panevėžio mechatronikos centras” pagaminti, naudojant aukojamo sluoksnio metodą, paviršinių bangų CMUT keitikliai. Pagrindiniai keitiklių (13 pav.) matmenys pateikti 2 lent.



13 pav. CMUT keitiklis

2 lentelė

CMUT geometriniai matmenys

Parametrai	Vertė
Atstumas tarp šukų formos keitiklių pirštų	146 μm
Scholte bangos sklidimo silicio – vandens sandūroje greitis	1 460 m/s
Šukų formos keitiklių skaičius	20
Keitiklių perstūmimas vienas kito atžvilgiu 90° laipsnių fazės poslinkiui	36,6 μm
Šukų formos keitiklio matmenys	16×100 μm
Membranų skaičius viename keitiklyje	30

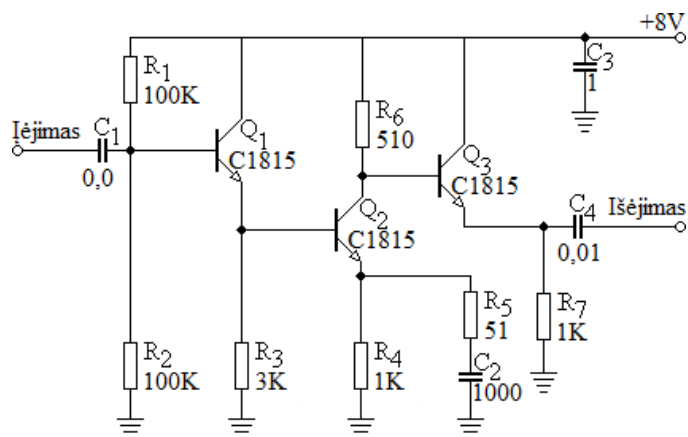
Išvados:

Išanalizavus CMUT paviršinių akustinių bangų keitiklio konstrukciją ir darbo sistemą, buvo pasirinkti programinė įranga bei prietaisai ir sudaryta schema tokios sistemos modeliavimui bei analizei.

3. MODELIAVIMO IR TYRIMO REZULTATAI

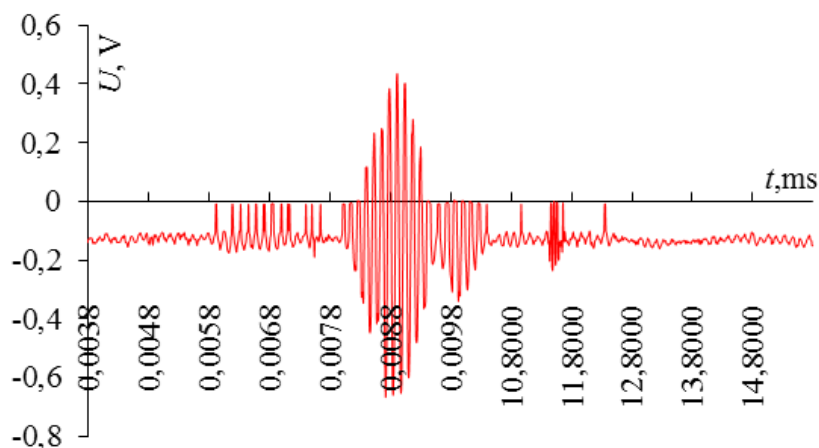
3.1 Diskretinių elementų stiprintuvo analizė

Pirminiams matavimams buvo pasirinktas iš diskretinių elementų surinktas tranzistorinis stiprintuvas, kurio principinė schema pateikiama 14pav.



14 pav. Diskretinių elementų tranzistorinio stiprintuvo schema

Žadinimui naudojant 10 MHz dažnio ir 5 V amplitudės signalą keitiklis buvo panardintas į vandenį (Sholte bangos greitis 1500 m/s), keitiklio išėjime gautas signalas pateikiamas 15pav.



15 pav. Su diskretinių elementų tranzistoriniu stiprintuvu priimtas signalas

Pagal vidutinės signalo ir triukšmo amplitudės reikšmes apskaičiuotas santykis signalas / triukšmas S:

$$S = 20 \lg \frac{U_s}{U_{tr}}; \quad (2)$$

čia: U_s – signalo amplitudė, U_{tr} – triukšmų amplitudė. Gautas santykis signalas / triukšmas $S = 32$ dB.

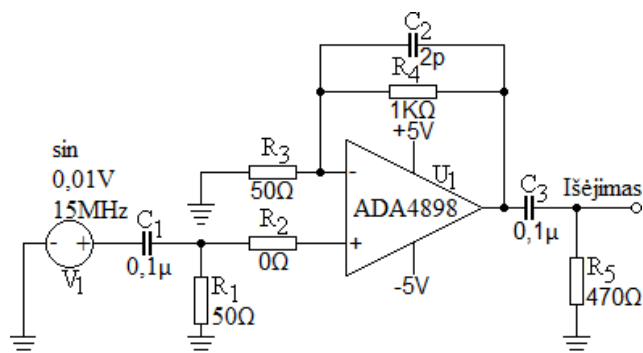
Naudoto stiprintuvo triukšmo vidutinis lygis stiprintuvo išėjime sudaro 85 mV, todėl su šio tipo stiprintuvu yra sudėtinga stebėti ir fiksuoti mažos amplitudės (mažesnius nei 100 mV) signalus. Dėl šios priežasties yra modeliuojamas mažo triukšmingumo stiprintuvas, ADA4898 mikroschemos pagrindu.

3.2 Mažo triukšmingumo stiprintuvo ADA4898 mikroschemos pagrindu modeliavimas ir tyrimas

Siekiant ištirti mažo triukšmingumo stiprintuvo, ADA4898 mikroschemos pagrindu, parametrus (1 priedas), buvo sudarytas stiprintuvo sistemos modelis naudojantis programine LTspice IV įranga. Naudojantis šia programine įranga buvo tikrinama stiprintuvo DACH, dažnių pralaidumo juosta ir stiprintuvo sistemos stabilumas. Atlikus modeliavimą buvo atliekami laboratoriniai eksperimentai sutalpiniu ultragarsiniu keitikliu ir stiprintuvo ADA4898 schema.

3.2.1 Modeliuojama sistema

Modeliuojamo stiprintuvo sistemos principinė schema pateikiama 16 pav.



16 pav. LTspice IV stiprintuvo ADA4898 mikroschemos pagrindu schema

Sistemoje naudojami komponentai ir jų darbo pobūdis:

V_1 — modeliuojamojo signalo šaltinis.

U_1 — operacinis stiprintuvas ADA4898.

R_3, R_4 — varžos stiprinimo koeficiento reguliavimui $K = 1 + \frac{R_4}{R_3}$;

C_1 — Apsauginis kondensatorius, naudojamas, kad aukšta CMUT prieštampio pastovi dedamoji nesugadintų stiprintuvo.

R_1 — skirta jungiamųjų (50Ω) kabelių ir stiprintuvo įėjimo varžos suderinimui

R_5 — stiprintuvo išėjimo varža

R_2 — nenaudojama (trumpas jungimas).

C_3 — kondensatorius, nepraleidžiantis į matavimo traktą pastovios signalo dedamosios.

C_2 — grįžtamo ryšio kondensatorius stiprintuvo stabilumo pagerinimui.

3.2.2 Stiprintuvo amplitudinės dažninės charakteristikos modeliavimas

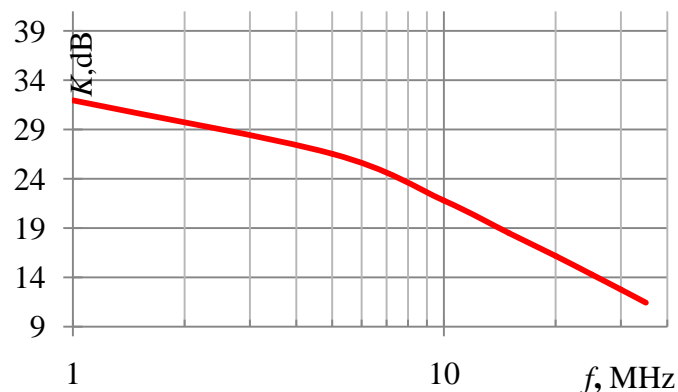
Pirmiausiai buvo parinkta grįžtamojo ryšio varža R_4 . Kadangi tiriamasis CMUT dirba iki 10MHz dažnyje, 10MHz buvo pasirinktas kaip darbinis dažnis. Testavimui į stiprintuvą paduotas 10MHz, 0,01V amplitudės sinusinis signalas. Modelyje keičiant grįžtamojo ryšio varža nuo 100Ω iki 5000Ω, intervale nuo 100Ω iki 1000Ω buvo pastebėtas didesnis stiprinimo koeficiento kitimas, o nuo 1000Ω iki 5000Ω stiprinimo koeficiento pokytis buvo nežymus. Todėl buvo priimta, kad optimaliausia grįžtamojo ryšio varža amplitudinės dažninės charakteristikos modeliavimui (ADCH) yra 1000Ω. Tokia pačią grįžtamojo ryšio varžą nurodo ir gamintojas, ADA4898 mikroschemos techninėje specifikacijoje, 1 priedas.

Pasirinkus modeliuojamos stiprintuvo sistemos atraminius parametrus, buvo atliktas ADCH modeliavimas. ADCH apskaičiuota keičiant įeinančio signalo dažnį nuo 1MHz iki 35MHz pasirinktu 5MHz intervalu. 35MHz ribinis dažnis pasirinktas dėl tiriamų talpinių ultragarsinių keitiklių darbinio diapazono ribos. Kiekvienam dažniui iš pasirinkto diapazono nuskaityta išeinančio signalo oscilograma ir užregistruota išeinančio signalo amplitudė.

Pagal (3) apskaičiuotas stiprinimo koeficientas ir jo priklausomybė nuo dažnio. Modeliavimui buvo naudoti gauti iš gamintojo operacinio stiprintuvo ADA4898 parametrai (2 priedas).

$$K = 20 \lg \frac{U_i}{U_{is}}; \quad (3)$$

čia: U_i – įeinančio signalo amplitudė, U_{is} – išeinančio signalo amplitudė. Modeliuotos sistemos ADCH pateikiama 17 pav.



17 pav. Apskaičiuota stiprintuvo ADCH.

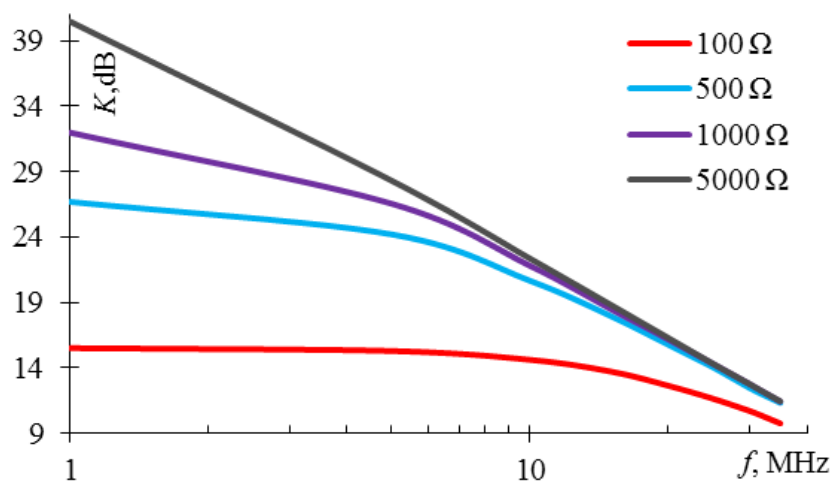
Iš 17pav. matyti, kad:

- Modeliuojamo stiprintuvostiprinimo koeficiento kritimas dažnių diapazone nuo 1 MHz iki 7 MHz sudaro 8dB/dek.
- Modeliuojamo stiprintuvo stiprinimo koeficiento kritimas dažnių diapazone nuo 7 MHz iki 35 MHz sudaro 24 dB/dek.
- Darbiniame 10 MHz dažnyje išeinančio signalo stiprinimas yra 22 dB.

3.2.3 Dažnių pralaidumo juostos išplėtimo galimybių tyrimas

Svarbus stiprintuvo parametras yra dažnių pralaidumo juosta, kuri priklauso nuo stiprinimo koeficiento ir mikroschemos parametrų.

Kadangi stiprintuvų stiprinimo koeficientas ir dažnių pralaidumo juostos plotis yra atvirkščiai vienas kitam proporcingi, buvo atliktas tyrimas, kurio tikslas yra: patikrinti kiek padidėja dažnių juosta mažinant grįžtamojo ryšio varžos R_4 dydį. Dažnių pralaidumo juostos skaičiavimas atliktas keičiant grįžtamojo ryšio varžos dydį (100Ω , 500Ω , 1000Ω ir 5000Ω), bei įeinančio signalo dažnį nuo 1 MHz iki 35 MHz. Modeliuotoje sistemoje pasirinkus atitinkamo dydžio grįžtamojo ryšio varžos didį ir įeinančio signalo dažnį, stebima išeinančio signalo oscilograma. Pagal (3) apskaičiuotas stiprinimo koeficientas ir jo priklausomybė nuo dažnio. Dažnių pralaidumo juostos pralaidumo modeliavimo rezultatai pateikiami 18pav.



18 pav. Stiprintuvo ADA4898 ADCH priklausomybė nuo stiprintuvo grįžtamojo ryšio varžos R_4

Iš 18pav. matyti, kad:

- Mažinant grįžtamojo ryšio varžą nuo 1000Ω iki 100Ω signalo stiprinimas sumažėja nuo 32 dB iki 15 dB.

- Dažnių pralaidumo juosta padidėja nuo 7MHz, grįžtamojo ryšio varžoms 500Ω ir daugiau, iki 14MHz esant 100Ω grįžtamojo ryšio varžai.

3.2.4 Stiprintuvostabilumas

Vienas iš pagrindinių stiprintuvo parametrų yra jo stabilumas. Sistemos gali būti trijų tipų:

1. Nestabili sistema, kai sistemos išėjimo dydis vis labiau nukrypsta nuo užduoties ir sistema neįgauna pusiausvyros padėties.
2. Stabili sistema, kai sistema grįžta į pusiausvyros padėtį.
3. Sistema esanti ant stabilumo ribos, kai sistema charakterizuojama nusistovėjusiais periodiniais virpesiais.

Sistemos stabilumą galima paskaičiuoti keliais būdais, tokiais kaip: Liapunovo stabilumo kriterijus, Višnegradskio kriterijus, Rauso – Hurvico stabilumo kriterijai, Michailovo stabilumo kriterijus, Naikvisto stabilumo kriterijus, logaritminis stabilumo kriterijus [18].

Šiuo atveju sistemos stabilumas buvo įvertintas pagal logaritminį stabilumo kriterijų.

Sistema yra laikoma stabilia jei LADCH, kerta dažnių ašį ($K = 20 \lg \frac{U_i}{U_{is}} = 20 \lg(1) = 0$) turėdama

-20dB/dek nuolydį, ir kad yra reikiama amplitudės stabilumo atsarga, tai yra, kad -20dB/dek nuolydžio zona ne siauresnė, kaip 8-16dB.

Kaip matyti iš 18pav. grafiko, esant grįžtamo ryšio $R_4=100\Omega$ varžai stiprintuvo ADCH kerta dažnių ašį 10dB/dek nuolydžiu kampu, $R_4=500\Omega$ - 16 dB/dek, $R_4=1000\Omega$ - 24 dB/dek, $R_4=5000\Omega$ - 32 dB/dek. Iš atlikto tyrimo rezultatų galima daryti išvadą, kad esant iki 1000Ω grįžtamo ryšio varžoms stiprintuvas yra stabilus. Padidinus grįžtamo ryšio varžą iki 5000Ω stiprintuvo darbas gali būti nestabilus.

3.2.5 Eksperimentinis stiprintuvo ADA4898 tyrimas

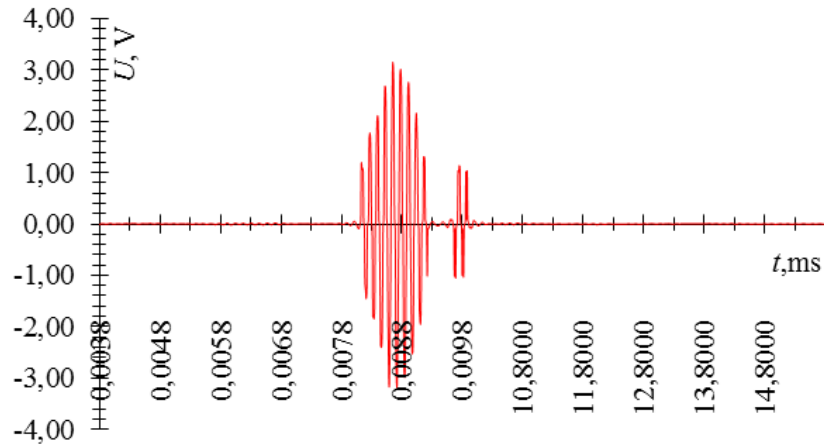
Atlikus stiprintuvo sistemos ADA4898 mikroschemos pagrindu modeliavimą su LTspiceIV programa, prieita išvados, kad šio tipo stiprintuvas yra tinkamas darbui su CMUTSAW bangų keitikliais.

Eksperimentams buvo įsigyta mikroschema ADA4898 ir VŠĮ “Panevėžio mechatronikos centras” specialistų pagamintas stiprintuvas (19 pav.). surinkus mikroschemą, buvo atliktas šio stiprintuvo tyrimas. Eksperimentams naudota įranga parodyta 12 pav.



19 pav. Žemo triukšmingumo stiprintuvas

Eksperimentas atliktas pagal metodiką, taikytą diskretinių elementų stiprintuvo analizei. Kai žadinimui naudojant 10 MHz dažnio ir 5 V amplitudės signalą, keitiklis buvo panardintas į vandenį, keitiklio išėjime gautas signalas pateikiamas 20pav.

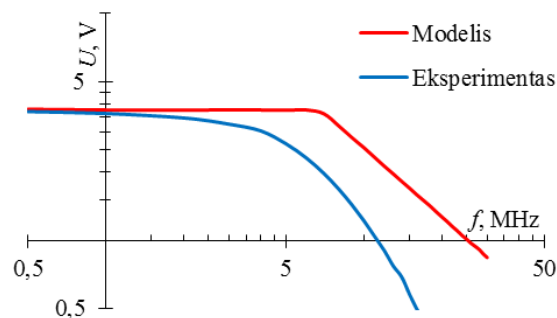


20 pav. Su ADA4898 stiprintuvu priimtas signalas

Pagal vidutines signalo ir triukšmo amplitudės reikšmes apskaičiuotas santykis signalas/triukšmas $S = 72$ dB. Stiprintuvo triukšmo vidutinis lygis stiprintuvo išėjime sudaro $U_{tis} = 0,4$ mV. Įvertinus, kad stiprintuvo dažnių pralaidumo juosta yra apie 7MHz, o stiprinimo koeficientas 24dB, triukšmai perskaičiuoti į stiprintuvo įėjimą $S_{in} = \frac{U_{tis}}{10^{\frac{K}{20}} \sqrt{f_p}} = 9nV / \sqrt{Hz}$.

Ši stiprintuvo konstrukcija yra tinkamesnė stebėti ir fiksuoti silpnus signalus.

Modeliavimo ir eksperimento rezultatų palyginimas parodytas 21pav.



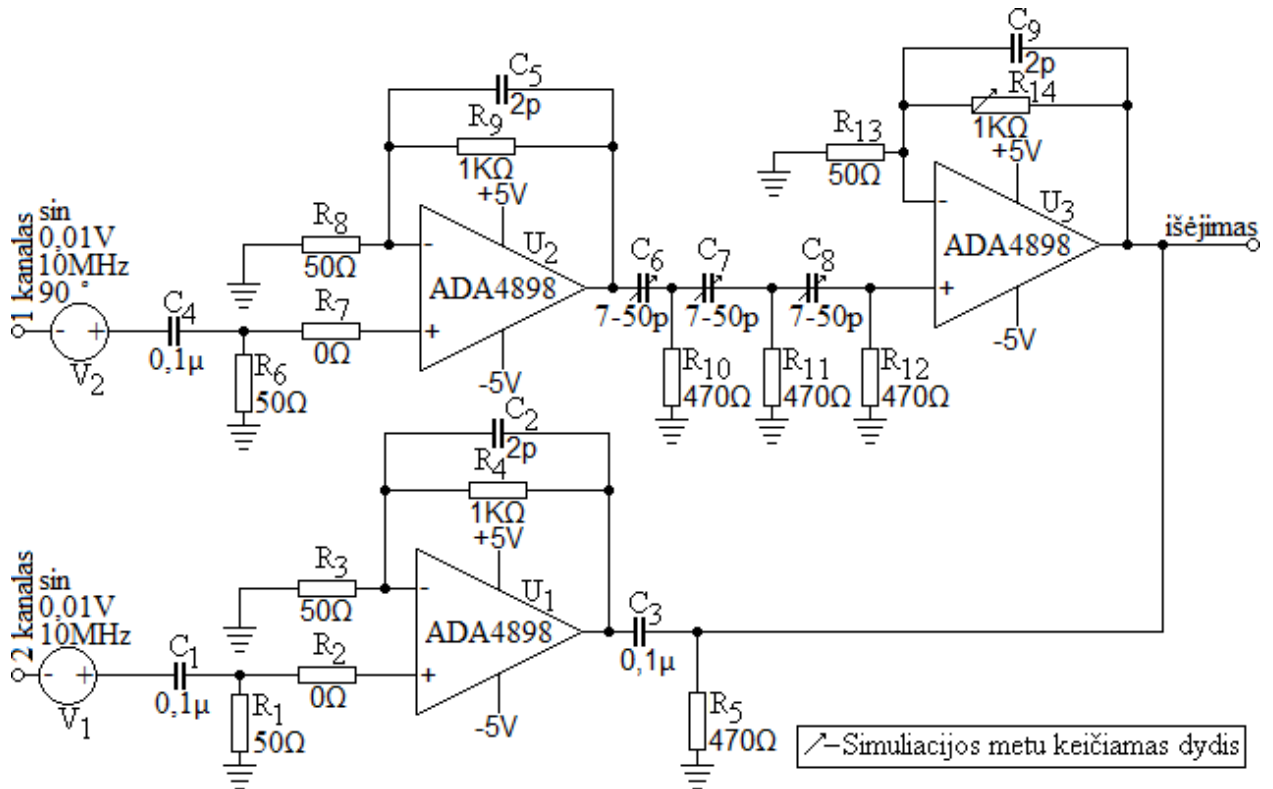
21 pav. Dažninė amplitudinė charakteristika išmatuota ir apskaičiuota stiprintuvo ADA4898 mikroschemos pagrindu

Modeliavimo ir eksperimento rezultatų nesutapimą, galima paaiškinti tuo, kad atliekant modeliavimą programinė įranga skaičiavimus atlieka idealioms sąlygoms. Neįvertinta aplinkos temperatūra, pasyviųjų elementų savybės.

3.3 Dviejų kanalų stiprintuvo modeliavimas

Kaip matyti iš modeliavimo rezultatų aptartų 2.2.3 skyriuje, darbui su aukštesniais dažniais reikalingas stiprinimo koeficiento mažinimas. Kad kompensuoti šį parametą reikalingos papildomos stiprinimo pakopos. Stiprinimo koeficientą galima padidinti, nemažinant dažnių juostos, naudojant CMUT keitiklio esamų dviejų kanalų sumavimą. Tam reikalingas fazės pasukimas. Signalų priėmimo trakto parametru pagerinimui, buvo sudaryta dviejų kanalų signalo stiprinimo ir sumavimo schema ir atlikti skaičiavimai.

Naudojant šią schemą priimami signalai paduodami į du stiprintuvo įėjimus, tarp šių signalų, dėl CMUT konstrukcijos yra 90° fazės skirtumas. Fazių suvienodinimui po pirmo stiprintuvo naudojamas fazės pasukimo blokas, sudarytas iš pasyviųjų elementų. Šis blokas slopina signalą, todėl reikalingos papildomos stiprinimo pakopos signalų amplitudžių suvienodinimui ir papildomam stiprinimui. Tokio stiprintuvo schema pateikiama 22 pav.



22 pav. Dviejų kanalų signalų stiprinimo ir sumavimo sistemos schema

Šio stiprintuvo sistemos pagrindiniai elementai:

1. 2 kanalo stiprintuvas — analogiškas 2.2 skyriuje nagrinėtam stiprintuvui, jo pagrindiniai elementai yra:
 - V_1 — 2 kanalo įeinančio signalo šaltinis. Jo fazės kampas yra 0° .

- R_3, R_4 — varžos reguliuojančios stiprintuvo U_1 stiprinimo koeficientą.
2. 1 kanalo stiprintuvas U_2 , jo pagrindiniai elementai yra:
- V_2 — 1 kanalo įeinančio signalo šaltinis. Jo fazės kampas yra 90° .
 - R_8, R_9 — varžos reguliuojančios stiprintuvo U_2 stiprinimo koeficientą.
3. Fazės postūmio blokas:
- C_6, R_{10} — pirmasis fazės postūmio elementas.
 - C_7, R_{11} — antrasis fazės postūmio elementas.
 - C_8, R_{12} — trečiasis fazės postūmio elementas.
4. Papildoma stiprinimo pakopa:
- R_{13}, R_{14} — varžos reguliuojančios stiprintuvo U_3 stiprinimo koeficientą.

3.3.1 Dviejų kanalų stiprintuvo schemos veikimo principas

Signalas atėjęs per pirmąjį kanalą yra sustiprinamas stiprintuvo U_2 , signalas atėjęs per antrąjį kanalą yra sustiprinamas stiprintuvo U_1 . Pirmojo ir antrojo kanalo signalai yra vienodo dažnio ir amplitudės, bet tarp jų yra 90° fazės skirtumas. Jeigu fazės skirtumas nebūtu sulyginamas, sumuojamo signalo amplitudė būtų slopinama. Dėl šio priežasties yra reikalingas fazės postūmio blokas. Fazės postūmio bloką sudaro C_6, C_7, C_8 keičiamo dydžio kondensatoriai ir R_{10}, R_{11}, R_{12} varžos. Kadangi fazės postūmio blokas slopina signalą, reikalingas stiprintuvas U_3 , kad po fazės postūmio susilpnėjusi signalą vėl galima būtų sustiprinti. Signalas turi būti stiprinamas tiek, kad pirmojo ir antrojo kanalų signalų amplitudės sutaptų. Po šio stiprintuvo signalai yra sumuojami.

3.3.2 Fazės kampo postūmio skaičiavimas ir sistemos modeliavimas

Norint pasukti signalo fazės kampą, reikia apskaičiuoti C_6, C_7 ir C_8 talpų dydžius. Talpų dydžiai turi būti tokie, kad signalo fazė būtų pasukta 90° . Kadangi fazės postūmiui naudojamas blokas iš trijų elementų tai vienam elementui tenka 30° signalo fazės postūmis. Signalo fazės postūmiui skaičiuoti naudojama lygtis:

$$\varphi = \frac{180}{\pi \cdot \arctan \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot F \cdot C}{R} \right)}; \quad (4)$$

Čia, φ — fazės posūkio kampas, F — signalo dažnis, C — talpos dydis, R — varžos dydis.

Paskaičiuotų kondensatorių C_6 , C_7 , C_8 vertės ir jų postūmių kampai, esant skirtingiems signalo dažniams, pateikiamos lentelėje 3.

3 lentelė

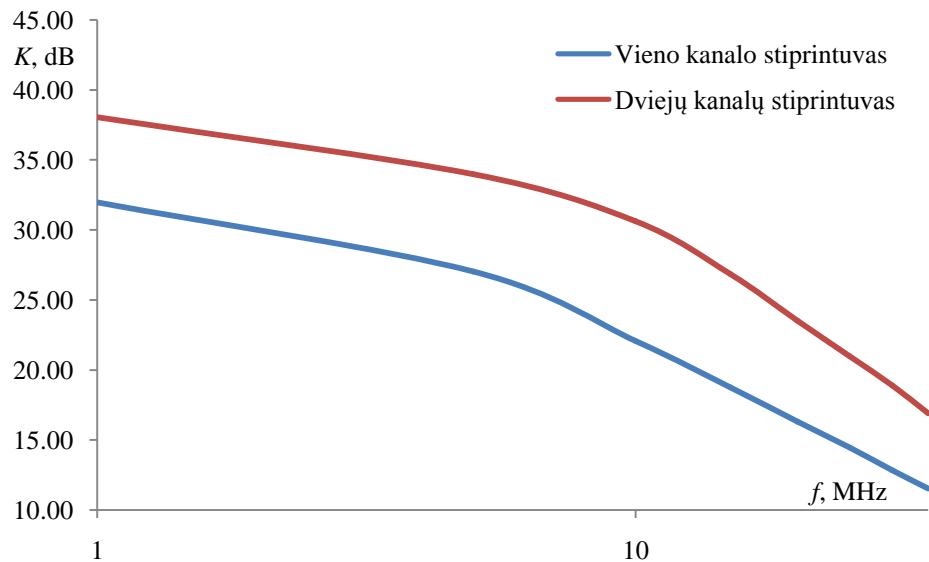
Kondensatorių C_6 , C_7 , C_8 vertės ir jų postūmių kampai

Dažnis	C_6	Postūmis	C_7	Postūmis	C_8	Postūmis	Bendras
1 MHz	590 pF	29,9°	590 pF	29,9°	580 pF	30,3°	90,1°
5 MHz	120 pF	29,4°	120 pF	29,4°	112 pF	31,2°	90°
10 MHz	59 pF	29,9°	59 pF	29,9°	58 pF	30,3°	90,1°
15 MHz	39 pF	30,1°	39 pF	30,1°	39,3 pF	29,9°	90,1°
20 MHz	30 pF	29,4°	30 pF	29,4°	28 pF	31,2°	90°
25 MHz	23 pF	30,5°	23 pF	30,5°	24,5 pF	28,9°	89,9°
30 MHz	19,5 pF	30,1°	19,5 pF	30,1°	19,7 pF	29,8°	90°
35MHz	16,8 pF	29,9°	16,8 pF	29,9°	16,7 pF	30,1°	89,9°

Kaip ir nagrinėjant vieno kanalo stiprintuvo sistemą, taip ir su dviejų kanalų sistema modeliavimas buvo atliekamas su LTspice programa. Paskaičiuota fazės postūmiui reikiami talpų C_6 , C_7 , C_8 dydžiai esant dažniams nuo 1 MHz iki 35 MHz. Sudarius sistemos modelį, programos pagalba atliekamas tokios sistemos amplitudinės dažninės charakteristikos tyrimas.

Tyrimas atliekamas, paduodant į pirmą ir antrą kanalus signalus nuo 1 MHz iki 35 MHz tarp kurių fazės skirtumas yra 90°. Talpų dydžiai C_6 , C_7 , C_8 yra keičiami priklausomai nuo to kokio dažnio yra įvedamas signalas. Reguluojamas varžos R_{14} dydis, norint suvienodinti išeinančių signalų amplitudes. Reguluojamos varžos R_4 ir R_9 norint praplėsti dažnių pralaidumo juostą. Programos oscilografu stebima išeinančio signalo oscilograma. Nusistovėjus išeinančiam signalui pagal oscilogramos parodymus stebimas ir registruojamas amplitudės dydis. Stiprinimo koeficientas į dB paskaičiuojamas, naudojantis formule (3).

Dviejų kanalų su fazės pasukimu priėmimo trakto dažninė amplitudinė charakteristika pateikiama 23 pav.



23 pav. Vieno ir dviejų kanalų stiprintuvų, dažninės amplitudinės charakteristikos palyginimas

Pagal grafiką galima daryti išvadą, kad naudojant dviejų kanalų stiprintuvą su signalų sumavimu galima gauti iki 10 dB stipresnį signalą negu su tokių pačių parametrų vieno kanalo signalo stiprinimo atveju. Tokio tipo stiprintuvas yra tinkamesnis darbui aukštesnio dažnio diapazone.

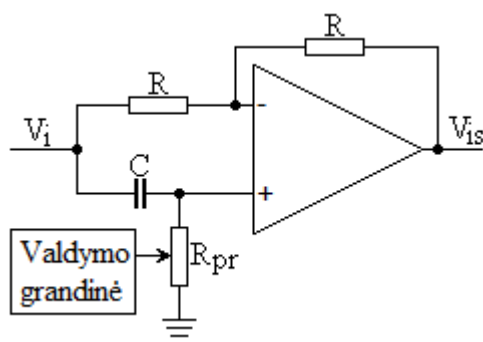
3.4 Dviejų kanalų stiprintuvas su automatinio fazės postūmiu

3.4.1 Pastovaus dažnio sistemos

Fazės postūmis yra plačiai naudojamas įvairiose elektronikos srityse, tokiose kaip: signalų apdorojimas, komunikacija ir valdymas. Sistemos atliekančios automatinį fazės postūmį aptariamos straipsnyje [19].

Nagrinėjant dviejų kanalų stiprintuvą su fazės postūmio bloku, fazės kampo postūmis ir stiprintuvo amplitudės reguliavimas yra atliekamas rankiniu būdu. Keičiant talpos ir varžos dydžius. Automatinis fazės postūmis gali būti atliekamas keliais metodais priklausomai nuo to kokio pobūdžio tai yra sistema. Sistemose dirbančiose su pastoviu įeinančio signalo dažniu, yra naudojamos programuojamos varžos.

Fazės postūmis priklauso nuo signalo dažnio, sistemos kondensatoriaus talpos dydžio bei sistemos varžos dydžio. Norint reguliuoti fazės postūmio kampą kai yra pastovaus dažnio įeinantis signalas ir pastovaus dydžio talpą, pakanka reguliuoti varžos R_{pr} didį. Varžos reguliavimą atlieka valdymo grandinė kuri stebi įeinančio signalo fazės kampą, atitinkamai reguliuodama programuojamos varžos didį pagal užduotį kuri nusako, kokio fazės postūmio kampo reikia. Tokios sistemos principinė schema pateikiama 24pav.

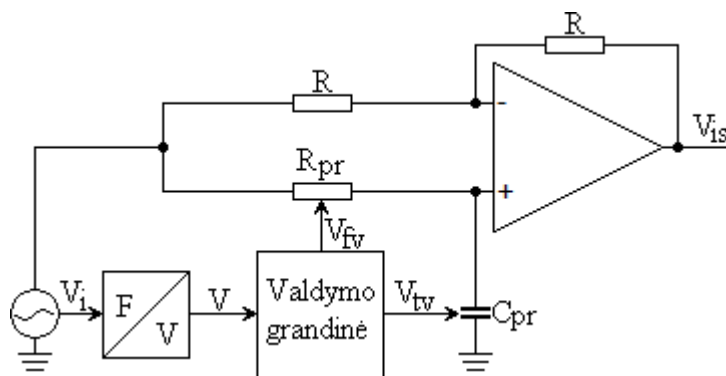


24 pav. Programuojamas fazės postūmio modulis

24pav. pateiktas programuojamas fazės postūmio modulis yra tinkamas pastovaus dažnio sistemoms. Fazės postūmį šioje sistemoje atlieka programuojama varža R_{pr} . Tokios varžos techninė charakteristika pateikiamos priede nr.2.

3.4.2 Kintančio dažnio sistemos

Signalų fazės kampas priklauso nuo: signalo dažnio, sistemos kondensatoriaus talpos dydžio ir fazės postūmį atliekančios varžos dydžio. Sistemose kuriose kinta dažnis, norint gauti tam tikrą fazės kampą, reikia reguliuoti kondensatoriaus talpos didį ir fazės kampa reguliuojančios varžos dydį. Siekiant gauti automatinį fazės postūmį pagal užduotą fazės kampą, sistema valdo programuojamą kondensatorių C_{pr} ir programuojamą varžą R_{pr} . Tokio tipo sistemos principinė schema pateikiama 25pav.



25 pav. Nuo dažnio nepriklausoma fazės postūmio bloko principinė schema.

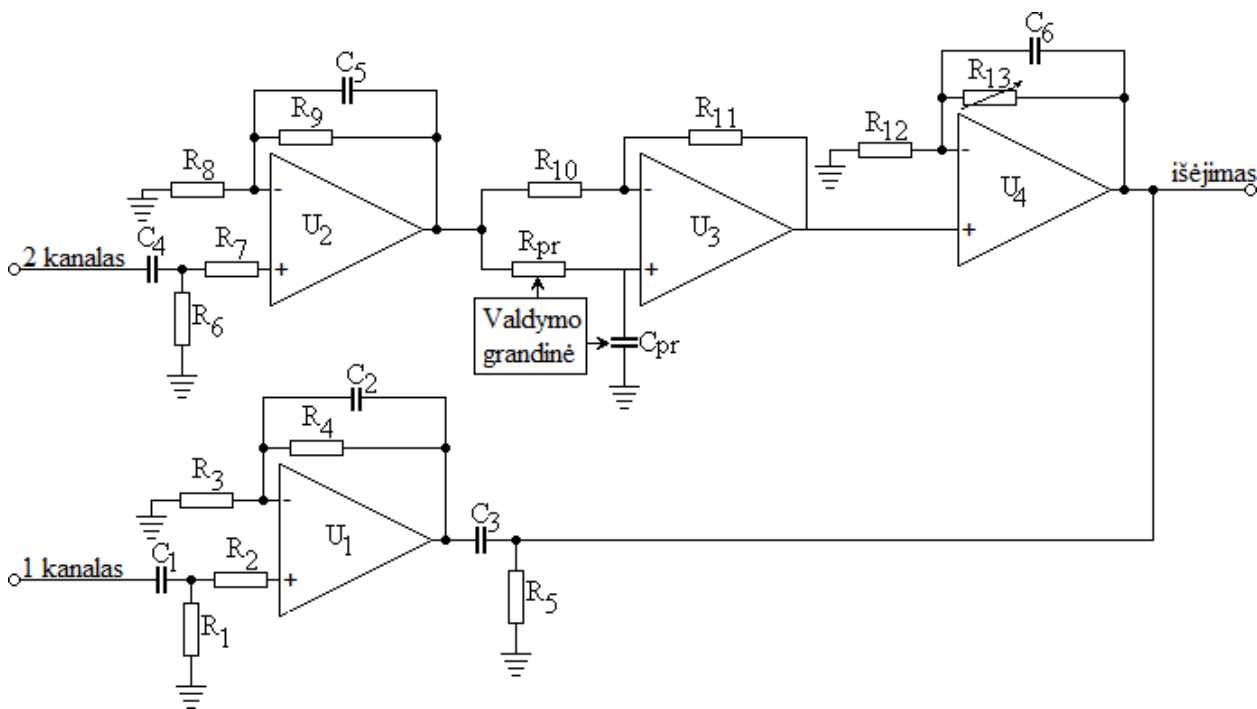
Kintančio dažnio sistemos veikimo principas yra: varža R_{pr} naudojama valdyti fazės kampui kurį reguliuoja valdymo grandinė. Programuojamas kondensatorius C_{pr} naudojamas kompensuoti dažnio svyravimams. Programuojamą kondensatorių C_{pr} valdo matavimų grandinė pagal keitiklio parodymus kuris keičia dažnį į įtampą. Pasikeitus dažniui, pasikeičia išėjimo signalas dažnio į įtampą keitiklyje - V . Matavimo grandinė gavusi pakitusius V

duomenis, pakeičia V_{IV} kuris keičia programuojamo kondensatoriaus C_{pr} talpą. Tokiu būdu kompensuojamas dažnių svyravimas.

Programuojamų kondensatorių C_{pr} charakteristikos pateikiamos priede nr.3.

3.4.3 Automatinio fazės postūmio pritaikymas dviejų kanalų stiprintuvui

Siekiant pritaikyti stiprintuvą darbui su įvairiais CMUT keitikliais kurie dirba skirtingų dažnių diapazonuose yra tikslinga naudoti stiprintuvą kuris sugebėtų automatiškai adaptuotis prie keitiklio darbinio dažnio. Kadangi keičiantis darbiniam dažniui norint sulyginti pirmojo ir antrojo kanalų fazių skirtumus, reikia, kad antrojo kanalo signalo fazė automatiškai būtų pastumiama per 90° . Kintant signalo dažniui ir norint išlaikyti tą patį fazės kampą, reikia į sistemą įdiegti programuojamą varžą ir programuojamą kondensatorių. Siūlomas sistemos modelis su automatinio fazės postūmių yra pateikiamas 26pav.



26 pav. Automatinio fazės kampo pasukimo principinė elektroninė schema.

Sistema pateikta 26pav. veikia tokiu pačiu principu kaip ir dviejų kanalų stiprintuvas. Pirmo kanalo signalas yra stiprinamas stiprintuvo U_1 pagalba. Antro kanalo signalas yra stiprinamas U_2 stiprintuvo pagalba. Kadangi tarp pirmojo kanalo signalo ir antrojo kanalo signalo yra 90° fazės skirtumas, fazės postūmį atlieka kondensatorius C_{pr} ir varža R_{pr} . Fazės postūmį atliekančius elementus valdo valdymo blokas. Dažnio įtampą keitiklis fiksuoja signalo dažnį. Pagal keitiklio įtampos parodymus valdymo blokas reguliuoja varžos R_{pr} ir talpos C_{pr} dydžius, tokiu būdu yra reguliuojamas fazės postūmis. Stiprintuvas U_3 kompensuoja signalo slopinimą kuris atsiranda dėl pasyvinių elementų fazės postūmio bloke. Stiprintuvas

U₄reikalingas tam, kad suvienodinti antrojo kanalo signalo amplitudę su pirmojo kanalo signalo amplitude.

3.4.4 Dviejų kanalų stiprintuvo su automatinio fazės postūmiu modeliavimas

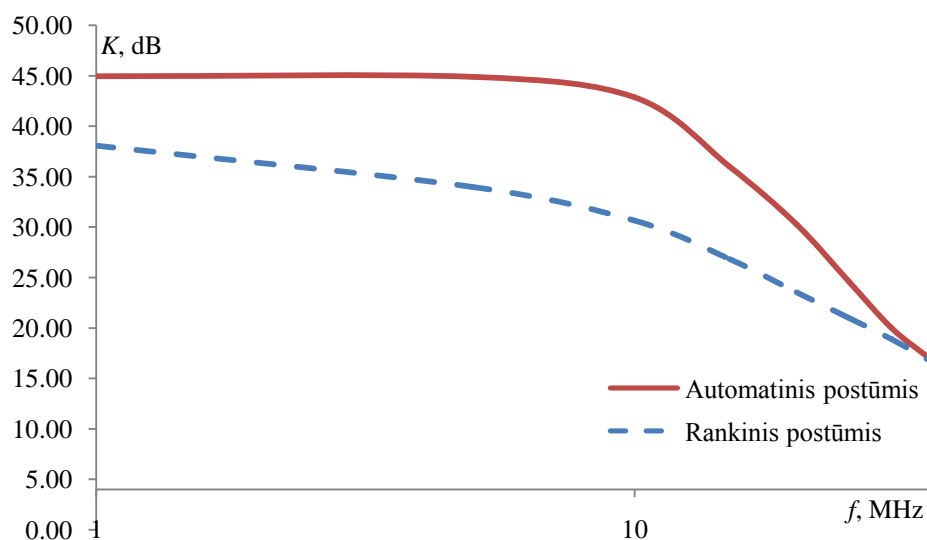
Naudojant programą LTspiceIV modeliuojamas dviejų kanalų stiprintuvas su automatinio fazės postūmiu. Modeliuojant į pirmąjį ir antrąjį kanalus paduodamas nuo 1 MHz iki 35 MHz signalas. Tarp pirmojo ir antrojo kanalų signalų yra 90° fazės kampo skirtumas. Matuojamas nusistovėjusio išeinančio signalo stiprumas naudojantis oscilografu. Oscilogramos duomenys pateikiamidB. Stebima ir sudaroma tokio tipo stiprintuvo amplitudinė dažninė charakteristika. Paskaičiuotos varžos R_{pr} ir kondensatoriaus talpos C_{pr} vertės pateikiamos 4 lentelėje.

4 lentelė

Varžos R_{pr} ir kondensatoriaus C_{pr} , vertės ir jų postūmių kampai

Dažnis	R_{pr}	C_{pr}	Postūmis
1MHz	50Ω	8 pF	90°
5MHz	50 Ω	1 pF	90°
10MHz	20Ω	2 pF	90°
15MHz	10Ω	2 pF	90°
20MHz	30Ω	0,2 pF	90°
25MHz	20Ω	0,2pF	90°
30MHz	10Ω	0,4 pF	90°
35MHz	20 Ω	0,1 pF	90°

Dažninės amplitudinės charakteristikos grafikas pateikiamas 27pav.



27 pav. Dviejų kanalų stiprintuvo su automatinio fazės postūmiu dažninė amplitudinė charakteristika.

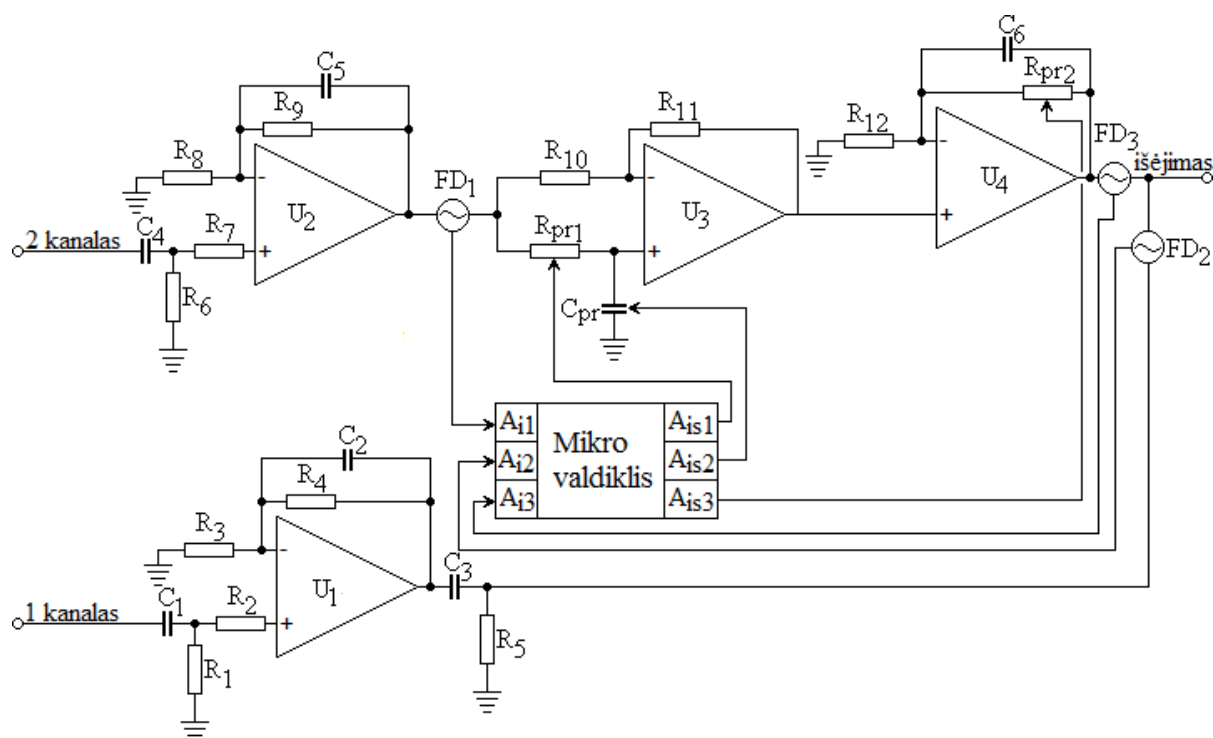
Pagal grafika galime daryti išvadą, kad tokio tipo stiprintuvas plačiame dažnių diapazone nuo 1 MHz iki 15 MHz išlaiko pastovų išeinančio signalo stiprinimą (apie 45 dB). Signalas stiprinamas ir platesniame dažnių diapazone. Signalo stiprinimas yra apie 17dB prie 35 MHz.

Stiprintuvas turintis tokius parametrus yra tinkamas darbui su įvairios konstrukcijos CMUT, kurie dirba įvairių dažnių diapazonuose. Praktinis tokių stiprintuvų naudojamas gali būti dujų ar skysčių analizės aparatai, kuriuose galētu būti naudojama keletas skirtingos konstrukcijos CMUT.

3.5 Dviejų kanalų stiprintuvo su automatinu fazės postūmiu valdymas

3.5.1 Sistemos modelis

Dviejų kanalų stiprintuvą su fazės postūmiu valdanti sistema galētu susidaryti iš programuojamo mikro valdiklio kuris turētu tris analoginius įėjimus ir tris analoginius išėjimus. Vieno signalo dažnį ir fazės kampą stebinčio prietaiso. Dviejų signalo amplitudę stebinčių prietaisų. Dviejų programuojamu varžų ir vienos programuojamos talpos. Tokio valdymo sistemos principinė schema pateikiama 28pav.



28 pav. Dviejų kanalų stiprintuvo su automatinu fazės postūmiu valdymu, principinė schema.

Dviejų kanalų stiprintuve automatinį fazės postūmį atlieka programuojamas mikrovaldiklis. Sistemos valdymo principas pagrįstas, trijų analoginių įėjimų parametrų fiksavimu ir trijų analoginių išėjimų valdymu, pagal gautus duomenis iš analoginių įėjimų.

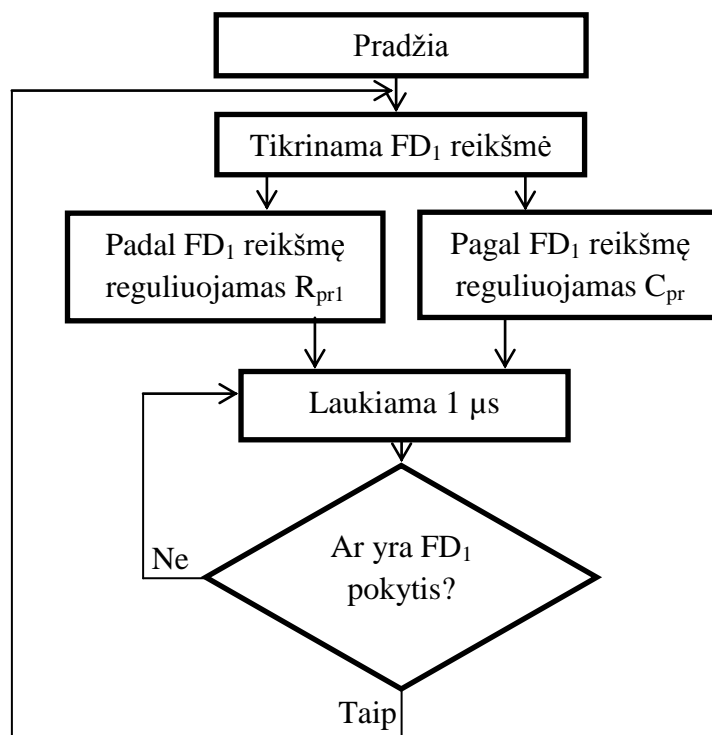
3.5.2 Valdymo sistemos darbas

Mikrovaldiklio (28pav.) analoginis įėjimas A_{i1} , stebi antrojo kanalo signalo dažnį. Signalo dažnis esantis taške FD_1 , keitiklio pagalba yra keičiamas į įtampą. Kadangi fazių skirtumas tarp pirmojo ir antrojo kanalų dėl CMUT konstrukcijos visada yra 90° . Valdikliui galima sudaryti A_{i1} įtampos reikšmių sąrašą, prie kurių valdiklis žino koks yra įeinantis dažnis. Pagal A_{i1} reikšmę valdiklis atitinkamai valdo A_{is1} analoginį išėjimą kuris valdo programuojamą varžą R_{pr1} . Varža R_{pr1} atlieka fazės postūmi per 90° . Taip pat pagal A_{i1} reikšmę yra valdomas analoginis išėjimas A_{is2} . A_{is2} valdo kondensatorių C_{pr} . Kondensatorius C_{pr} yra naudojamas tam, kad kompensuoti dažnio virpesius.

Mikrovaldiklio analoginis įėjimas A_{i2} naudojamas fiksuoti pirmojo kanalo signalo amplitudei po stiprintuvo U_1 taške FD_2 . Mikrovaldiklio analoginis įėjimas A_{i3} naudojamas fiksuoti antrojo kanalo signalo amplitudei po stiprintuvo U_4 taške FD_3 . Mikrovaldiklis lygina A_{i2} ir A_{i3} dydžius, esant A_{i3} mažiau už A_{i2} , A_{is3} didina varžos R_{pr2} dydi taip, kad A_{i3} ir A_{i2} butu lygus. Ir atvirkščiai jai A_{i3} daugiau už A_{i2} , A_{is3} mažina varžos R_{pr2} dydi taip, kad A_{i3} ir A_{i2} butu lygus. Analoginis išėjimas A_{is3} valdo varžos R_{pr2} didį pagal analoginių įėjimų A_{i2} ir A_{i3} parodymus taip, kad pirmojo ir antrojo kanalų signalų amplitudės būtų vienodos.

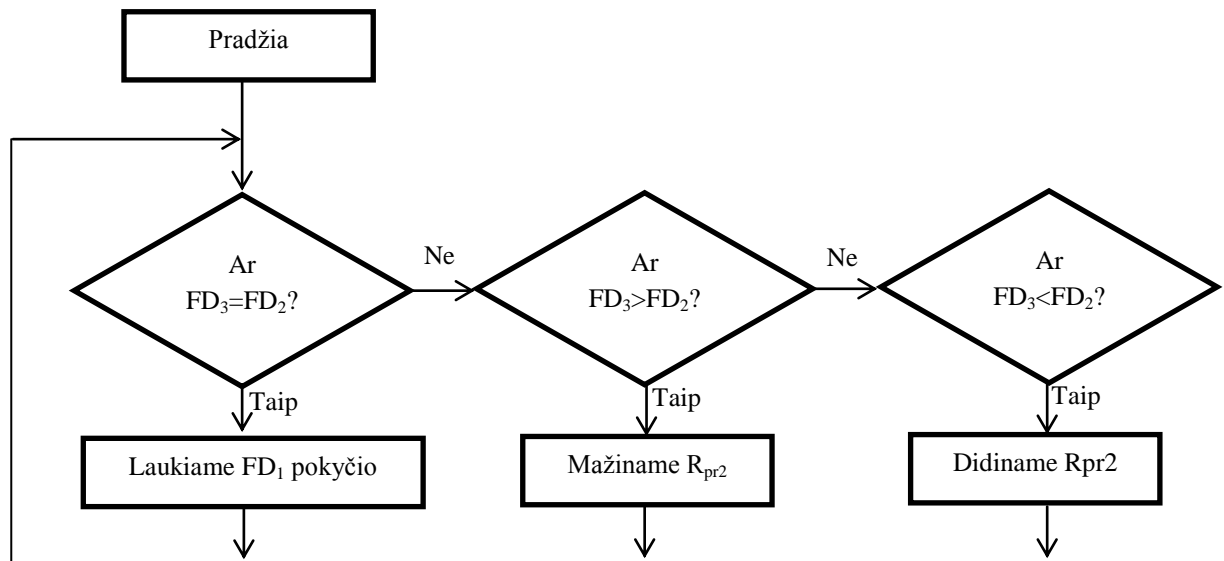
3.5.3 Mikrovaldiklio valdymo algoritmai

Fazės postūmį valdantis algoritmas pateikiamas 29 pav.



29 pav. Fazės postūmį valdantis algoritmas.

Išeinančių pirmojo ir antrojo signalų amplitudžių sulyginimo algoritmas 30 pav.



30 pav. Stiprintuvo U_4 stiprinimo koeficientą reguliuojantis algoritmas.

Išvados:

1. Sumodeliavus ir eksperimentiškai ištyrus žemo triukšmingumo stiprintuvą, matyti, kad tokio tipo stiprintuvai yra tinkami darbui su CMUT paviršinių akustinių bangų keitikliais. Pakeitus vieno kanalo stiprintuvą į dviejų kanalų stiprintuvą su fazės postūmiu galima pasiekti ne tik geresnę signalo kokybę, bet ir praplėsti dažnio pralaidumo juostą. Tai yra aktualiu nagrinėjamiems CMUT, dirbantiems kaip paviršinių akustinių bangų filtrai.
2. Stiprintuvai su mikrovaldikliu yra tinkami darbui su įvairios konstrukcijos CMUT, kurie dirba įvairių dažnių diapazonuose. Praktinis tokių stiprintuvų naudojimas gali būti dujų ar skysčių analizės aparatai, kuriuose gali būti naudojama keletas skirtingos konstrukcijos CMUT.

IŠVADOS

1. ADA4898 mikroschemos pagrindu realizuoto stiprintuvo santykis signalas/triukšmas 72 dB yra žymiai geresnis už stiprintuvo su diskretiniais elementais (32 dB). Konstrukcija operaciniu ADA4898 stiprintuvu sudaro galimybes priimti ir apdoroti silpnus signalus.
2. Dviejų kanalų stiprintuvo realizacija su vieno kanalo fazės pasukimu, papildoma stiprinimo pakopa signalų amplitudės kompensavimui ir sumavimu, leidžia gauti iki 10 dB stipresnę signalą negu vieno kanalo signalo stiprinimo atveju. Tokia konstrukcija gali būti pritaikyta darbui aukštesnių dažnių zonoje.
3. Stiprintuvai su automatiniu fazės postūmiu, plačiame dažnių diapazone nuo 1 MHz iki 15 MHz išlaiko pastovų išeinančio signalo stiprinimą (apie 45 dB). Signalas stiprinamas ir platesniame dažnių diapazone. Signalų stiprinimas yra apie 17dB prie 35 MHz.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. G. Vanagas, Struktūrinių medžiagų savybių įtaka mikroelektromechaninių sistemų funkciniam parametrams, Kaunas 2012, p. 10 – 15.
2. M. I. Haller, B. T. Khuri-Yakub, A surfacemicromachinedelectrostaticultrasonicairtransducer, IEEE UltrasonicsSymposium, 1994.
3. X. Jin, O. Oralkan, F. L. Degertekin, B. T. Khuri-Yakub, Fabricationandcharacterizationofsurfacemicromachinedultrasonicimmersiontransducer, IEEE TransactionsonUltrasonics, Ferroelectrics, andFrequencyControl, 2001 vol. 48, no. 3.
4. A.S. Ergun, Y. Huang, X. Zhuang, O. Oralkan, G.G. Yaraloglu, B.T. Khuri-Yakub. Capacitivemicromachinedultrasonictransducers: fabricationtechnology. IEEE TransactionsonUltrasonics, FerroelectricsandFrequencyControl, 2005, vol. 52, no. 12, p. 2242–2258.
5. X. Jin, I. Ladabaum, B. T. Khuri-Yakub. Themicrofabricationofcapacitiveultrasonictransducers, JournalofMicromechanicalSystems, 1998 vol. 7, no. 3, p. 295 – 302.
6. R.J. Dickinson, R.I. Kitney, Miniatureultrasonicprobeconstructionforminimalaccesssurgery, PhysicsinMedicineandBiology, 2004, vol. 49, p. 3527–3538.
7. J. Strole, A novelflexcircuitarea – arrayinterconnectsystemfor a catheter – basedultrasoundtransducer, IMAPS, 2002.
8. I. Ladabaum, X.C. Jin, H.T. Soh, A. Atalar, and B.T. Khuri-Yakub. Surfacemicromachinedcapacitiveultrasonictransducers. IEEE TransactionsonUltrasonics, FerroelectricsandFrequencyControl, 1999, vol.45, no.3, p. 678–690.
9. X. Zhuang, Two-dimensionalcapacitivemicromachinedultrasonictransducer (CMUT) arraysfor a miniatureintegratedvolumetricultrasonicimagingssystem, Proceedingsof SPIE, 2005, vol. 5750, p. 37–46.
10. I.O. Wygant, X. Zhuang, D. T. Yeh, O. Oralkan, S. Ergun, M. Karaman, B. T. Khuri-Yakub, Integrationof 2D CMUT ArrayswithFront-End Electronics forVolumetricUltrasoundImaging, IEEE transactionsonultrasonics, ferroelectrics, andfrequencycontrol, 2008, vol. 55, no. 2, p. 327–342.
11. K. K. Park, H. J. Lee, G. G. Yaralioglu, A. S. Ergun, O. Oralkan, M. Kupnik, C. F. Quate, B. T. Khuri-Yakub, T. Braun, J. P. Ramseyer, H. P. Lang, M. Hegner, Ch. Gerber, J. K.

- Gimzewski, Capacitivemicromachinedultrasonictransducersforchemicaldetectioninnitrogen, *AppliedPhysicsLetters*, 2007, vol. 91, no.9.
12. J. Lieneman, Complexityreductiontechniquesforadvanced MEMS actuatorssimulation, *Ph.D. thesis, InstitutfurMikrosystemtechnik (IMTEK)*, 2006.
 13. M. F. Ashby, *MaterialsSelectioninMechanicalDesign*, Oxford, U.K.: Butterworth – Heinemann, 2005, 603 p.
 14. N. C. MacDonald, L. Y. Chen, J. J. Yao, Z. L. Zhang, J. A. McMillan, D. C. Thomas, K. R. Haselton, Selectivechemicalvapordepositionoftungstenformicroelectromechanicalstructures, *Sens. Actuators*, 1989, vol. 20, p. 123–133.
 15. Sapeliauskas E., Barauskas D., Vanagas G., Virzonis D. SurfacemicromachinedCMUTsforliquidphasesensing. 2014 IEEE internationalultrasonicssymposium, September 3-6, 2014, Chicago, Illinois, USA: proceedings, p. 2580-2583. ISBN 9781479970490.
 16. H. Urzędniczok, J. Jakubik, “Investigationsoftemperatureinfluenceon SAW transducerbasedgassensors”, *Elektronika*, vol. 6/2008, p. 77-79
 17. R. F. Scmitt, J. W. Allen, R. Wright, „Rapiddesignof SAW oscillatorelectronicsforsensorapplications“, *SensorsandActuators B*, 3734, p. 1-6, 2001
 18. S. Lisauskas. *Automatinio valdymo teorija: kursinių projektų rengimo metodika*. Vilnius: Technika, 2012. p. 88-108.
 19. Munir A. Al-Absi. A simplelowcostfrequency-independentphaseshifter. *TheArabianJournalforScienceandEngineering*, April 2009, vol. 34, no. 1B

1 priedas



High Voltage, Low Noise, Low Distortion, Unity-Gain Stable, High Speed Op Amp

Data Sheet

ADA4898-1/ADA4898-2

FEATURES

- Ultralow noise**
 - 0.9 nV/√Hz
 - 2.4 pA/√Hz
 - 1.2 nV/√Hz at 10 Hz
- Ultralow distortion: -93 dBc at 500 kHz**
- Wide supply voltage range: ±5 V to ±16 V**
- High speed**
 - 3 dB bandwidth: 65 MHz (G = +1)
 - Slew rate: 55 V/μs
- Unity gain stable**
- Low input offset voltage: 160 μV maximum**
- Low input offset voltage drift: 1 μV/°C**
- Low input bias current: -0.1 μA**
- Low input bias current drift: 2 nA/°C**
- Supply current: 8 mA**
- Power-down feature for single 8-lead package**

APPLICATIONS

- Instrumentation
- Active filters
- DAC buffers
- SAR ADC drivers
- Optoelectronics

GENERAL DESCRIPTION

The ADA4898-1/ADA4898-2 are ultralow noise and distortion, unity gain stable, voltage feedback op amps that are ideal for use in 16-bit and 18-bit systems with power supplies from ±5 V to ±16 V. The ADA4898-1/ADA4898-2 feature a linear, low noise input stage and internal compensation that achieves high slew rates and low noise.

With the wide supply voltage range, low offset voltage, and wide bandwidth, the ADA4898-1/ADA4898-2 are extremely versatile, and feature a cancellation circuit that reduces input bias current.

The ADA4898-1/ADA4898-2 are available in an 8-lead SOIC package that features an exposed metal paddle to improve power dissipation and heat transfer to the negative supply plane. This EPAD offers a significant thermal relief over traditional plastic packages. The ADA4898-1/ADA4898-2 are rated to work over the extended industrial temperature range of -40°C to +105°C.

CONNECTION DIAGRAM

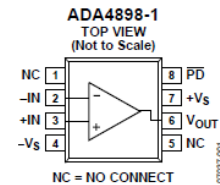


Figure 1. Single 8-Lead ADA4898-1 SOIC_N_EP (RD-8-1)

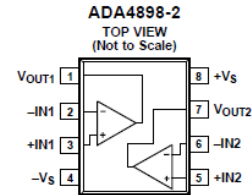


Figure 2. Dual 8-Lead ADA4898-2 SOIC_N_EP (RD-8-2)

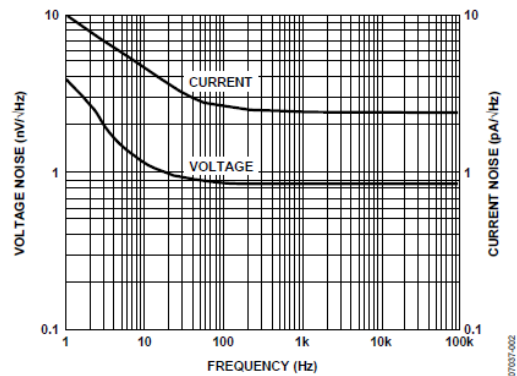


Figure 3. Input Voltage Noise and Current Noise vs. Frequency

Rev. E Document Feedback
 Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications subject to change without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

±5 V SUPPLY

$T_A = 25^\circ\text{C}$, $G = +1$, $R_F = 0 \Omega$, R_C open, $R_L = 1 \text{ k}\Omega$ to GND (for $G > 1$, $R_F = 100 \Omega$), unless otherwise noted.

Table 2.

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
DYNAMIC PERFORMANCE					
-3 dB Bandwidth	$V_{OUT} = 100 \text{ mV p-p}$		57		MHz
	$V_{OUT} = 2 \text{ V p-p}$		12		MHz
Bandwidth for 0.1 dB Flatness	$G = +2$, $V_{OUT} = 2 \text{ V p-p}$		3		MHz
Slew Rate	$V_{OUT} = 2 \text{ V step}$		50		V/ μs
Settling Time to 0.1%	$V_{OUT} = 2 \text{ V step}$		90		ns
NOISE/DISTORTION PERFORMANCE					
Harmonic Distortion SFDR	$f = 100 \text{ kHz}$, $V_{OUT} = 2 \text{ V p-p}$		-110		dBc
	$f = 500 \text{ kHz}$, $V_{OUT} = 2 \text{ V p-p}$		-95		dBc
	$f = 1 \text{ MHz}$, $V_{OUT} = 2 \text{ V p-p}$		-78		dBc
Input Voltage Noise	$f = 1 \text{ kHz}$		0.9		nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Input Current Noise	$f = 1 \text{ kHz}$		2.4		pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$
DC PERFORMANCE					
Input Offset Voltage	$R_F = 1 \text{ k}\Omega$, see Figure 43		30	160	μV
Input Offset Voltage Drift	$R_F = 1 \text{ k}\Omega$, see Figure 43		1		$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Input Bias Current	$R_F = 1 \text{ k}\Omega$, see Figure 43		-0.1	-0.5	μA
Input Bias Offset Current	$R_F = 1 \text{ k}\Omega$, see Figure 43		0.05	0.3	μA
Input Bias Current Drift	$R_F = 1 \text{ k}\Omega$, see Figure 43		2		nA/ $^\circ\text{C}$
Open-Loop Gain	$V_{OUT} = \pm 1 \text{ V}$	87	94		dB
INPUT CHARACTERISTICS					
Input Resistance	Differential mode		5		k Ω
	Common mode		30		M Ω
Input Capacitance	Differential mode		3.2		pF
	Common mode		2.5		pF
Input Common-Mode Voltage Range	See Figure 43		-3 to +2.5		V
Common-Mode Rejection Ratio	$\Delta V_{CM} = 1 \text{ V p-p}$	-102	-120		dB
PD (POWER-DOWN) PIN (ADA4898-1)					
$\overline{\text{PD}}$ Input Voltages	Chip powered down		≤ -4		V
	Chip enabled		≥ -3		V
$\overline{\text{PD}}$ Turn On Time	$V_{OUT} = 100 \text{ mV p-p}$		100		ns
$\overline{\text{PD}}$ Turn Off Time	$V_{OUT} = 100 \text{ mV p-p}$		20		μs
Input Leakage Current	$\overline{\text{PD}} = +V_S$		0.1		μA
	$\overline{\text{PD}} = -V_S$		-2		μA
OUTPUT CHARACTERISTICS					
Output Voltage Swing	$R_L // (R_F + R_C) = 500 \Omega$, see Figure 43	± 3.1	± 3.2		V
	$R_L // (R_F + R_C) = 1 \text{ k}\Omega$, see Figure 43	± 3.3	± 3.4		V
Linear Output Current	$f = 100 \text{ kHz}$, SFDR = -70 dBc, $R_L = 150 \Omega$		8		mA
Short-Circuit Current	Sinking/sourcing		150		mA
Off Isolation	$f = 1 \text{ MHz}$, $\overline{\text{PD}} = -V_S$		80		dB
POWER SUPPLY					
Operating Range		± 4.5		± 16.5	V
Quiescent Current Per Amplifier	$\overline{\text{PD}} = +V_S$		7.5	8.4	mA
	$\overline{\text{PD}} = -V_S$		0.1	0.2	mA
Positive Power Supply Rejection Ratio	$+V_S = 5 \text{ V to } 7 \text{ V}$, $-V_S = -5 \text{ V}$	-95	-100		dB
Negative Power Supply Rejection Ratio	$+V_S = 5 \text{ V}$, $-V_S = -5 \text{ V to } -7 \text{ V}$	-97	-104		dB

2 priedas

Stiprintuvo ADA4898 modelio Spice aplinkoje kodas

```
* ADA4898 SPICE Macro-model
* Description: Amplifier
* GenericDesc: HghVltgUntyGnStbl, LwNoise, HiSpd
* Developedby:
* RevisionHistory: 08/10/2012 - Updated to newheaderstyle
*
* Copyright 2012 byAnalogDevices, Inc.
*
* Refer to
http://www.analog.com/Analog_Root/static/techSupport/designTools/spiceModels/license/spice
_general.html forLicenseStatement. Useofthismodel
* indicatesyouracceptanceofthetermsandprovisionsintheLicenseStatement.
*
* BEGIN Notes:
*
* NotModeled:
*
* Parametersmodeledinclude:
*
* END Notes
*
* Nodeassignments
      +IN      -IN      Vcc      Vee      Out
.subckt ADA4898 1      2      99      50      4

***DifferentialStage

Q1  13      12      14      npn
Q2  17      2      16      npn
Rc1 98      13      Rideal  7.200E-01
Rc2 98      17      Rideal  7.200E-01
Re1 14      15      Rideal  7.148E-01
Re2 15      16      Rideal  7.148E-01
Ibias 15      51      1.00E+01
Dcmlim1      18      15      DQUIET

Vcmlim1      18      51      3.026

***VoltageNoiseGeneration

HVnoise      12      7      Vvnoise      1
VVnoise      501      0      0
DVnoise      501      0      Dvnoise
RVnoise      501      0      0.020444444

***CurrentNoiseGenerationon +IN
```

FInoise1	12	0	VInoise1	1
VInoise1	502	0	0	
DInoise1	502	0	DInoise1	
RInoise1	502	0	2875	
***CurrentNoiseGenerationon -IN				
FInoise2	2	0	VInoise2	1
VInoise2	503	0	0	
DInoise2	503	0	DInoise2	
RInoise2	503	0	2875	
***CommonModeInjection				
Rcm11	601	Rideal	100Meg	
Rcm22	601	Rideal	100Meg	
Gcmr0	602	601	75	1.00E-06
Rcmr1	602	603	Rideal	1Meg
Rcmr2	603	604	Rideal	5.012E-01
Lcmr 604	0	7.977E-04		
Ecmr 10	9	603	0	1.000E+00
***Positive Power SupplyRejection				
Epsr1700	0	98	0	1
Rpsr1700	701	Rideal	1.00E+02	
Rpsr2701	702	Rideal	4.467E-04	
Lpsr1702	0	3.555E-09		
Epsr211	10	701	0	1
***Negative Power SupplyRejection				
Epsr3703	0	51	0	1
Rpsr3703	704	Rideal	1.00E+02	
Rpsr4704	705	Rideal	1.995E-04	
Lpsr2705	0	1.588E-09		
Epsr412	11	704	0	1
***InputOffsetandBias				
Vos 1	7	2.000E-05		
Ios 1	2	1.500E-08		
***InputImpedance				
Cinv 2	0	8.00E-13		
Cninv	1	0	8.00E-13	
***1st GainandSlewlmiting				
Gslew	0	101	17	13 1.0000E+00
Rslew	101	0	Rideal	2.50E+02
Dslew1	101	102	DZENER	
Dslew2	0	102	DZENER	

***SecondGainand Dominant Pole withOutputVoltageLimiting

Gp1	51	201	101	0	2.663E-06	
Rp1	201	51	Rideal	2.122E+08		
Cp1	201	51	1.50E-12			
Vlim1		97	206	3.45		
Dlim1		201	206	dquiet		
Vlim2		207	52	3.95		
Dlim2		207	201	dquiet		
Esupref1		97	98	51	0	1
Esupref2		52	51	51	0	1

***Second Pole

Gp2	0	202	201	51	1.00E-03	
Rp2	202	0	Rideal	1.00E+03		
Cp2	202	0	1.59155E-16			

***Third Pole

Gp3	0	203	202	0	1.00E-03	
Rp3	203	0	Rideal	1.00E+03		
Cp3	203	0	1.59155E-16			

***Fourth Pole

Gp4	0	204	203	0	1.00E-03	
Rp4	204	0	Rideal	1.00E+03		
Cp4	204	0	1.59155E-16			

***Fifth Pole

Gp5	0	205	204	0	1.00E-03	
Rp5	205	0	Rideal	1.00E+03		
Cp5	205	0	1.592E-16			

***FirstZero

Gz1	0	301	205	0	1.00E-03	
Rz1	301	302	Rideal	1.00E+03		
Lz1	302	0	1.592E-10			

***SecondZero

Gz2	0	303	301	0	1.00E-03	
Rz2	303	304	Rideal	1.00E+03		
Lz2	304	0	1.592E-10			

***ThirdZero

Gz3	0	305	303	0	1.00E-03	
Rz3	305	306	Rideal	1.00E+03		
Lz3	306	0	1.59E-10			

***Buffer

Gbuf	0	401	305	0	1.00E-04	
Rbuf	401	0	Rideal	1.00E+04		

***Outputwithcurrentlimiting

Eout	404	0	401	0	1.000E+00	
Rout	404	405	RIDEAL	1.000E+00		

Lout	405	406	1.00E-19	
Cout	406	0	1.00E-22	
Voutmon	406	4	0	
Dout1	401	407	Dquiet	
Vout1	407	406	-4.800E-01	
Dout2	408	401	Dquiet	
Vout2	406	408	-4.800E-01	

***Voltage reference generator

Eref1	98	0	99	0	1
Eref2	51	0	50	0	1
Rref1	98	901	Rideal	100Meg	
Rref2	901	51	Rideal	100Meg	
Eref3	75	0	901	0	1

***Supply current correction

Iq	99	50	0.004		
Fsup1		99	0	Voutmon	1
*DZsup1		0	802	DZENER2	
*Dsup1		99	802	DQUIET	
Fsup2		0	50	Voutmon	-1
*DZsup2		804	0	DZENER2	
*Dsup2		804	50	DQUIET	

***models

.model	Rideal	res	T_ABS=-273
.model	Rnoise	res	T_ABS=27
.model	npn	npn	BF= 49999999
.model	dquiet	d	
.model	dvnoise	d	KF=3240
.model	dinoise1	d	KF=0.0576
.model	dinoise2	d	KF=0.0576
.model	dzener	d	BV=30.385120704108
.model	dzener2	d	BV=50
.ends			
*\$			



Dual 64-/256-Position I²C Nonvolatile Memory Digital Potentiometers

Data Sheet

AD5251/AD5252

FEATURES

- AD5251: Dual 64-position resolution
- AD5252: Dual 256-position resolution
- 1 k Ω , 10 k Ω , 50 k Ω , 100 k Ω
- Nonvolatile memory¹ stores wiper setting w/write protection
- Power-on refreshed with EEMEM settings in 300 μ s typ
- EEMEM rewrite time = 540 μ s typ
- Resistance tolerance stored in nonvolatile memory
- 12 extra bytes in EEMEM for user-defined information
- I²C-compatible serial interface
- Direct read/write access of RDAC² and EEMEM registers
- Predefined linear increment/decrement commands
- Predefined ± 6 dB step change commands
- Synchronous or asynchronous dual-channel update
- Wiper setting readback
- 4 MHz bandwidth—1 k Ω version
- Single supply 2.7 V to 5.5 V
- Dual supply ± 2.25 V to ± 2.75 V
- 2 slave address decoding bits allow operation of 4 devices
- 100-year typical data retention, T_A = 55°C
- Operating temperature: -40°C to +105°C

APPLICATIONS

- Mechanical potentiometer replacement
- General-purpose DAC replacement
- LCD panel V_{COM} adjustment
- White LED brightness adjustment
- RF base station power amp bias control
- Programmable gain and offset control
- Programmable voltage-to-current conversion
- Programmable power supply
- Sensor calibrations

GENERAL DESCRIPTION

The AD5251/AD5252 are dual-channel, I²C[®], nonvolatile memory, digitally controlled potentiometers with 64/256 positions, respectively. These devices perform the same electronic adjustment functions as mechanical potentiometers, trimmers, and variable resistors. The parts' versatile programmability allows multiple modes of operation, including read/write access in the RDAC and EEMEM registers, increment/decrement of resistance, resistance changes in ± 6 dB scales, wiper setting readback, and extra EEMEM for storing user-defined information, such as memory data for other components, look-up table, or system identification information.

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

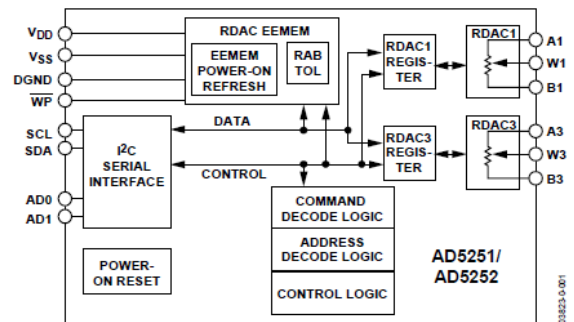


Figure 1.

The AD5251/AD5252 allow the host I²C controllers to write any of the 64-/256-step wiper settings in the RDAC registers and store them in the EEMEM. Once the settings are stored, they are restored automatically to the RDAC registers at system power-on; the settings can also be restored dynamically.

The AD5251/AD5252 provide additional increment, decrement, +6 dB step change, and -6 dB step change in synchronous or asynchronous channel update mode. The increment and decrement functions allow stepwise linear adjustments, with a ± 6 dB step change equivalent to doubling or halving the RDAC wiper setting. These functions are useful for steep-slope, nonlinear adjustments, such as white LED brightness and audio volume control.

The AD5251/AD5252 have a patented resistance-tolerance storing function that allows the user to access the EEMEM and obtain the absolute end-to-end resistance values of the RDACs for precision applications.

The AD5251/AD5252 are available in TSSOP-14 packages in 1 k Ω , 10 k Ω , 50 k Ω , and 100 k Ω options. All parts are guaranteed to operate over the -40°C to +105°C extended industrial temperature range.

¹ The terms *nonvolatile memory* and *EEMEM* are used interchangeably.

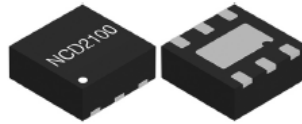
² The terms *digital potentiometer* and *RDAC* are used interchangeably.

Rev. D

Document Feedback

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications subject to change without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.
Tel: 781.329.4700 ©2004–2012 Analog Devices, Inc. All rights reserved.
Technical Support www.analog.com



Features

- Wide capacitance range of 6.6pF to 37.553pF
- Small step size: 0.063pF
- Digitally select up to 1024 capacitance values.
- Operating supply voltage range of 2.5V to 5.5V
- Minimal current draw: $I_{DD} = 1 \mu A$ (Typical)
- Industrial temperature range $-40^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$
- Very small size
DFN: 2 mm x 2 mm (0.079 in x 0.079 in)
TSOT: 2.9 mm x 2.8 mm (0.114 in x 0.110 in)
- Moisture Sensitivity Level 1

Applications

- VCXOs
- Crystal Oscillators
- Tunable RF Stages
- Filter Tuning
- RFID Tags
- Industrial Wireless Controls
- Capacitive Sensor Trimming

Description

The NCD2100 is an EEPROM based digitally programmable variable capacitor that provides capacitive offset trimming for capacitance sensitive circuits. Programming the non-volatile EEPROM register value or implementing on demand capacitance value changes are easily accomplished by means of the simple two-wire serial bus.

Providing 1024 discrete capacitance values over a nominal value range of 6.6pF to 37.553pF with step sizes of 0.063pF, the NCD2100 is well suited to ensure proper operation of capacitive critical circuits. Additionally, to ensure interoperability over a broad array of design environments, the NCD2100 is rated for operation with supply voltages of 2.5V to 5.5V across the temperature range of $-40^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$.

Ordering Information

Part #	Description
NCD2100MTR	NCD2100 DFN-6 in T&R (3000/Reel)
NCD2100TTR	NCD2100 TSOT-6 in T&R (3000/Reel)



Figure 1. NCD2100 Block Diagram

